

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de
Telecomunicación

Diseño de un método eficiente de localización en
interiores para un sistema Ultra Wideband en
presencia de obstáculos

Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida

Tutora: Eva María Arias de Reyna Domínguez

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

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Diseño de un método eficiente de localización en interiores para un sistema Ultra Wideband en presencia de obstáculos

Autor:

Pablo Manuel De Rojas Malpartida

Tutora:

Eva María Arias de Reyna Domínguez

Profesora titular

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: Diseño de un método eficiente de localización en interiores para un sistema Ultra Wideband en presencia de obstáculos

Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida

Tutora: Eva María 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, 2021

El Secretario del Tribunal

*A mi padre. Lo hemos
conseguido, papá.*

Agradecimientos

Punto y seguido. Dos años más de formación que me han empujado a superarme como ingeniero pero, sobre todo, como persona. Este proyecto final no es más que el prólogo de un nuevo proyecto.

Muchas gracias, en primer lugar, a Dña. Eva María Arias de Reyna Domínguez, por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto con ella y haberme guiado y ayudado en el desarrollo del mismo. Tu atención ha sido ejemplar, estoy muy contento de haberte tenido como tutora tanto en mi trabajo final de grado como en el actual trabajo final de máster.

Gracias también a todos los compañeros y amigos que me han acompañado en esta corta pero intensa carrera por lograr el máster.

Y gracias, especialmente, a mi familia, por su incesante e incondicional apoyo, por siempre creer en mí y no permitirme dudar de mí mismo. A mi madre y a mi hermano, por hacer brillar con una sonrisa mis días más grises, a Natalia, por ser siempre ese mar en calma que silencia mis tempestades, a mi abuelo, abuelas y a mi tío, por confiar y alentarme en cada paso y decisión que he tomado, gracias de corazón.

Gracias a todos.

Pablo Manuel De Rojas Malpartida

Sevilla, 2021

Resumen

Los sistemas *Ultra Wide-Band* (UWB) llevan desde los años ochenta en constante crecimiento y desarrollo, marcando el año 2002 un punto de inflexión. Esta tecnología destaca por su gran ancho de banda, capacidad para medir distancias de forma precisa, capacidad de penetración en obstáculos y potencial de lograr sistemas de bajo coste y bajo consumo. Sus aplicaciones comenzaron siendo exclusivamente militares y hoy en día diversas empresas internacionales, que conforman organizaciones como FiRa Consortium y UWB Alliance, encabezan su estudio e implantación.

A lo largo del proyecto se van a exponer el origen, las aplicaciones y características de este tipo de tecnología y, apoyándose en una serie de medidas simuladas y reales, se van a analizar diferentes métodos de localización en interiores existentes – Bounding-Box, B-WLS, NLS y LLS – además de proponer métodos alternativos, basados en los existentes, para paliar el impacto de los efectos de los errores de las medidas Ultra Wideband en presencia de obstáculos.

Abstract

Ultra Wide-Band (UWB) systems have been in constant growth and development since the decade of the eighties, standing 2002 as a turning point. This particular technology stands out because of a great bandwidth, great ability to provide accurate range measurements as well as to penetrate through obstacles, and potential to achieve low cost and low consumption systems. Its applications were first exclusively military and nowadays various international companies, that are part of organizations like FiRa Consortium and UWB Alliance, are leading the research and establishment of this technology in the day-to-day life.

The origin, uses and characteristics of this technology are going to be analysed throughout the project, and different existent indoor positioning methods like Bounding-Box, B-WLS, NLS and LLS, as well as proposed new ones (based on the existent methods), in order to mitigate the effects of the errors of Ultra-Wideband measurements in presence of obstacles are going to be assessed, relying on a set of real and simulated measurements.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xxi
1 Introducción	1
2 Marco histórico de UWB	3
3 UWB	6
3.1 <i>Tipos de señal</i>	6
3.2 <i>Fundamentos teóricos</i>	9
3.2.1 Ancho de banda	9
3.2.2 Canal	11
3.2.3 Máscaras de emisión	14
3.3 <i>Ventajas y desventajas de la tecnología UWB</i>	16
3.4 <i>Aplicaciones</i>	19
3.5 <i>Comparativa con otras tecnologías similares</i>	20
4 Evaluación de un sistema UWB frente a medidas sin línea de visión directa	22
4.1 <i>Algoritmo single-hop de multilateración</i>	22
4.2 <i>Conclusiones prácticas</i>	24
4.2.1 Cálculos de RMSE	24
4.2.2 Conclusiones	27
5 Descripción del material	28
5.1 <i>Componentes</i>	28
5.2 <i>Estimación de la distancia</i>	30
5.2.1 Proceso de emparejamiento	31
5.2.2 Intercambio de datos	34
6 Algoritmos de localización empleados	37
6.1 <i>Métodos existentes</i>	37
6.1.1 Algoritmo single-hop de multilateración	37
6.1.2 Método Bounding Box	38
6.1.3 Técnicas de mínimos cuadrados	39
6.2 <i>Métodos propuestos</i>	44
6.2.1 Métodos fundamentados en NLS	44
6.2.2 Métodos que tratan por igual a las medidas DDP	45

6.2.3	Métodos que añaden una iteración más sobre B-WLS	45
7	Evaluación de los algoritmos	47
7.1	<i>Modelado de errores de medidas de distancia</i>	47
7.1.1	Error de medida de distancia	47
7.2	<i>Error cuadrático medio</i>	49
8	Desarrollo práctico-teórico	50
8.1	<i>Análisis de medidas simuladas</i>	50
8.1.1	Entorno	50
8.1.2	Comparación de B-WLS con los métodos LLS básico y NLS básico	51
8.1.3	Comparación con métodos fundamentados en NLS	54
8.1.4	Comparación de B-WLS con métodos que tratan por igual a las medidas DDP	58
8.1.5	Comparación de B-WLS con métodos que añaden una iteración más sobre B-WLS	62
8.2	<i>Análisis de medidas reales</i>	66
8.2.1	Entorno	66
8.2.2	Comparación con medidas reales	68
9	Conclusión	71
10	Anexos	73
	Referencias	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Valor del ancho de banda relativo de diferentes tipos de sistemas [5]	11
Tabla 3-2: Límite de emisiones de UWB en interior según FCC	15
Tabla 3-3: Límite de emisiones de UWB en interior según EC	16
Tabla 3-4: Comparativa de diferentes características de Wi-Fi, Bluetooth y Ultra Wide-Band	21
Tabla 5-1: Modos de trabajo del EVK1000 y sus características [14]	33
Tabla 8-1: RMSE de los métodos LLS, NLS y B-WLS en función del número y tipo de anclas	52
Tabla 8-2: RMSE de los diferentes métodos frente a número de medidas mínimas UDP	53
Tabla 8-3: RMSE de los métodos B-WLS y NLS-CCV en función del número y tipo de anclas	55
Tabla 8-4: RMSE de los métodos B-WLS y NLS-CCV frente a número de medidas mínimas UDP	55
Tabla 8-5: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS en función del número y tipo de anclas	56
Tabla 8-6: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS frente a número de medidas mínimas UDP	57
Tabla 8-7: RMSE obtenidos para los distintos escenarios planteados para BB-NLS-C	59
Tabla 8-8: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS-C frente a número de medidas mínimas UDP	59
Tabla 8-9: RMSE obtenidos para los distintos escenarios planteados para B-WLS-C	60
Tabla 8-10: RMSE de los métodos métodos B-WLS y B-WLS-C frente a número de medidas mínimas UDP	61
Tabla 8-11: RMSE de los métodos B-WLS, BB-NLS y BB-NLS-R en función del número y tipo de anclas	62
Tabla 8-12: RMSE de los métodos B-WLS ,BB-NLS y BB-NLS-R frente a N° de medidas mínimas UDP	63
Tabla 8-13: RMSE de los métodos B-WLS, BB-NLS-R y B-WLS-R en función del número y tipo de anclas	64
Tabla 8-14: RMSE de los métodos B-WLS ,BB-NLS-R y B-WLS-R frente a N° de medidas mín. UDP	65
Tabla 8-15: Condición de visión de las diferentes anclas con los puntos en el análisis real	68
Tabla 8-16: RMSE de los diferentes métodos para el escenario de medias reales	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Bandas ISM para WLAN en EE. UU.	4
Figura 2-2: Bandas ISM para WLAN en Europa.	5
Figura 3-1: Respuesta de un pulso <i>Ultra Wide-Band</i> en el dominio del tiempo.	6
Figura 3-2: Respuesta Ultra Wide-Band en el dominio frecuencial.	7
Figura 3-3: Respuestas UWB, OFDM y CDMA en el dominio del tiempo.	8
Figura 3-4: Respuesta CDMA en el dominio frecuencial.	9
Figura 3-5: Definición de ancho de banda absoluto, frecuencia central, mínima y máxima [16].	10
Figura 3-6: Ejemplo de señal UWB de pulsos de corta duración y bajo <i>duty cycle</i> , donde T es la duración total de la señal y Tf el intervalo de muestreo [16].	11
Figura 3-7: Efecto del incremento del ancho de banda sobre la capacidad teórica máxima.	12
Figura 3-8: Esquema de tipos de canal según visión entre transmisor y receptor.	13
Figura 3-9: Máscara espectral de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) para sistemas de comunicaciones en interior [18].	14
Figura 3-10: Máscara espectral de la Comisión Europea (EC) para sistemas de comunicaciones en interior [18].	15
Figura 3-11: Comparación de la densidad espectral de potencia y el ancho de banda de diferentes sistemas.	17
Figura 3-12: Comparación de la amplitud y la duración del pulso de diferentes sistemas.	17
Figura 4-1: Ejemplo de multilateración de tres nodos.	23
Figura 4-2: RMSE de dos anclas LOS a las que se van añadiendo anclas NLOS-DDP.	24
Figura 4-3: RMSE de tres anclas LOS a las que se van añadiendo anclas NLOS-DDP.	25
Figura 4-4: RMSE en función de tres anclas LOS a las que se añade un ancla NLOS-UDP.	26
Figura 4-5: RMSE en función de tres anclas NLOS-DDP a las que se añade un ancla NLOS-UDP.	26
Figura 5-1: Elementos del EVK1000 <i>Evaluation Kit</i> .	28
Ilustración 5-2: Parte frontal de la placa de evaluación EVB1000.	29
Figura 5-3: Parte posterior de la placa de evaluación EVB1000.	30
Figura 5-4: Placa con S4 a on [20].	32
Figura 5-5: Placa con S4 a off [20].	32

Figura 5-6: Intercambio de mensajes de asociación entre ancla y objetivo.	34
Figura 5-7: Diagrama de mensajes del two-way ranging.	35
Figura 5-8: Método de toma de medidas con el EVK1000 Evaluation Kit [4].	36
Figura 6-6-1: Ejemplo de multilateración de tres nodos.	38
Figura 6-2: Ejemplo de <i>Bounding-Box</i> .	39
Figura 6-3: Representación con círculos y líneas del modelo no lineal y lineal, respectivamente.	41
Figura 8-1: Entorno de medidas para simulaciones.	50
Figura 8-2: RMSE de los métodos básicos, Bounding Box y B-WLS según número y tipo de anclas	53
Figura 8-3: RMSE de métodos básicos, Bounding-Box y B-WLS frente a condiciones UDP.	54
Figura 8-4: RMSE de los métodos B-WLS y NLS-CCV frente al N ^o mínimo de medidas UDP.	56
Figura 8-5: RMSE de los métodos básicos, B-WLS y BB-NLS según número y tipo de anclas.	57
Figura 8-6: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS frente al N ^o mínimo de medidas UDP presentes.	58
Figura 8-7: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS-C frente al N ^o mínimo de medidas UDP presentes.	60
Figura 8-8-8: RMSE de los métodos B-WLS y B-WLS-C frente al N ^o mínimo de medidas UDP presentes.	61
Figura 8-9: RMSE de los métodos NLS, B-WLS, BB-NLS y BB-NLS-R según número y tipo de anclas.	63
Figura 8-10: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS-R frente al N ^o mínimo de medidas UDP presentes.	64
Figura 8-11: RMSE de los métodos B-WLS, BB-NLS-R y B-WLS-R según número y tipo de anclas.	65
Figura 8-12: RMSE de los métodos B-WLS y B-WLS-R frente al N ^o mínimo de medidas UDP presentes.	66
Figura 8-13: Distribución de anclas y puntos en la sala.	67

UWB	Ultra Wide-Band
FCC	Federal Communications Commission
LTl	Linear Time Invariant
IR	Impulse Radio
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
WLAN	Wireless Local Area Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
DOUE	Diario Oficial de la Unión Europea
EC	European Commission
LDR/LDR-LT	Low Data Rate/ Low Data Rate with Location Tracking
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
SS	Spread Spectrum
HDR/VHDR	High/Very High Data Rate
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
IF	Intermediate Frequency
ToA	Time of Arrival
RSS	Received Signal Strength
SNR	Signal to Noise Ratio
LOS	Line Of Sight
NLOS	Non Line Of Sight
DDP	Detected Direct Path
UDP	Undetected Direct Path
PAN	Personal Area Network
BAN	Body Area Network
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
RF	Radio Frequency
NIC	Network Interface Card
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
LS	Least Square
PRF	Pulse Repetition Frequency
LCD	Liquid Cristal Display
RMSE	Root Mean Square Error

1 INTRODUCCIÓN

Every failure teaches a man something, if he will learn; and you are too sensible a man not to learn from this failure.

Cada fracaso enseña al hombre algo que necesitaba aprender.

- Charles Dickens -

El inicio de los sistemas de transmisión inalámbrica de Banda Ultra-Ancha (UWB, *Ultra Wide-Band*) se remonta mucho tiempo atrás. Se aplicaba ya en el ámbito militar en los años 60, pero el salto a la esfera civil ha estado bastante limitado durante las primeras décadas, siendo el entorno de la aeronáutica donde mayor aplicación ha tenido, principalmente en la fabricación de radares [1].

Desde las primeras investigaciones aplicadas relacionadas con la tecnología, esta ha pasado por varias denominaciones, como *carrier-free modulation*, *baseband modulation* o *impulse radio*, siendo el de *Ultra Wide-Band* el último apelativo que se le ha asociado [1, 2].

La publicación por parte del FCC (*Federal Communications Commission*) de EE. UU. de una nueva normativa sobre UWB en el año 2002, supuso un punto de inflexión en la evolución de la tecnología *Ultra Wide-Band*. Este documento (FCC 02-48) mostraba una serie de reglas, basadas en estándares definidos por la NTIA (*National Telecommunications and Information Administration*), que permitían el uso de esta tecnología para diversas aplicaciones de comunicaciones y medición, médicas, radar y de localización [1, 3].

La capacidad de la tecnología *Ultra Wide-Band* de lograr alcanzar una gran tasa de transmisión inalámbrica de datos con dispositivos de bajo coste y reducido consumo, además de permitir compartir el espectro con diversos sistemas, tanto de banda estrecha como ancha, provocó que, a raíz del cambio de normativa impulsado por el FCC, se elevase el interés sobre UWB por parte de muchos colectivos diferentes. Todas estas características son consecuencia del uso de un gran ancho de banda y una densidad espectral de potencia extremadamente baja [1, 3].

El término Banda Ultra-Ancha IR (*impulse radio*) hace referencia a una tecnología de transmisión radio fundamentada en pulsos compuestos por tiempos de subida y bajada extremadamente cortos (del orden de decenas de picosegundos a pocos nanosegundos), con una energía relativamente baja. Las transmisiones inalámbricas tradicionales – aún en uso – se construían con formas sinusoidales, mediante una señal a una frecuencia determinada (portadora) donde se incorporaba la información en otra señal funcionando a otra frecuencia (moduladora), siendo el resultado de un ancho de banda reducido. En UWB, la transmisión por pulsos ultracortos se traduce en el dominio frecuencial en un espectro de gran ancho de banda [4].

Gracias a este gran ancho de banda, y a la capacidad de transmisión con baja potencia, los sistemas

UWB presentan características tales como altas capacidades, grandes tasas de transmisión, resistencia al multitrayecto e interferencias destructivas y buena resolución temporal.

Por otra parte, estos han de compartir el espectro frecuencial con muchos otros sistemas que pueden causar y/o sufrir interferencias. Por esta razón, los diferentes organismos oficiales que regulan el espacio radioeléctrico han establecido unos límites de emisión para los sistemas UWB, con la intención de que sean compatibles con el resto de comunicaciones ya instauradas.

Conocer la posición de un objeto en una situación de interior es una tarea que, en los últimos años, se está abordando mediante tecnologías inalámbricas. Las características de los sistemas UWB hacen de estos unos de los principales candidatos a afrontar el problema de localización en zonas de interior [4].

Sin embargo, los sistemas inalámbricos de localización en interiores sufren diferentes limitaciones, pudiendo aparecer, si no se abordan adecuadamente, errores importantes. Las señales de Banda Ultra Ancha tienen una capacidad de penetración de obstáculos mayor que otras tecnologías, gracias a su transmisión en pulsos ultracortos, por lo que dispone de las bases para lograr mitigar los errores presentes. Estos elevados errores se dan con la existencia de obstáculos que impiden la detección de la señal del trayecto directo, pero existen diferentes métodos que, usando medidas UWB, pueden suavizar los errores y aportar una localización en interiores precisa.

El proyecto que se desarrolla consiste en estudiar los métodos existentes y diseñar un método eficiente de localización en interiores para un sistema *Ultra Wide-Band*, y que tenga una buena respuesta de estimación de posición en presencia de obstáculos. Para ello, el documento se divide en los siguientes capítulos:

- 2.- Marco Histórico de UWB: orígenes y desarrollo de la tecnología UWB.
 - 3.- UWB: descripción teórica de la tecnología, características y aplicaciones.
 - 4.- Evaluación de un sistema UWB frente a medidas sin línea de visión directa.
 - 5.- Descripción del material: descripción del EVK1000 *Evaluation Kit* (sistema con el cual se tomaron las medidas reales) y su funcionamiento.
- El análisis de resultados procede de medidas simuladas mediante un modelo realista (en gran cantidad) y medidas reales (en número más limitado).
- 6.- Algoritmos de localización empleados: se estudian por un lado algunos métodos existentes (*Bounding-Box* y distintas técnicas de mínimos cuadrados, destacando el método conocido como B-WLS), y, por otro, los métodos propuestos (divididos en fundamentados en NLS, métodos que tratan por igual a las medidas DDP y en métodos que añaden una iteración más sobre B-WLS).
 - 7.- Evaluación de los algoritmos: descripción del modelado de error de medida de distancia y del cálculo de RMSE (*root-mean-square error*, error cuadrático medio).
 - 8.- Desarrollo práctico-teórico: exposición del estudio y análisis práctico del objeto del proyecto (incluye los métodos NLS básico, LLS básico, NLS-CCV, BB-NLS, BB-NLS-C, B-WLS-C, BB-NLS-R y B-WLS-R).
 - 9.- Conclusión: enunciación final de las conclusiones obtenidas.
 - 10.- Anexos: código usado para el análisis de las muestras.

2 MARCO HISTÓRICO DE UWB

La primera constancia histórica de transmisión de pulsos ultracortos se remonta a 1893, cuando Heinrich Rudolf Hertz logró generar ondas electromagnéticas a partir de una chispa eléctrica, sentando las bases de los siguientes sistemas de transmisión por pulsos, a pesar de su muerte un año después.

De los primeros que se apoyó en los resultados de Hertz para alcanzar nuevos logros fue Gugliermo Marconi, quien el 12 de diciembre de 1901 transmitió a través del océano Atlántico (desde Poldu, Cornualles, en Inglaterra, hasta St.Jhon, Terranova, en Canadá) la letra 'S' codificada en Morse, usando un transmisor Spark-gap de radio por chispas [5]. Aunque esta tecnología se basa en la teoría desarrollada por Hermann von Helmholtz en el siglo XIX, los beneficios de grandes anchos de banda nunca fueron considerados por aquel entonces, ya que no se disponía del conocimiento físico-matemático suficiente. Como consecuencia, se abandonó la posibilidad de desarrollar sistemas o tecnologías basadas en *Ultra Wide-Band*, decantándose en los años venideros por profundizar en las comunicaciones de banda estrecha y ondas moduladas [7].

Por esta razón, asaltan dudas respecto a quién otorgar el honor de ser el inventor de *Ultra Wide-Band*. La tecnología realmente comenzó a desarrollarse a partir del 1950, tras la Segunda Guerra Mundial, con el fin de mejorar las comunicaciones a larga distancia. Fue entre 1960 e inicios de 1970 cuando el Dr. Gerald F. Ross demostró la factibilidad de usar señales UWB para aplicaciones de radar y comunicaciones, partiendo del estudio del dominio electromagnético y de las microondas, con el que consiguió su Ph.D. en 1963. Además, el Dr. Ross fue reconocido por la Academia Nacional de Ingeniería (EE. UU.) por su esfuerzos y avances en los estudios sobre UWB, y elegido miembro integrante de la Academia en 1995 [8, 9].

Por tanto, se determina que el origen de los cimientos técnicos de *Ultra Wide-Band* nace de las investigaciones realizadas hacia 1962 en relación al electromagnetismo en el dominio del tiempo, observando la respuesta al impulso de un conjunto de redes microondas. Tras una serie de pruebas, se demostró que un sistema lineal e invariante en el tiempo (*Linear Time-Invariant, LTI*), podía ser definido únicamente por su comportamiento ante una excitación de carácter impulsivo, obteniendo lo que se conoce como respuesta impulsiva, denominada $h(t)$. En particular, la señal de salida $y(t)$ de un sistema para cualquier entrada arbitraria $x(t)$ podía ser determinada por la convolución integral, como se indica en la ecuación siguiente [8]:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(u) x(t - u) du \quad (2-1)$$

Sin embargo, hasta la llegada del osciloscopio de muestreo de paso banda inventado por Bill Hewlett junto con David Packard, y la creación de técnicas de generación de pulsos del orden de los nanosegundos (que proporcionan aproximaciones a la excitación impulsiva) no se pudieron observar ni medir las respuestas a señales impulsivas de las redes microondas.

Una vez logrado que las técnicas de medidas de pulsos se aplicaran al diseño en banda ancha de elementos radiantes en antenas, se aplicó esta misma base teórica para la creación del radar de pulsos, derivando en el descubrimiento de nuevos sistemas de comunicación.

Años después, en 1973, la invención por parte de Kenneth W. Robbins de un receptor de pulsos de muy corta duración reemplazó al osciloscopio y aceleró el desarrollo del sistema. Esta primera versión original es conocida ahora como *Impulse-Radio UWB* (IR-UWB). Tras serle atribuidos diferentes nombres como *Baseband* (Banda base) o *Carrier-free* (sin portadora), el término de *Ultra Wide-Band* fue adoptado en 1989 por el departamento de defensa de los Estados Unidos, que ya por entonces investigaba sus aplicaciones en diferentes campos, como el radar, comunicaciones, sensores y sistemas de posicionamiento, entre otros.

En Estados Unidos, la responsabilidad en la gestión del espectro radioeléctrico se reparte entre la *National Telecommunications and Information Administration* (NTIA), encargada del espectro utilizado por el Gobierno Federal (control de tráfico aéreo, defensa, etc.), y la *Federal Communications Comision* (FCC), que se ocupa de gestionar el resto del espectro, desde el usado por particulares, hasta los servicios prestados por organizaciones privadas y los servicios de emergencias y seguridad pública. El organismo equivalente en Europa es el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación, también conocido por su equivalente en inglés, *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI).

Fue a mediados de los años ochenta cuando la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) modificó por primera vez la regulación del espectro que gobernaba los sistemas sin licencia para permitir su uso en la sociedad civil. Esta modificación autorizaba la modulación en espectro ensanchado a los productos utilizados en redes inalámbricas que operaban en los planos industrial, científico y médico, conocidas también como bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) [8]. Estas frecuencias ISM se muestran en la Figura 2-1, en lo que respecta a las bandas de EE. UU., y en la Figura 2-2, referidas a las equivalentes en Europa.

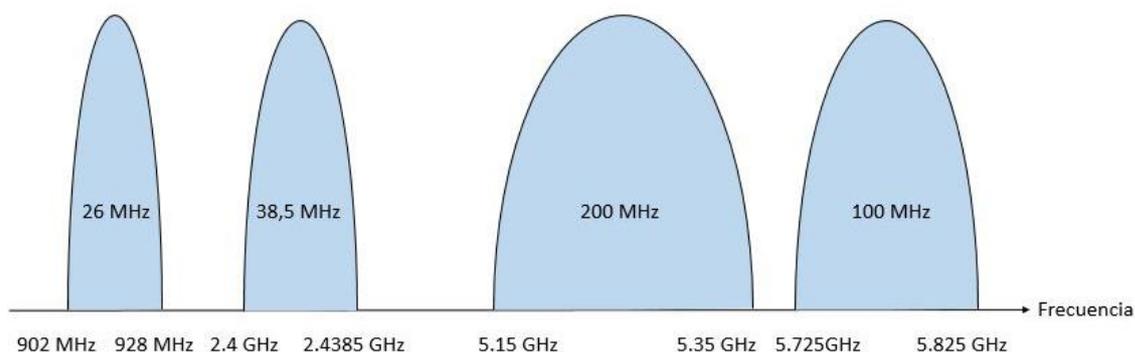


Figura 2-1: Bandas ISM para WLAN en EE. UU.

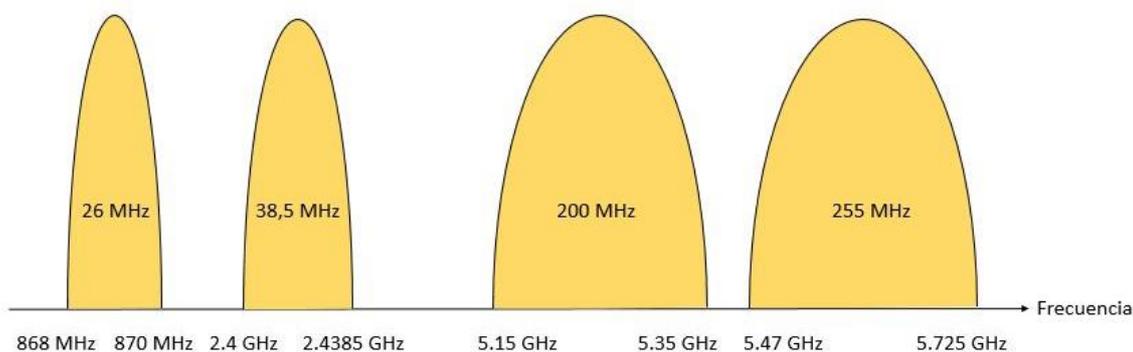


Figura 2-2: Bandas ISM para WLAN en Europa.

Generalmente, estas frecuencias permiten a usuarios de productos inalámbricos transmitir sobre ellas sin necesidad de permisos ni licencias específicas, aunque puede variar dependiendo del país.

Además, los productos UWB por sí mismos deben cumplir unos requisitos, como operar con una potencia de transmisión por debajo de un número de vatios, o una ganancia máxima o PIRE que no sobrepase ciertos rangos. El espectro puede utilizarse con licencia o sin ella, aunque la mayor ventaja de desplegar un sistema sin licencia es que no es necesario recurrir al órgano regulatorio correspondiente para conseguir permisos de uso. Sin embargo, esto puede incurrir en una devaluación de los niveles de calidad de otros servicios con licencia, al generar interferencias.

Concretamente, de acuerdo a la FCC, a partir del año 2002, los dispositivos UWB para comunicaciones y sistemas de medida deben funcionar con un ancho de banda de -10 dB en el interior, en el rango de frecuencias que se extiende desde 3.1 hasta 10.6 GHz y con una densidad espectral de potencia máxima de emisión de -41.3 dBm/MHz. Debido a la limitación de potencia impuesta por los organismos reguladores sobre las especificaciones de UWB, el alcance de estos sistemas es bastante reducido.

En el caso particular de España, el 7 de octubre de 2014 se modificó la Decisión 2007/131/CE en la que se autoriza la utilización armonizada del espectro radioeléctrico para los equipos integrados con tecnología de Banda Ultra Ancha en la Comunidad Europea (artículo 3.2 de la Directiva 2014/53/EU). El cambio fue introducido en el DOUE (Diario Oficial de la Unión Europea) por la Comisión Europea [9]. En apartados posteriores se profundizará un poco más respecto a los límites de emisión de señales *Ultra Wide-Band*.

En 2018, con el objetivo de desarrollar la tecnología UWB y elaborar el estándar IEEE 802.15.4z, fue creado el órgano internacional *UWB Alliance*. Entre sus fundadores se encuentran empresas como Bosch, Hyundai, Kia, Zebra, Xiaomi, Alteros, Novelda y Ubisense, entre otros. El objetivo de la alianza es el despliegue de las tecnologías de Banda Ultra-Ancha en diferentes áreas de aplicación, y la adaptación de los requisitos y normas necesarias, en particular, para promover la utilización de la tecnología en diferentes campos, productos y soluciones. Esta unión marca las bases definitivas para la inclusión de la tecnología UWB en el día a día de la sociedad [10, 11].

3 UWB

An experiment is a question which science poses to Nature and a measurement is the recording of Nature's answer.

Un experimento es una pregunta que la ciencia le plantea a la Naturaleza, y una medida es la anotación de la respuesta de la Naturaleza.

- Max Planck -

A lo largo de este apartado se hará una descripción general de la tecnología, indagando en los tipos de señal y analizando técnicamente y con profundidad las propiedades características de ancho de banda y capacidad de canal. Asimismo, se ahondará en los límites de emisión, en las propiedades y en las aplicaciones principales. Por último, se mostrarán las diferencias entre la tecnología *Ultra Wide-Band* y otras similares.

3.1 Tipos de señal

Las señales UWB han ido evolucionando a lo largo de los años a la par que la tecnología y el conocimiento técnico-teórico. Los distintos descubrimientos y avances han permitido un mejor aprovechamiento de las características de este tipo de sistema [12].

Por un lado, está el sistema UWB original, el IR-UWB monobanda (*Impulse Radio Ultra Wide-Band*), en el que la información se transmite por medio de impulsos eléctricos de muy corta duración que ocupan todo el espectro disponible para el usuario. Este comportamiento se puede observar en la respuesta característica en el dominio del tiempo de la Figura 3-1, y su equivalente en el dominio de la frecuencia en la Figura 3-2 [8, 1, 12]. Este será el tipo de señal UWB en el que nos centraremos a lo largo del proyecto.

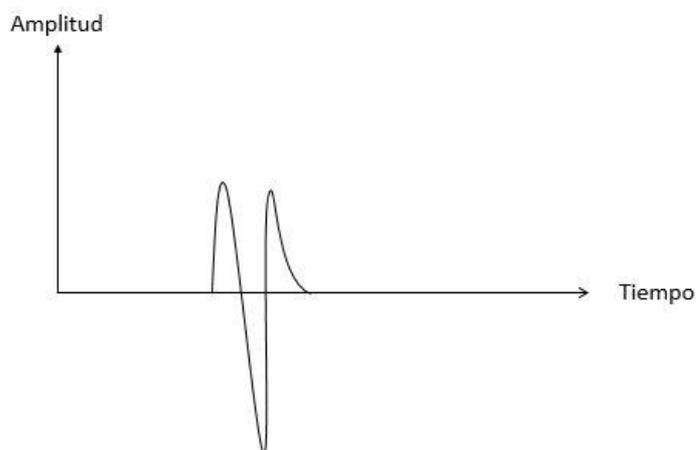


Figura 3-1: Respuesta de un pulso *Ultra Wide-Band* en el dominio del tiempo.

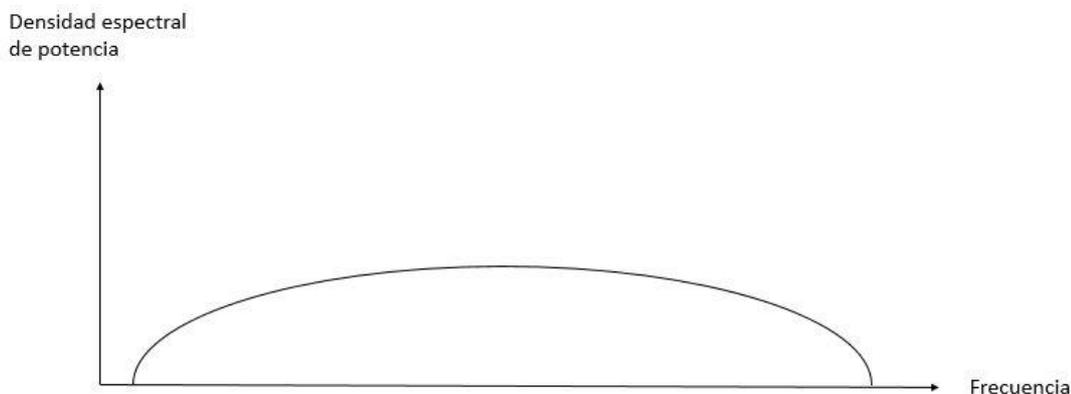


Figura 3-2: Respuesta Ultra Wide-Band en el dominio frecuencial.

Aunque esta técnica no se está usando para aplicaciones de comunicaciones, sí está en la actualidad siendo planteada y empleada para tareas de localización y posicionamiento. Empresas como Decawave lo están comercializando ofreciendo precisiones de centímetros.

Además, las técnicas IR-UWB también pueden ser multibanda. En este caso, se divide el espectro disponible en varias bandas de transmisión más pequeñas, de forma que la información de uno o varios usuarios puede enviarse haciendo uso de una o varias de estas sub-bandas.

Esta versión de baja tasa permite seguimiento de localización, y es denominada LDR/LDR-LT (*Low Data Rate/ Low Data Rate with Location Tracking*). Se caracteriza por presentar tasas de transmisión que llegan a valores de decenas de Mbps, y por alcanzar distancias del orden de decenas de metros. La aplicación UWB en redes de área personal (WPANs) de baja tasa queda definida en el estándar 802.15.4a del IEEE [13, 14].

Por otro lado, están los sistemas UWB que no se basan en pulsos, sino en modulaciones. Encontramos así los sistemas multibanda con portadora, como pueden ser el DS-SS (Direct Sequence Code Division Multiple Access) de alta velocidad o el OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) multibanda [5, 13, 14]. Estas técnicas deben darse con modulaciones muy cortas en el tiempo, para que así sus respectivas respuestas en frecuencia ocupen un gran ancho de banda, cumpliendo de este modo con las condiciones de UWB. En la Figura 3-3 se muestra una comparativa de señales OFDM, CDMA y UWB en el tiempo [4].

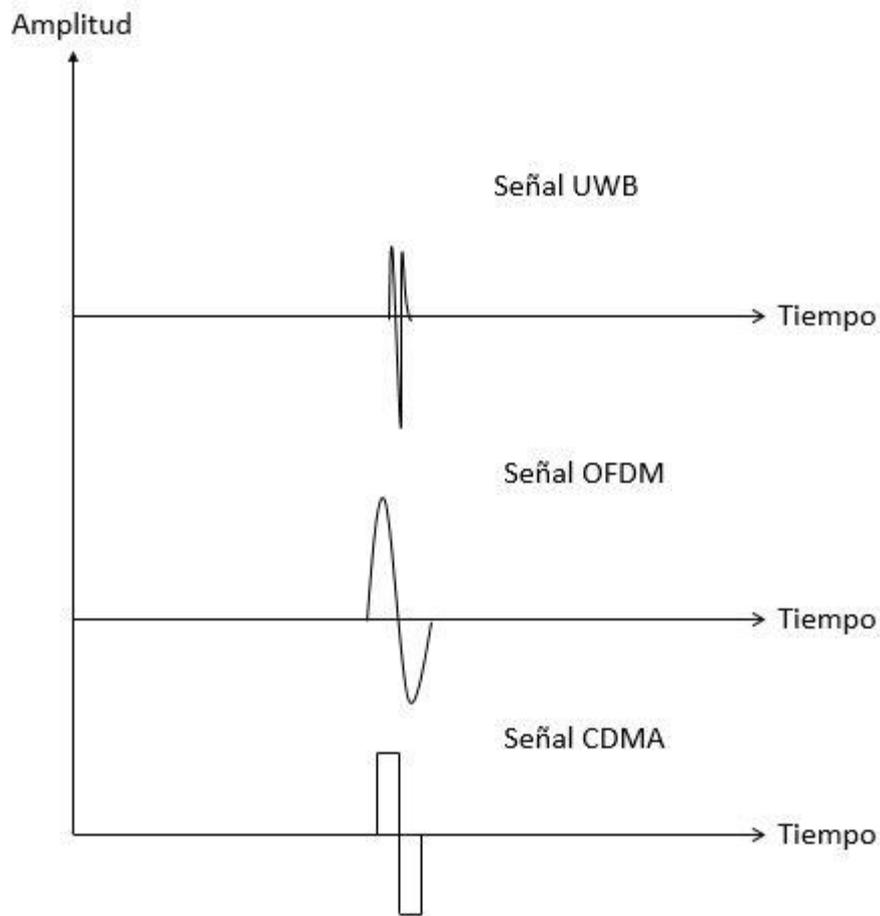


Figura 3-3: Respuestas UWB, OFDM y CDMA en el dominio del tiempo.

La técnica DS-CDMA de alta velocidad se concibió como alternativa a las técnicas de impulso radio, basada en la utilización de un sistema tradicional de espectro ensanchado por secuencia directa (DS-CDMA), donde la frecuencia de chip es tan alta que el ancho de banda final ocupado por el sistema cumple con los requisitos para ser considerado como señal UWB [12]. De este modo, la forma del espectro CDMA es muy similar al del impulso UWB, tal y como podemos observar en la Figura 3-4. Por esta razón, los sistemas UWB DS-SS presentan muchas propiedades de los sistemas tradicionales CDMA.

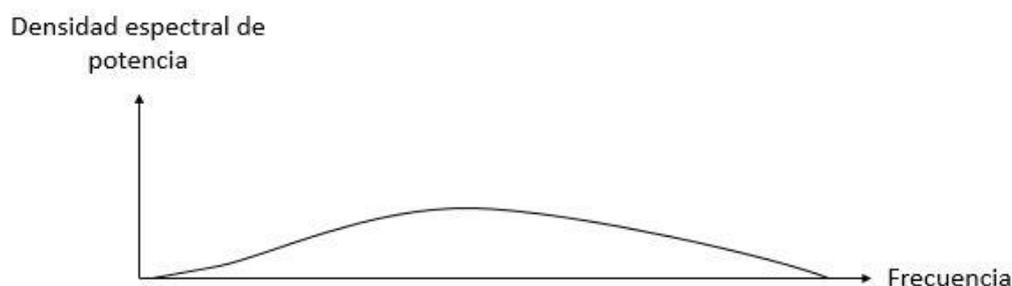


Figura 3-4: Respuesta CDMA en el dominio frecuencial.

Para el caso de OFDM Multibanda [15], el espectro se divide en varios canales OFDM, transmitiendo información por uno o varios de ellos. Al emplear bandas múltiples y alternas, se favorece la resistencia frente a interferencias y mejora la diversidad frecuencial del canal. Es por ello que las técnicas OFDM fueron las principales candidatas para crear un sistema UWB multibanda. Ahora hay empresas, como Alereon, que lo están posicionando en el campo de aplicaciones de seguridad y aplicaciones médicas, por sus especiales características de seguridad.

Esta versión basada en modulaciones de alta o muy alta tasa de datos, denominada como HDR/VHDR (*High/Very High Data Rate*) se diferencia por presentar tasas de transmisión elevadas, del orden de centenares de Mbps, y alcances cortos, de unos cinco metros. Se harán puntuales referencias a esta versión a lo largo del proyecto. Este tipo de alta tasa de UWB queda incluido en el estándar 802.15.3 del IEEE.

3.2 Fundamentos teóricos

El principal rasgo distintivo de las señales inalámbricas *Ultra Wide-Band* de impulso radio es que constan de impulsos de energía sin portadora, con una duración muy corta, del valor de nanosegundos. Debido a la pequeña extensión de sus impulsos, el ancho de banda espectral alcanza el orden de los GHz. En la práctica, las máscaras de emisión obligan a usar pulsos limitados en banda para que su espectro se acomode a ellas.

La primera definición genérica de *Ultra Wide-Band* la proporcionó la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa de América (DARPA, *Defense Advanced Research Projects Agency*) en 1990 como cualquier esquema de transmisión que ocupe un ancho de banda de más del 25% de la frecuencia central o ancho de banda relativo mayor del 25%. Más recientemente, esta tecnología fue definida como cualquier señal transmitida que cumpla que su ancho de banda absoluto sea mayor de 500 MHz o su espectro de frecuencia sea superior al 20% de la frecuencia central, es decir, que su ancho de banda relativo sea mayor del 20%.

3.2.1 Ancho de banda

Al no tener modulación, esta tecnología puede no requerir de portadora de onda sinusoidal y, por tanto, no requiere un procesado de frecuencia intermedia (*Intermediate Frequency, IF*) por lo que puede

trabajar en banda base.

En la Figura 3-5 se puede observar cómo se define el ancho de banda espectral en función de la frecuencia. El ancho de banda absoluto se obtiene como la diferencia entre la frecuencia superior F_H a -10 dB del punto máximo y la frecuencia inferior F_L a -10 dB del punto máximo. Expresándolo de forma matemática es [1]:

$$B = F_H - F_L \quad (3-1)$$

Este método para determinar la extensión espectral se conoce también como ancho de banda a -10 dB.

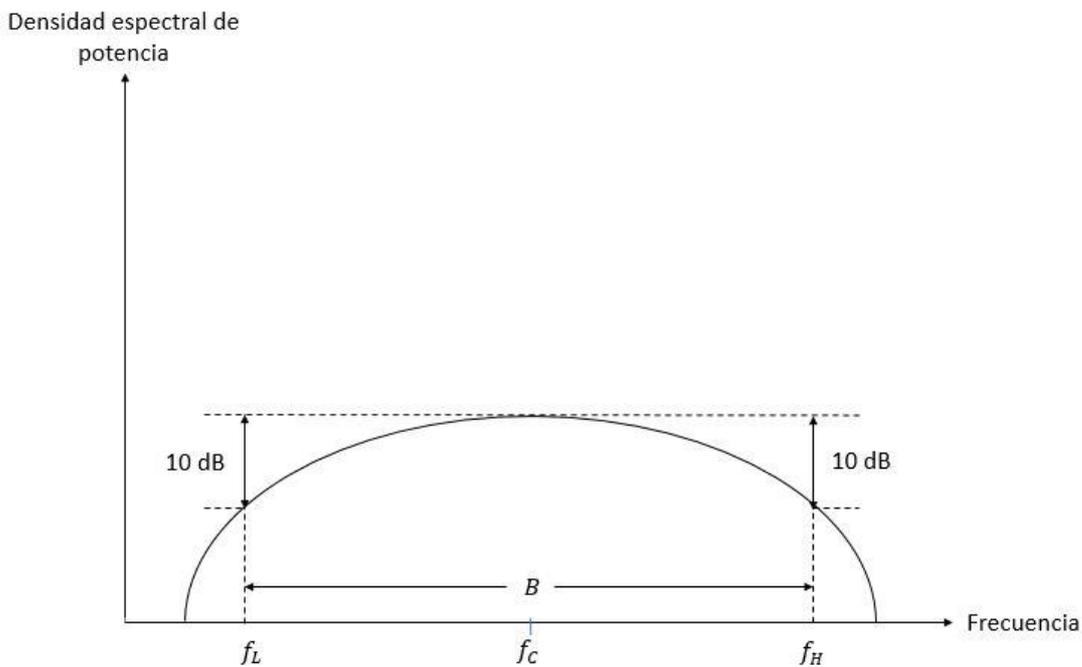


Figura 3-5: Definición de ancho de banda absoluto, frecuencia central, mínima y máxima [16].

Por otro lado, el ancho de banda relativo se calcula de la forma siguiente:

$$B_{rel} = \frac{B}{f_c} \quad (3-2)$$

Donde f_c hace referencia a la frecuencia central, que se calcula como:

$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2} \quad (3-3)$$

Partiendo de las expresiones de la Ecuación 3-2 y de la Ecuación 3-3 [5], se puede obtener una relación a partir de la cual se averigua el valor del ancho de banda relativo, usando las frecuencias f_H y f_L :

$$B_{rel} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \times 100\% \quad (3-4)$$

Por tanto, para cumplir los requisitos de señales *Ultra Wide-Band* se debe satisfacer alguna de las siguientes inecuaciones [5]:

$$\begin{aligned} B_{rel} &> 20\% \\ B &> 500 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (3-5)$$

En la siguiente tabla se indica la clasificación de las señales basada en su ancho de banda relativo:

Tabla 3-1: Valor del ancho de banda relativo de diferentes tipos de sistemas [5]

Tipo de banda	Relación
Banda estrecha	$B_{rel} < 1\%$
Banda ancha	$1\% < B_{rel} < 20\%$
Banda Ultra-Ancha	$B_{rel} > 20\%$

Debido a la relación inversa entre el ancho de banda de la señal y su duración, los sistemas UWB se caracterizan por tener formas de ondas de duración muy pequeña. Un sistema UWB transmite pulsos de duración muy corta con bajo *duty cycle*, es decir, la relación entre la duración del pulso y el tiempo medio entre dos transmisiones consecutivas se mantiene pequeña, tal y como se muestra en la Figura 3-6. En un sistema de comunicaciones IR-UWB como el de la figura, se transmite un número de pulsos UWB por símbolos de información, y esta información es normalmente expresada por los tiempos o polaridades de los pulsos. El principal propósito para los sistemas de posicionamiento es estimar los parámetros relacionados con la posición de esta señal IR-UWB, tales como su tiempo de llegada (*Time of Arrival, ToA*), aspectos que se desarrollarán en posteriores apartados del documento [4].

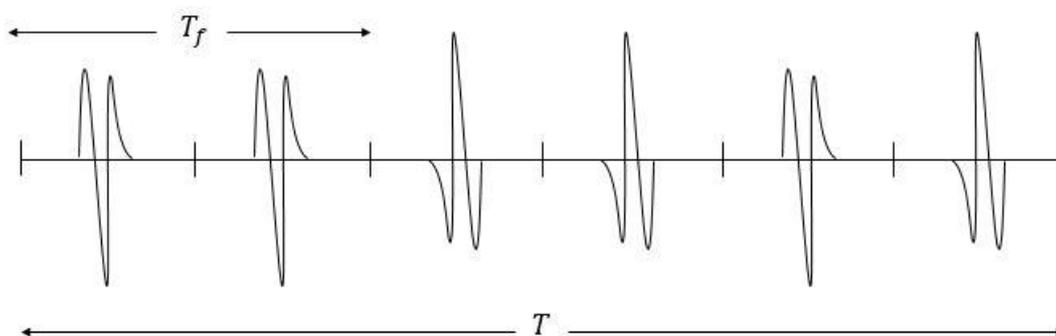


Figura 3-6: Ejemplo de señal UWB de pulsos de corta duración y bajo *duty cycle*, donde T es la duración total de la señal y T_f el intervalo de muestreo [16].

3.2.2 Canal

En este apartado se destacarán las características de capacidad de canal de UWB y se clasificarán los canales según la línea de visión entre transmisor y receptor.

3.2.2.1 Capacidad del canal

Uno de los aspectos más distinguidos de UWB es la capacidad del canal, como se ha destacado previamente. Según el teorema de Shannon [17], el límite máximo de la capacidad del canal aumenta de manera lineal con el ancho de banda disponible, mientras que crece de manera logarítmica con la relación señal a ruido, tal y como se expone en la Ecuación 3-6. Por tanto, los sistemas con anchos de banda de 2 GHz o más tienen, para igual relación señal a ruido, un límite teórico de capacidad mucho mayor que los sistemas de banda estrecha [17].

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3-6)$$

Donde:

- C: Máxima capacidad del canal (bits/s).
- B: Ancho de banda del canal (Hz).
- S: Potencia de la señal (W).
- N: Potencia de ruido (W).

El incremento de capacidad máxima teórica del canal aumentando el ancho de banda se puede apreciar en la Figura 3-7.

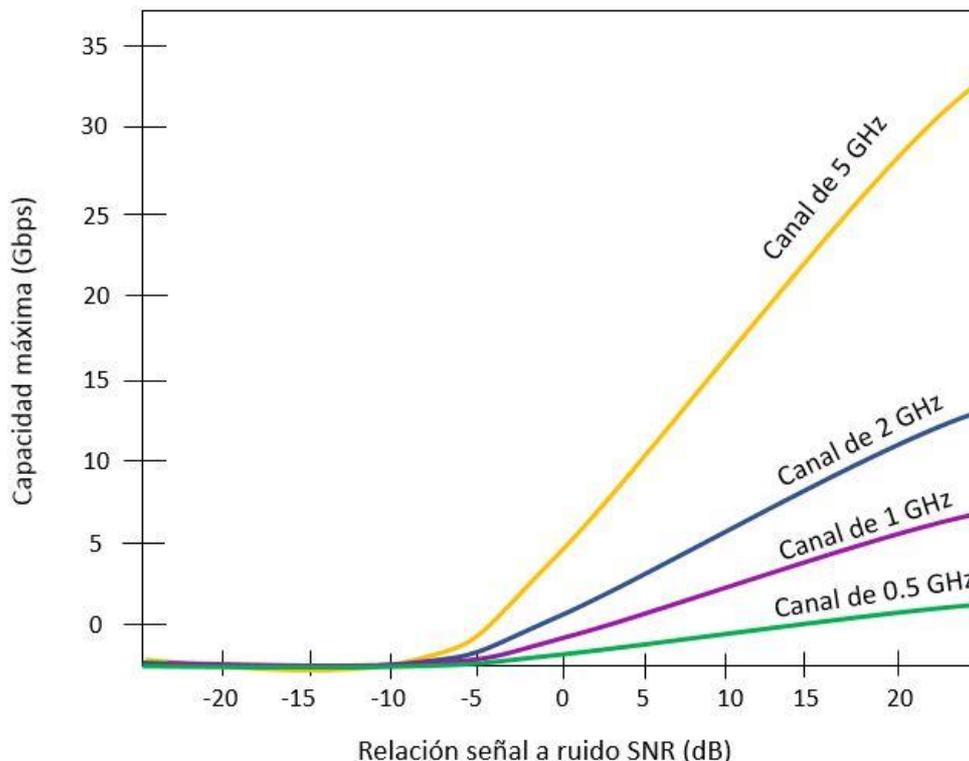


Figura 3-7: Efecto del incremento del ancho de banda sobre la capacidad teórica máxima.

No obstante, en un caso real, la capacidad no puede crecer infinitamente aumentando el ancho de banda, ya que al aumentar el ancho de banda del canal también aumenta el ruido.

A pesar de las ventajas de UWB, existen y han existido problemas para la implantación efectiva de esta tecnología, por lo que la creación del *UWB Alliance*, así como la contribución de otras organizaciones como FiRa Consortium, organismos de investigación y Universidades, va a marcar un antes y un después en la introducción de esta en la vida cotidiana.

3.2.2.2 Tipos de canal

Para el objetivo que marca el proyecto, es interesante clasificar los canales según la visión entre receptor y transmisor.

Si entre los dispositivos hay línea de visión directa, es decir, si el transmisor puede dibujar una línea recta entre su antena y la de destino sin que traspase ningún otro elemento y el receptor sea capaz de detectar la señal a través de este trayecto directo, este caso se denomina canal con Línea de Visión Directa y Camino Directo Detectado o, en inglés, *Line Of Sight (LOS) - Detected Direct Path (DDP)*.

De forma opuesta, si entre los dispositivos no existe una línea recta capaz de unirlos sin topar con algún obstáculo, se definiría como canal sin Línea de Visión Directa o, en inglés, *Non Line Of Sight (NLOS)*. Este caso, a su vez, se divide en otras dos posibles configuraciones. Por un lado, aun teniendo elementos intermedios que imposibilitan la visión entre transmisor y receptor, se puede dar el caso en que la potencia de la señal recibida sea suficiente para que se detecte el camino directo, por lo que el tiempo de llegada de la señal será parecido al que tendrían si las condiciones fueran LOS. Este caso es conocido como Camino Directo Detectado o, en inglés, *Detected Direct Path (DDP)*. Por otro lado, los errores grandes ocurren cuando la señal debe pasar elementos de gran densidad, lo que provoca que la señal quede muy atenuada, u obstruida por estos elementos, tomando el receptor erróneamente como señal del camino directo la primera señal que le alcance (cuyo trayecto habrá sufrido una o más reflexiones, su longitud será mayor que la del trayecto directo real y, por tanto, el error en la medida de distancia podría ser considerable). Este segundo caso es conocido como Camino Directo No Detectado o, en inglés, *Undetected Direct Path (UDP)*.

De forma esquemática, en la Figura 3-8 se ilustra la clasificación de los canales ayudándonos de las placas EVB1000.

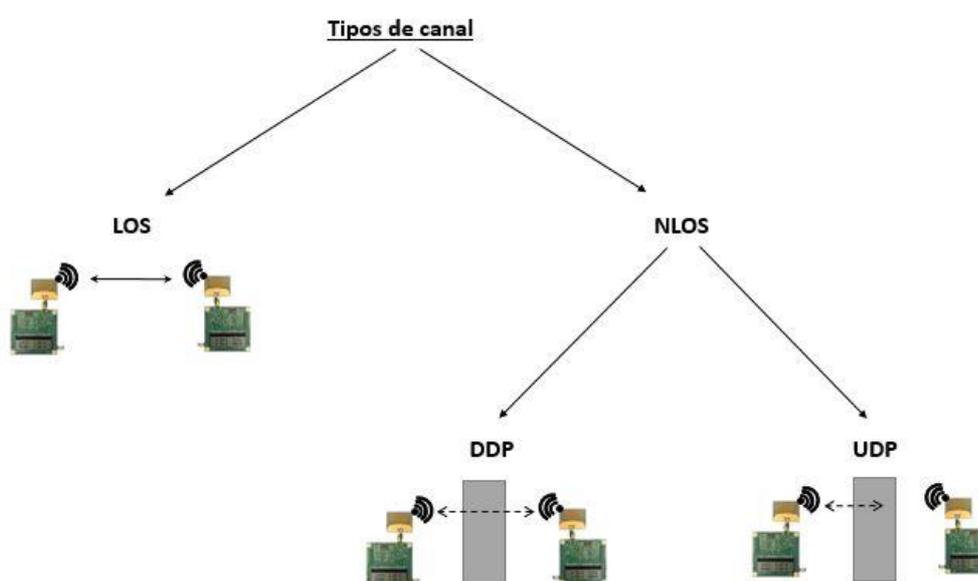


Figura 3-8: Esquema de tipos de canal según visión entre transmisor y receptor.

3.2.3 Máscaras de emisión

Debido a que las señales UWB ocupan una gran porción del espectro, estas se ven en la obligación de coexistir con otros sistemas sin causar interferencias significativas. Por ello, el 22 de abril de 2002, la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) emitió un informe (*First Report and Order*, FCC 02-48) en el que permitían el libre uso de dispositivos y tecnología *Ultra Wide-Band*, pero imponiendo un conjunto de regulaciones para los sistemas que transmitan señales de este tipo [4]. Del mismo modo se hizo más tarde en Europa de la mano de la ETSI.

De acuerdo con las regulaciones, los dispositivos UWB no pueden transmitir por encima de ciertos niveles de potencia para así no causar una interferencia significativa en otros sistemas ya existentes en el mismo espectro de frecuencia, permitiendo este hecho que la tecnología disponga de la posibilidad de emisión sin licencia.

En referencia a los valores límites permitidos en EE. UU., tal y como se puede observar en la Figura 3-9, la densidad espectral de potencia media no debe exceder -41.3 dBm/MHz en la banda que va desde 3.1 a 10.6 GHz, siendo la norma más restrictiva fuera de dicha banda [18, 15, 5, 8, 16, 4]. En lo que respecta a Europa, en la Figura 3-10 se observa que el rango de frecuencias con límite de -41.3 dBm/MHz es menor, permitiéndose tan solo en la banda de 6 a 8.5 GHz, de 2.5 GHz de anchura, mucho más restrictivo en comparación con la extensión de 7.5 GHz en la que se permite transmitir a -41.3 dBm/MHz por la FCC. En las imágenes a continuación se ilustran con detalle los límites FCC y EC para sistemas de comunicaciones en interiores.

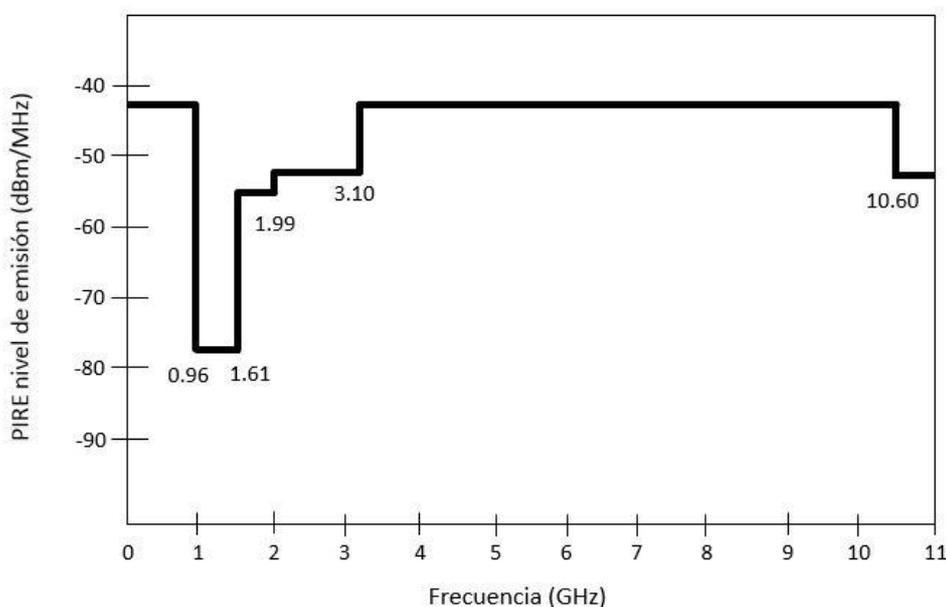


Figura 3-9: Máscara espectral de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) para sistemas de comunicaciones en interior [18].

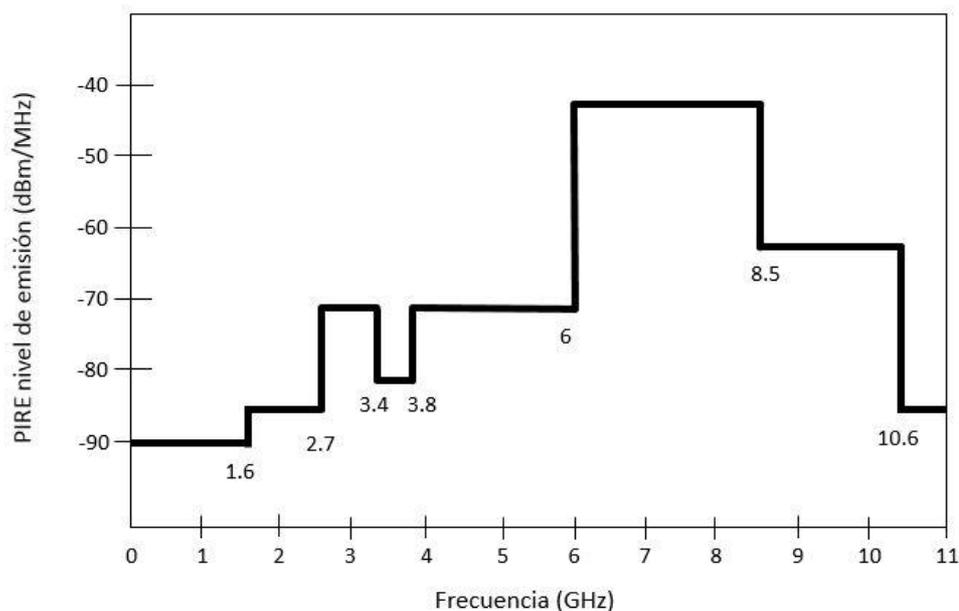


Figura 3-10: Máscara espectral de la Comisión Europea (EC) para sistemas de comunicaciones en interior [18].

La razón que justifica la poca potencia que se permite radiar en la banda comprendida entre los 0.96 GHz y los 1.61 GHz en la Figura 3-8 y Figura 3-9 se debe a la presión ejercida por grupos de diferentes servicios, tales como la telefonía móvil, sistema de posicionamiento global (GPS) y aplicaciones militares.

De forma general, la baja potencia de transmisión autorizada por la FCC y EC reduce la distancia de los enlaces, limitando esta tecnología a aplicaciones de redes inalámbricas de área personal (WPAN). Si no existieran estos techos de nivel de potencia de transmisión, se podría aumentar el rango de alcance de UWB. En la Tabla 3-2 se indica de forma detallada los valores de PIRE promedio definidos por la FCC según los rangos de frecuencia [19]:

Tabla 3-2: Límite de emisiones de UWB en interior según FCC

Rango de frecuencias (GHz)	PIRE promedio (dBm/MHz)
> 10,6	-51.3
3.1 – 10.6	-41.3
1.99 – 3.1	-51.3
1.61 – 1.99	-53.3
0.96 – 1.61	-76.3
< 0.96	-41.3

Del mismo modo, en la Tabla 3-3 se ilustra con detalle los valores de PIRE promedio por rangos de frecuencia según la EC:

Tabla 3-3: Límite de emisiones de UWB en interior según EC

Rango de frecuencias (GHz)	PIRE promedio (dBm/MHz)
> 10.6	-85
8.5 – 10.6	-65
6 – 8.5	-41,3
3.8 - 6	-70
3.4 – 3.8	-80
2.7 – 3.4	-70
1.6 – 2.7	-85
< 1.6	-90

Tanto en las imágenes de las máscaras espectrales como de las tablas que representan los límites de potencia por rango de frecuencia, se advierte que las normas de la Unión Europea son mucho más restrictivas que las de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos. De hecho, a lo largo de todo el espectro, los valores límites de PIRE promedio en Europa son siempre iguales o menores que los equivalentes en EE. UU.

Referente al impacto de este sistema en el continente asiático, diferentes países, entre los que se encuentran Japón, Corea del Sur, China, Singapur y Taiwán, muestran especial interés en las propuestas de UWB con una participación activa en las sesiones del IEEE relacionadas con esta tecnología. De hecho, gran parte de los miembros de la *UWB Alliance* son empresas con origen en este continente [11].

3.3 Ventajas y desventajas de la tecnología UWB

Debido a sus características particulares, UWB tiene una serie de ventajas destacadas [6, 8, 14, 15, 20]:

- Es indetectable, al confundirse con ruido, y posee gran resistencia a interferencias procedentes de la banda estrecha. Como vemos en la Figura 3-11, el nivel de señal del sistema UWB es menor a los típicos niveles de ruido que soportan otros sistemas, disminuyendo la posibilidad de interceptar la señal, además de que la interferencia con otros servicios es prácticamente nula.

- Las comunicaciones UWB son muy seguras, puesto que es necesario conocer la secuencia de transmisión de los bits de información para poder escuchar las transmisiones. Además, la relación señal a ruido (SNR) es tan baja que las transmisiones son fácilmente confundidas con ruido ambiente o ruido de fondo, tal y como se observa en la Figura 3-11. Además, en la Figura 3-12 se percibe la brevedad de sus pulsos en comparación con el resto de sistemas. Se mantiene el código de color en ambas figuras para que se puedan apreciar mejor las diferencias de respuesta para la densidad de espectral de potencia y la amplitud de la señal entre los distintos sistemas.

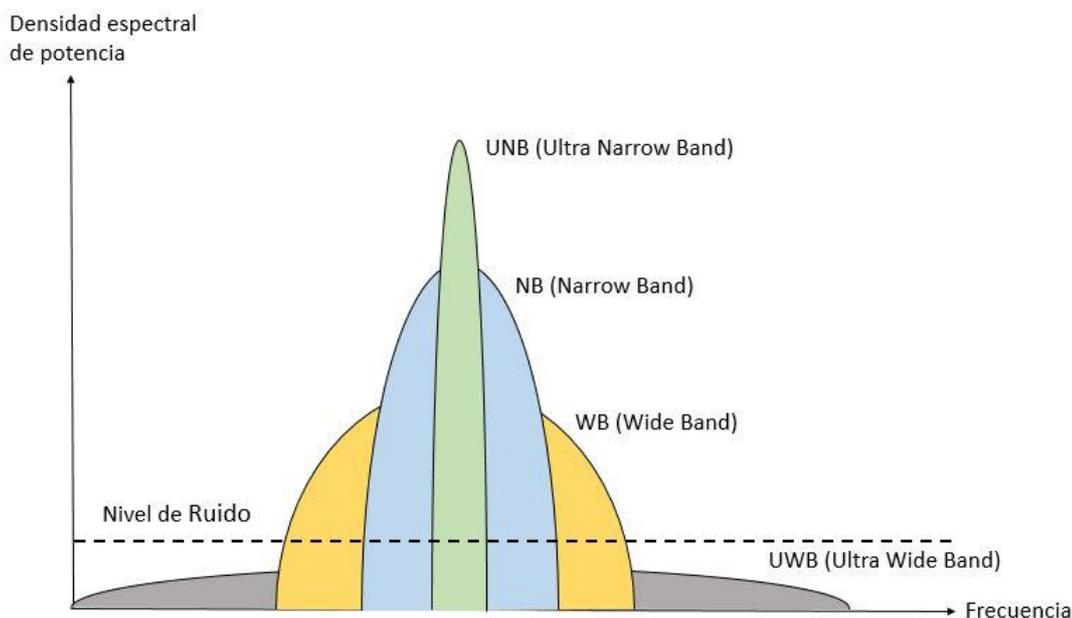


Figura 3-11: Comparación de la densidad espectral de potencia y el ancho de banda de diferentes sistemas.

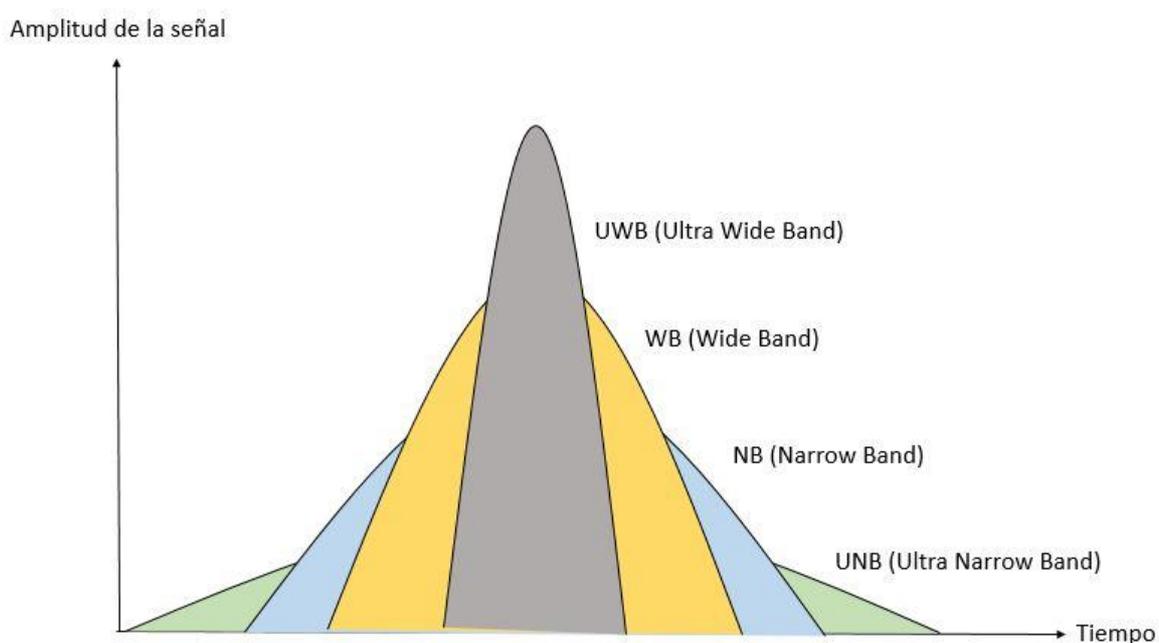


Figura 3-12: Comparación de la amplitud y la duración del pulso de diferentes sistemas.

- Permite la posibilidad de estimar la posición con precisión de centímetros.
- La señal es inmune al efecto multi-camino ya que, debido a la brevedad del pulso transmitido, es posible diferenciar entre los componentes de la señal directa y de las señales reflejadas en obstáculos, habiendo una probabilidad extremadamente baja de colisionar ambos pulsos y causar degradación.
- Posee una gran capacidad de canal (o tasa de datos), ya que esta se define como la máxima cantidad de datos que pueden ser transmitidos por segundo sobre un canal de comunicaciones. Dado que UWB alcanza anchos de banda del orden de gigahertzios, es de esperar que se obtengan grandes tasas de datos. Sin embargo, debido a la limitación de potencia de la FCC y EC sobre las transmisiones UWB, una tasa de datos muy alta solo sería posible para distancias cortas, haciendo de esta tecnología la candidata perfecta para aplicaciones de rangos pequeños con altos requerimientos de tasa de bits.
- Utiliza bandas de frecuencias asignadas a otros servicios sin causar ningún tipo de interferencia perjudicial gracias a su baja potencia de transmisión. De esta forma, permite la posibilidad de reutilizar espectros sin ningún impacto, como se observa en la Figura 3-11.
- Tiene alta inmunidad al *jamming*. Por el término *jamming* se entiende la emisión deliberada de señales de radio con el objetivo de empobrecer la relación señal a ruido (SNR) de cierta comunicación. Gracias al gran rango de frecuencias que alcanza, se convierte en una tarea difícil hacer un *jamming* simultáneo de todo el espectro ocupado.
- Al tener la tecnología *Ultra Wide-Band* un rango tan amplio de frecuencias, hay muchas posibilidades de que algunas puedan atravesar distintos obstáculos.
- Los niveles de potencia radiada en los chips UWB son muy bajos, del orden de medio milivatio (mW). La razón reside en que UWB-IR transmite impulsos cortos constantemente en lugar de ondas moduladas como la mayoría de los sistemas de banda estrecha. Los chips usados no requieren conversión de radio frecuencia (RF) a frecuencia intermedia (IF), osciladores locales, mezcladores ni filtros. Esto permite que la autonomía de los dispositivos donde es integrado el chip UWB no se vea prácticamente afectada, manteniendo así su duración.

Hay que destacar la gran diferencia de anchos de banda de los diferentes tipos de señal de la Figura 3-11, encontrándose *Ultra Narrow-Band* alrededor de 1KHz [1], donde *Narrow-Band* es del orden de 30 KHz, mientras que para *Wide-Band* su ancho de banda se encuentra próximo a 5 MHz, siendo *Ultra Wide-Band* la que mayor ancho de banda posee, de varios GHz [4].

Un aspecto negativo de UWB es la capacidad de alcance de la señal, ya que para aumentar esta ha de ser a costa de disminuir la velocidad de transmisión, debido a que se encuentran unos límites permitidos de niveles máximos de potencia, como se ha indicado en la sección 3.2.2 “Máscaras de Emisión”. El alcance se ve además afectado por la presencia de obstáculos que

tienden a reflejar las señales, aunque también es cierto que la capacidad de UWB para atravesar estructuras u objetos es mucho mayor que la de otras tecnologías inalámbricas.

3.4 Aplicaciones

La tecnología *Ultra Wide-Band* es conocida desde los años sesenta, aunque el término UWB es relativamente reciente, ya que tradicionalmente este sistema era conocido como modulación en banda base sin portadora o impulsos radio. UWB ha tenido un uso casi exclusivamente militar desde que se comenzara a usar ampliamente en la década de los ochenta. En este contexto, supuso un enorme progreso gracias a la alta precisión con la que se pueden medir distancias y capturar imágenes de alta resolución de objetos enterrados bajo tierra u ocultos por superficies.

El gran ancho de banda que brindan los sistemas UWB presenta interesantes posibilidades tanto para aplicaciones radar, que son principalmente empleadas en el ámbito militar, como para sistemas de comunicaciones que, aunque también se usan en aplicaciones militares, hoy en día presentan un uso principalmente comercial. Es especialmente interesante la aplicación relacionada con el Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT), ya que el bajo consumo energético facilitaría su aplicación en estos entornos.

Por tanto, los sectores gubernamental y militar han tenido un gran protagonismo en el aprovechamiento de la tecnología, dándole diferentes usos, entre los que destacan [8]:

- Dispositivos radio con baja probabilidad de interceptación y detección para equipos tácticos de combate.
- Comunicaciones a bordo de aeronaves.
- Comunicaciones con baja probabilidad de interceptación y detección sin visión directa por ondas de superficie.
- Altimetros y radares anticolidión.
- Etiquetas activas para control de presencia y logística.
- Radares de detección de intrusiones.
- Intercomunicadores con baja probabilidad de interceptación y detección.
- Sistemas precisos de localización.
- Enlaces para comunicaciones en vehículos autónomos y robotizados.

Evidentemente, estas aplicaciones también fueron fácilmente extendidas al mercado corporativo, principalmente en servicios de emergencia, vigilancia, sanidad, seguridad o construcción. Además, se impulsó su desarrollo debido a que los dispositivos UWB son muy competitivos, no sólo para aplicaciones corporativas sino también domésticas [20].

Una aplicación importante son las Redes de Área Personal (PAN), dentro de las que se incluyen las Redes de Área Corporal (BAN) [4]. En este tipo de comunicaciones, la distancia entre transmisor y receptor son de pocos metros, pudiéndose distinguir entre aplicaciones que requieran altas velocidades (electrónica de consumo como televisión digital o USB inalámbrico, etc.) o bajas velocidades de transmisión de datos (*streaming* de audio, *Bluetooth* o infrarrojos). En este sentido, las BANs presentan como aplicación directa su utilización en el sector médico o de la salud (implantes médicos o monitorización de parámetros como la tensión arterial) pero

también cabe considerar la posibilidad de su empleo en otros campos como pueden ser el deportivo (seguimiento de parámetros relativos al ejercicio que se está efectuando), el entretenimiento (desarrollo de juegos multimedia), o en las casas inteligentes, en entornos de IoT. Este último ejemplo de uso estaría íntegramente ligado con las emergentes redes de sensores. Las aplicaciones en este campo incluyen la supervisión, monitorización y automatización de viviendas y entornos de oficina, la monitorización de la seguridad en los aeropuertos y centros de gran tránsito, así como el seguimiento al aire libre, entre otros.

3.5 Comparativa con otras tecnologías similares

Dentro de las tecnologías inalámbricas que pueden considerarse como competidoras de UWB, cabe destacar Bluetooth y Wi-Fi [4].

En lo que se refiere a velocidad de transmisión, UWB permitirá velocidades de varios Gbps, llegándose en un futuro próximo a 500 Mbps [22], con lo que se asemeja a la velocidad del Wi-Fi 802.11n, que puede llegar a una velocidad real de transmisión de 600 Mbps. En este aspecto, Bluetooth es un débil rival, pues la velocidad que alcanza es inferior a 1 Mbps.

El consumo de las baterías de los terminales inalámbricos se reduce drásticamente ya que los niveles de potencia radiada en sistemas UWB son del orden de menos de medio milivatio, mientras que en Bluetooth son del orden de varias centenas de milivatios y de decenas de milivatio para Wi-Fi. Por lo tanto, los dispositivos UWB gozan de una gran autonomía, algo que siempre es muy bien acogido por los usuarios.

Otra ventaja de UWB es la seguridad intrínseca que posee, puesto que es necesario conocer la secuencia de transmisión de los bits de información para poder escuchar las transmisiones. Además, la relación señal a ruido es tan baja que las transmisiones pueden llegar a camuflarse con ruido ambiente, siendo así indetectables. Asimismo, las transmisiones pueden cifrarse sin ningún tipo de limitación y se puede excluir de la escucha aquellos terminales que se hallen más alejados de una cierta distancia específica. Tampoco se tiene que sintonizar la transmisión, ya que no existe portadora.

Aparte de las claras ventajas sobre Wi-Fi y Bluetooth mencionadas anteriormente, UWB tiene el potencial de productos menos costosos. Debido a la simplicidad de su funcionamiento y a la pequeña potencia radiada, la tarjeta de interfaz de red (NIC) de los sistemas de redes inalámbricas de área local en tecnología UWB se reduce a un circuito integrado (CMOS) con un tamaño muy reducido. Esto supone que los dispositivos en los que se integra no sufren alteraciones significativas en su tamaño, forma y peso [4]. En la Tabla 3-4 se ilustra una comparación en precio, consumo, velocidad, seguridad y alcance de las tecnologías en cuestión.

Tabla 3-4: Comparativa de diferentes características de Wi-Fi, Bluetooth y Ultra Wide-Band

Tecnología	Precio	Consumo	Mbps	Seguridad	Alcance
Wi-Fi	↑	↔	↑	↔	↑
Bluetooth	↔	↔	↓	↓	↓
UWB	↓	↓	↑	↑	↓

Asimismo, al usar *Ultra Wide-Band* un gran ancho de banda del espectro de radiofrecuencia para transmitir información, es capaz de transmitir más en menos tiempo en comparación con Bluetooth y Wi-Fi. Mientras que estas tecnologías están limitadas a frecuencias sin licencia en los 900 MHz, 2.4 GHz y 5.1 GHz, UWB hace uso de un amplio espectro de frecuencia de 7.5 GHz de extensión.

Sin embargo, la gran desventaja de UWB respecto a todas estas tecnologías, aparte de su menor alcance sobre todo en comparación con Wi-Fi, es su falta de implantación en el mercado. Wi-Fi ya se ha asentado en el mercado empresarial y residencial, mientras que Bluetooth está también muy extendido en el hogar, aunque no es muy habitual su empleo por los usuarios salvo para la sincronización entre diferentes dispositivos.

4 EVALUACIÓN DE UN SISTEMA UWB FRENTE A MEDIDAS SIN LÍNEA DE VISIÓN DIRECTA

Para conocer con mayor profundidad cómo afectan las distintas medidas y escenarios en los que puede encontrarse un sistema *Ultra Wide-Band*, en este apartado se hace un pequeño resumen del Proyecto Final de Grado que realicé en 2018 [4], en el que se estudiaba la resistencia del método de localización LLS (*Linear Least Squares*) para un sistema UWB frente a las medidas sin línea de visión directa (NLOS).

Para la evaluación de forma práctica se tomaron medidas con el software EVK1000 en una situación de interior. Concretamente, se realizó el estudio en una sala y pasillo del departamento de “Teoría de la señal y comunicaciones” de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

En los siguientes apartados se explican brevemente el método de localización usado y las conclusiones alcanzadas [4].

4.1 Algoritmo single-hop de multilateración

El método clásico para determinar la posición de un nodo es la multilateración. En la presencia de una estimación ideal de distancia, el i -ésimo nodo define una circunferencia centrada en (x_i, y_i) con radio d_i , tal y como se puede observar en la Figura 4-1. La intersección de las circunferencias generadas por las anclas corresponde con la posición del punto objetivo. En un plano bidimensional, al menos tres anclas son necesarias para poder determinar las coordenadas estimadas. Matemáticamente, la posición estimada puede ser obtenida a través del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 &= d_1^2 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ (x_N - x)^2 + (y_N - y)^2 &= d_N^2\end{aligned}\tag{4-1}$$

Estas igualdades representan la forma de una circunferencia y generan un sistema no lineal. Sin embargo, este sistema puede ser linealizado substrayendo la última ecuación de las primeras $N-1$ ecuaciones, llegando así a un sistema lineal abordable, cuya representación matricial es la siguiente:

$$A \cdot p = b \quad (4-2)$$

Gráficamente, el algoritmo realiza un cálculo como el de la Figura 4-1, donde busca la intersección de las circunferencias generadas por las anclas.

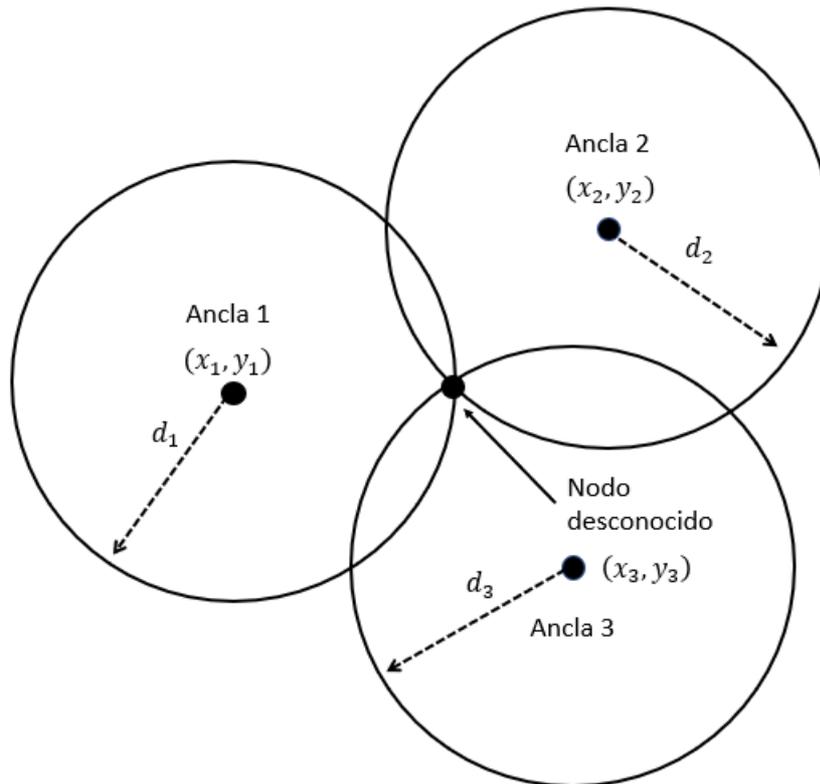


Figura 4-1: Ejemplo de multilateración de tres nodos.

En un escenario real donde con alta probabilidad se encuentren errores en las estimaciones, los círculos pueden no intersectar en un punto común. Por ello, cuando se encuentran escenarios en los que $N > 3$, el sistema de ecuaciones es sobredefinido y puede ser resuelto por una aproximación no lineal de mínimos cuadrados (Least-Square, LS) [4].

4.2 Conclusiones prácticas

A lo largo del proyecto final de grado mencionado, se realizaron múltiples comparaciones y cálculos, de las que se sacaron firmes y variadas conclusiones.

4.2.1 Cálculos de RMSE

De los resultados dados y conclusiones deducidas, hay que destacar que no se pretende atribuir a los valores resultantes de RMSE una validez general, ya que el número de valores de error que se incluyen en el cálculo de la media muestral es relativamente pequeño, especialmente para algunos de los casos. Simplemente se ha elegido la fórmula de la aproximación del RMSE para resumir en un único valor los resultados de error de localización disponibles para cada caso en el conjunto de medidas reales que se han usado. Además, el cálculo de este error proporciona una aproximación al RMSE, ya que no se incluyó la esperanza del error cuadrático, sino la media muestral del error cuadrático.

El método por el cual se estimó la posición necesita de un mínimo de tres medidas debido a los requisitos del algoritmo usado. A priori, las medidas NLOS-DDP son menos precisas que las LOS, aunque se puede tener un impacto positivo al unirlos, tal y como podemos ver en la Figura 4-2. Este comportamiento indica que, para el conjunto de medidas disponible, el RMSE al ir incorporando medidas NLOS-DDP a dos medidas LOS va a tener un comportamiento cuasi exponencial inverso, por lo que conforme se va aumentando el número de medidas el descenso del error cuadrático medio es menor.

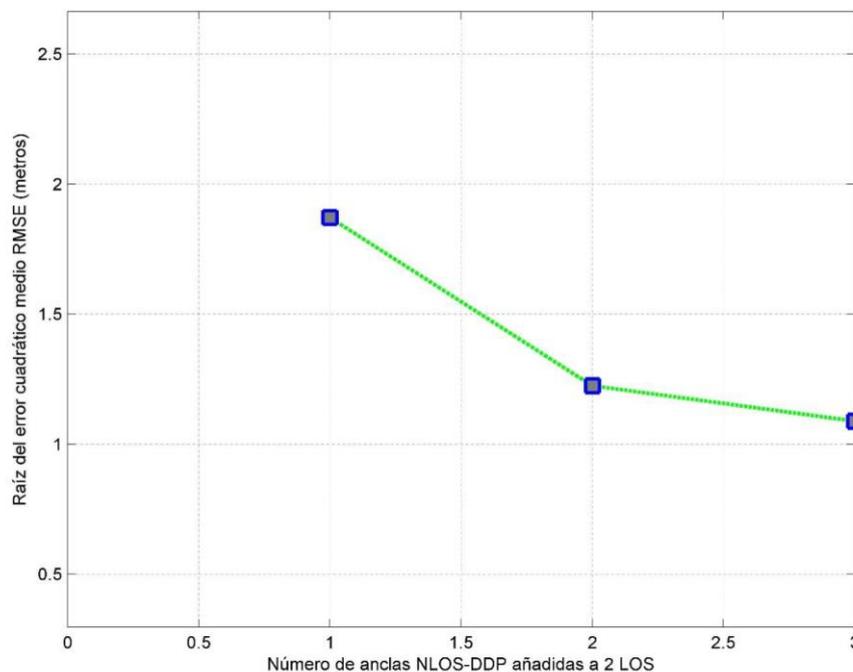


Figura 4-2: RMSE de dos anclas LOS a las que se van añadiendo anclas NLOS-DDP.

Este aporte positivo de las medidas NLOS-DDP es principalmente debido a que se parte de dos medidas de visión directa y no tres. De hecho, observando el comportamiento del error cuadrático medio añadiendo anclas NLOS-DDP a tres anclas LOS, el comportamiento del RMSE es totalmente

opuesto, como se observa en la siguiente imagen. La línea de esta gráfica traza un camino cuasi lineal, creciendo el RMSE a medida que se aumentan las muestras NLOS-DDP. Este comportamiento es inverso al de la Figura 4-3, aunque ambos tienden a valores de error cercanos.

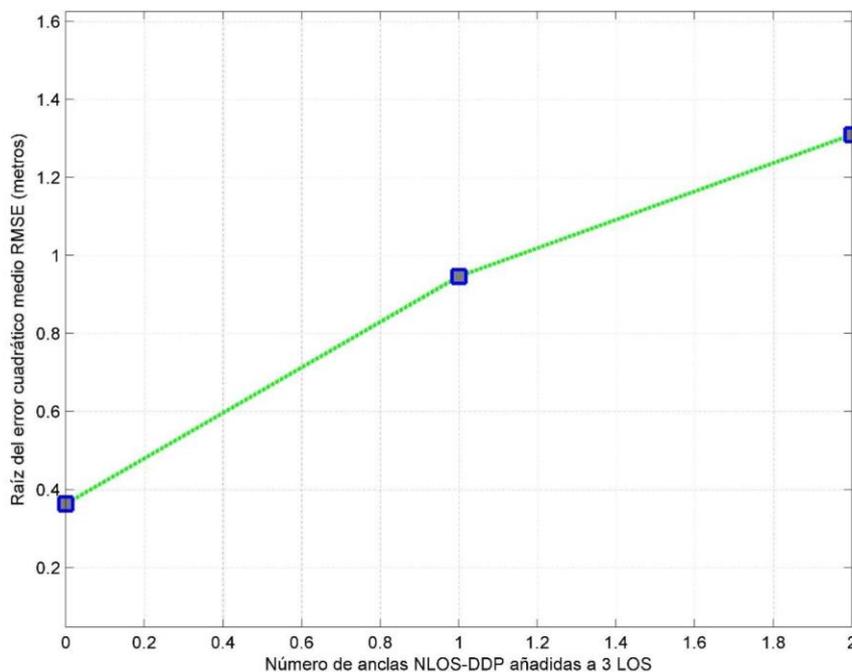


Figura 4-3: RMSE de tres anclas LOS a las que se van añadiendo anclas NLOS-DDP.

De los casos anteriores podríamos, por tanto, alcanzar la conclusión de que a falta de medidas LOS para estimar la posición, el algoritmo responde positivamente añadiéndole a dos medidas con visión directa medidas NLOS-DDP.

Otra forma de verificar la resistencia frente a medidas sin visión directa, es comparando el error cuadrático medio que surge al añadir medidas NLOS-UDP a, por un lado, anclas únicamente LOS y, por otro, anclas únicamente NLOS-DDP. Esta comparación final determina con mayor exactitud la validez o no de implementar el algoritmo ante la posibilidad de que las estimaciones se den con medidas sin línea de visión directa DDP [4].

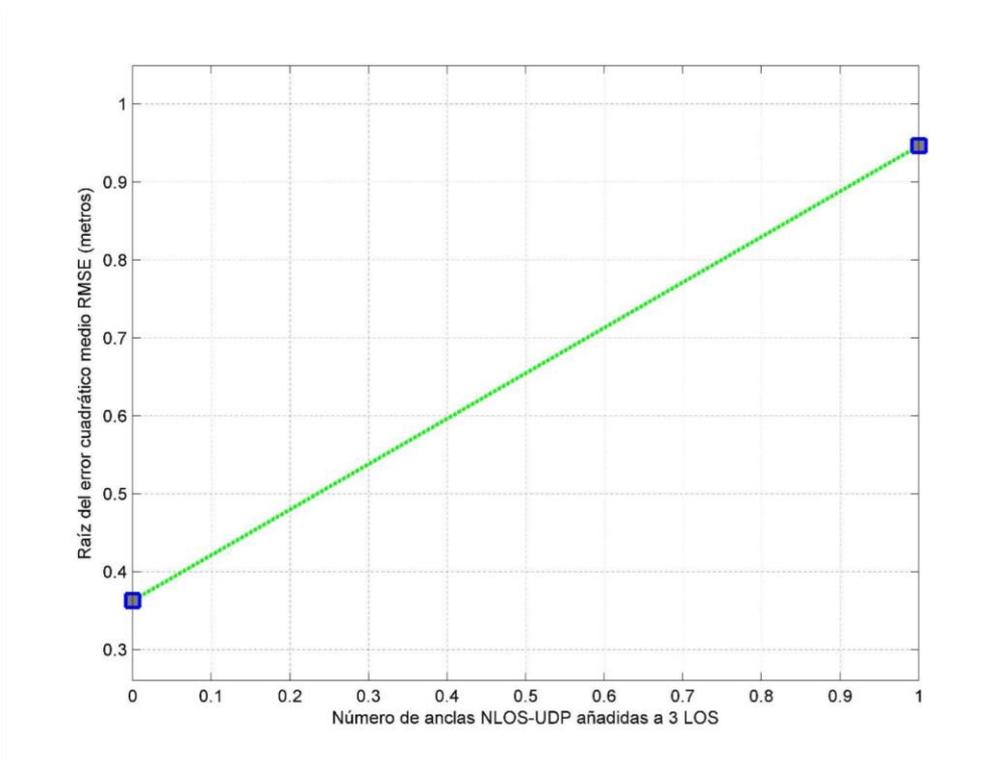


Figura 4-4: RMSE en función de tres anclas LOS a las que se añade un ancla NLOS-UDP.

En la Figura 4-4, donde se muestra el RMSE en función de tres anclas LOS a las que se añade un ancla NLOS-UDP, se comprueba el gran aumento del error cuadrático medio que supone introducir una medida NLOS-UDP a tres medidas LOS.

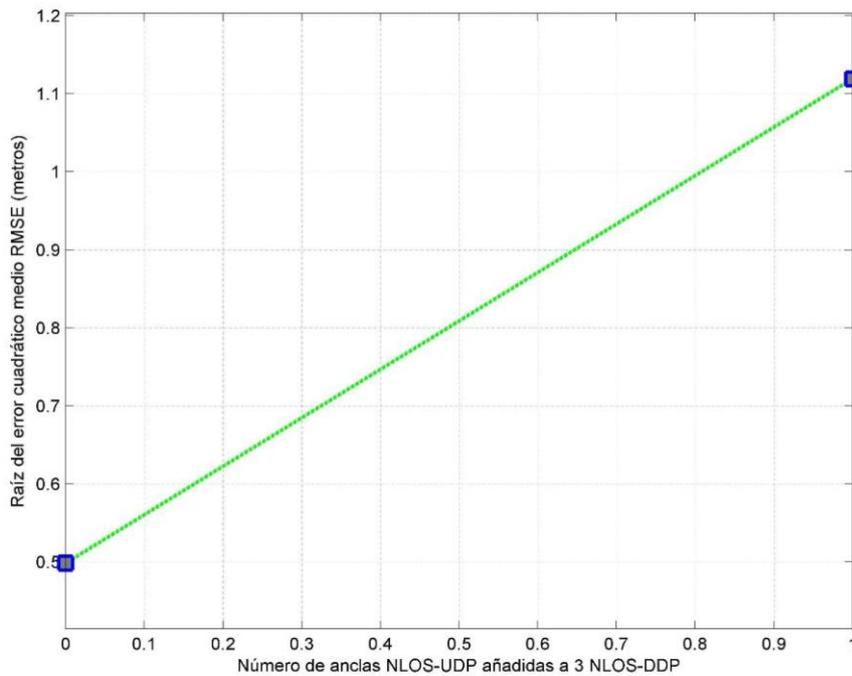


Figura 4-5: RMSE en función de tres anclas NLOS-DDP a las que se añade un ancla NLOS-UDP.

En este último caso, el error de estimación con tres anclas NLOS-DDP es de 0.50 metros, mientras que al añadir al algoritmo una nueva medida de carácter NLOS-UDP, el RMSE sube a 1.11 metros. Por tanto, siendo los valores de las pendientes cercanas, se podría confirmar que estas medidas NLOS-DDP tienen una respuesta satisfactoria.

4.2.2 Conclusiones

Una vez se han analizado todos los casos posibles se ha podido llegar a conclusiones sobre la validez o no de las medidas NLOS.

El propósito final del proyecto era evaluar la resistencia de UWB frente a errores NLOS en la localización. De este modo, cabe destacar la gran diferencia que hay entre los dos tipos distintos de NLOS. Una vez mostrada toda la información y llegado a diferentes conclusiones extraídas de las muestras y los estudios, cabe señalar dos aspectos principales:

- Las medidas NLOS sin canal de trayectoria directa son totalmente insostenibles para pocas anclas. El error aumenta de forma considerable, ya que la circunferencia que introduce en el cálculo del algoritmo es mucho mayor que la real. La falta de precisión de estas medidas se puede aliviar añadiendo medidas de anclas LOS.
- Las medidas NLOS con canal de trayectoria directa pueden generar efectos positivos en la estimación y pueden llegar a ser sostenibles según su valor. Es decir, las medidas NLOS-DDP se encuentran en un gran abanico de valores que puede ser cercanos a medidas LOS con poca precisión, o generar un error considerable.

Asimismo, una medida NLOS-DDP puede reforzar la estimación de una posición de dos medidas LOS. Sin embargo, estas no pueden llegar a ofrecer la precisión de las medidas de línea de visión directa.

Como conclusión final, quisiera reforzar la idea de que las medidas NLOS-UDP no son factibles ya que introducen un gran error, y que las medidas NLOS-DDP son más precisas y pueden llegar a complementar medidas LOS, pero nunca llegando a su precisión. Por tanto, las medidas NLOS-DDP son viables para ciertos tipos de aplicaciones y funciones en las que no se necesite una precisión tan grande como la proporcionada solamente por medidas LOS [4].

5 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

*An expert is a person who has made all the mistakes
that can be made in a very narrow field.*

*Un experto es una persona que ha cometido todos los
errores que se pueden cometer en un determinado
campo.*

- Niels Bohr -

Para la toma de muestras reales del trabajo final de grado se ha empleado el dispositivo EVK1000 *Evaluation Kit* de la compañía DecaWave, empresa irlandesa que desarrolla circuitos integrados para localización y comunicación en zonas de interior haciendo uso de la tecnología inalámbrica *Ultra Wide-Band* [4]. Estas medidas se han usado también para el desarrollo del presente proyecto.

5.1 Componentes

El dispositivo de evaluación consta de los siguientes elementos, ilustrados en la Figura 5-1:

- Dos placas EVK1000.
- Dos antenas.
- Dos cables USB 2.0.



Figura 5-1: Elementos del EVK1000 *Evaluation Kit*.

La placa de evaluación EVK1000 mide 7cm x 7cm. La parte frontal contiene una pantalla LCD de dos filas de 16 caracteres que se utiliza para mostrar información de las medidas de distancia, como se observa en la Figura 5-2, encuadrado en azul. Además, se encuentran los selectores 1 (S1), resaltado en rojo, el Led0 y los Leds del 3 al 8, en verde [4].

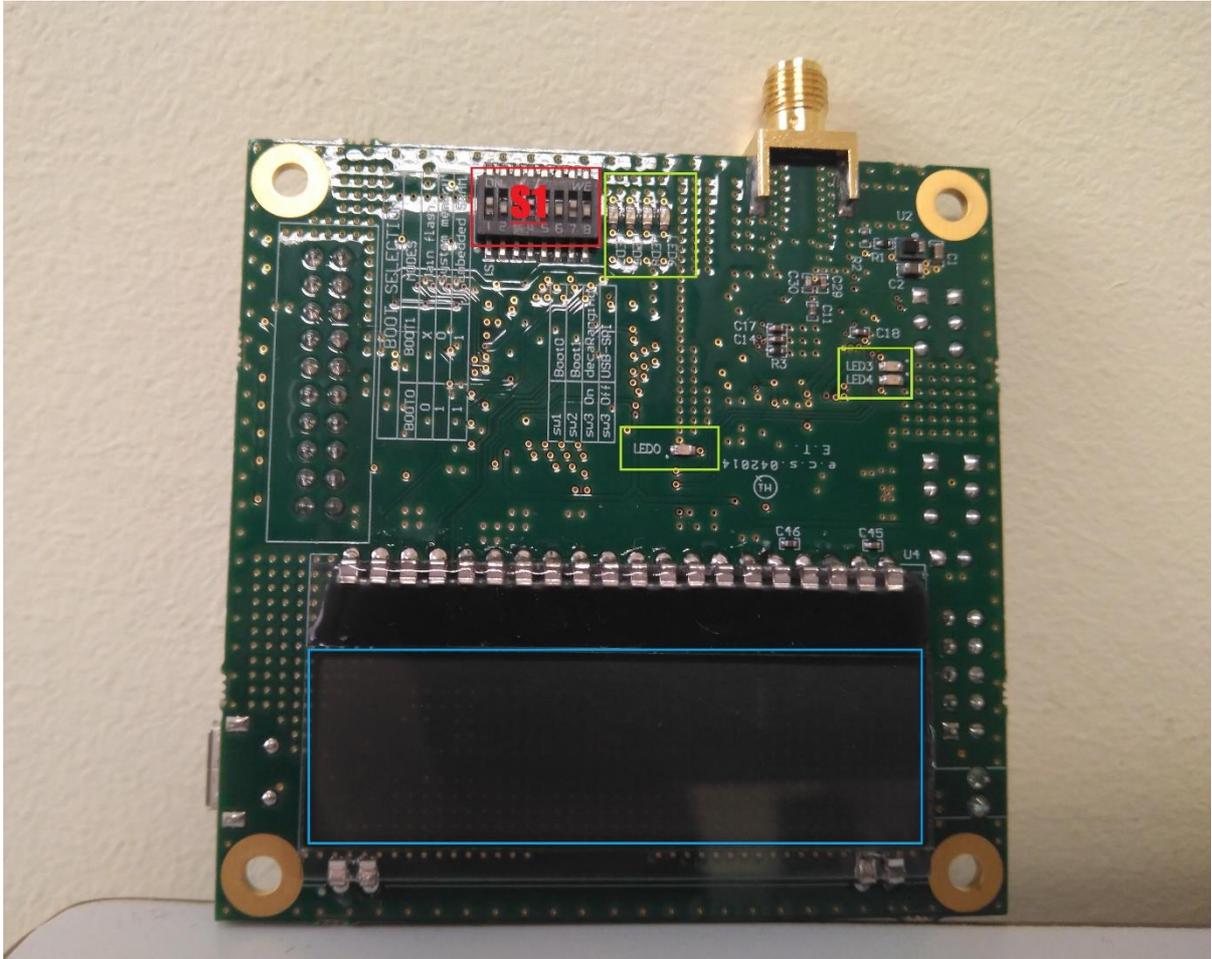


Ilustración 5-2: Parte frontal de la placa de evaluación EVB1000.

La parte posterior contiene el DW1000 IC, destacado en rojo, el ARM IC, en verde, el botón de reset, en azul, dos interruptores DIP (S2 y S3), en amarillo, el conector JTAG, en rosa, el conector Micro USB, en violeta, además de la conexión externa SPI, en naranja, y varios conectores y *jumpers* para configurar el modo de operación [14, 23].

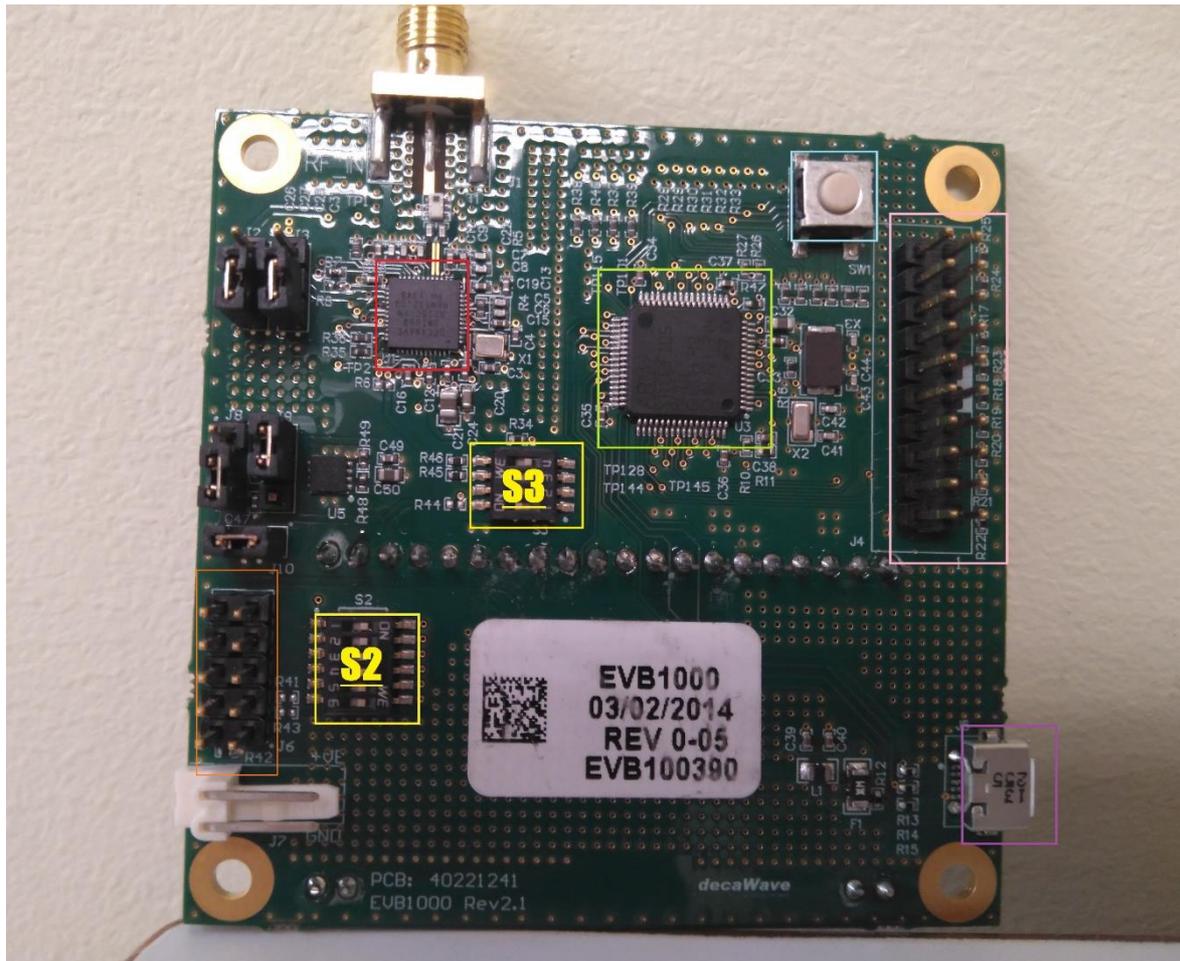


Figura 5-3: Parte posterior de la placa de evaluación EVB1000.

Estos dispositivos poseen las siguientes características [14, 23]:

- Cumplen IEEE 802.15.4-2011 UWB y las máscaras definidas por FCC y ETSI.
- Soportan seis bandas de radiofrecuencia, de 3.5 GHz a 6.5 GHz.
- Alcanzan una precisión en interior de unos 10 centímetros con línea de visión directa.
- Permiten altas tasas de datos, de hasta 6.8 Mbps.
- Presentan una alta inmunidad frente a desvanecimiento de multitrayecto.
- Presentan un bajo consumo de energía, dependiendo del modo.
- Incluyen aplicación de *two-way ranging*.

5.2 Estimación de la distancia

Las distancias que se introducen en el algoritmo para estimar la posición son las obtenidas por el kit de DecaWave [23].

El paquete EKV1000 consta de dos placas EVB1000, como se ha indicado anteriormente, y cada una de ellas está preconfigurada para ejecutar una aplicación llamada “DecaRanging” que implementa el cálculo de distancia por el método *two-way ranging*, cuyo funcionamiento se explicará más adelante.

Por tanto, el método 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 alimentar las placas.

Las medidas tomadas para la parte práctica se han realizado tan solo aportando energía a las placas, pero el producto ofrece muchas más posibilidades. El kit da la posibilidad de, instalando el software correspondiente en el equipo, mostrar mucha más información de la comunicación conectando las placas al puerto USB de un ordenador. De esta forma, el kit junto con el software se puede utilizar también para evaluar las siguientes características [23, 4]:

- 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 al multitrajecto.
- Opciones de la antena.

En este apartado se expondrá cómo se emparejan los dispositivos y cómo se obtiene la distancia estimada.

5.2.1 Proceso de emparejamiento

Para implementar el algoritmo de estimación de la posición, antes se han debido tomar las pertinentes medidas con el kit EVB1000 [23]. Este producto estima la distancia que separa al ancla del objetivo mediante un intercambio de mensajes. Para ello, debe haber una sincronización entre los dispositivos. El dispositivo cuya posición queremos averiguar lo denotaremos como target (objetivo), mientras que la placa de la que conocemos la posición y con la que queremos calcular la distancia al target, la denotaremos como ancla.

Para determinar qué placa es el ancla y qué placa es el target se configura el selector 4 de los interruptores 1, manteniéndolo en *off* para el target y en *on* para el ancla, tal y como se muestra en la Figura 5-4 y la Figura 5-5 [4].

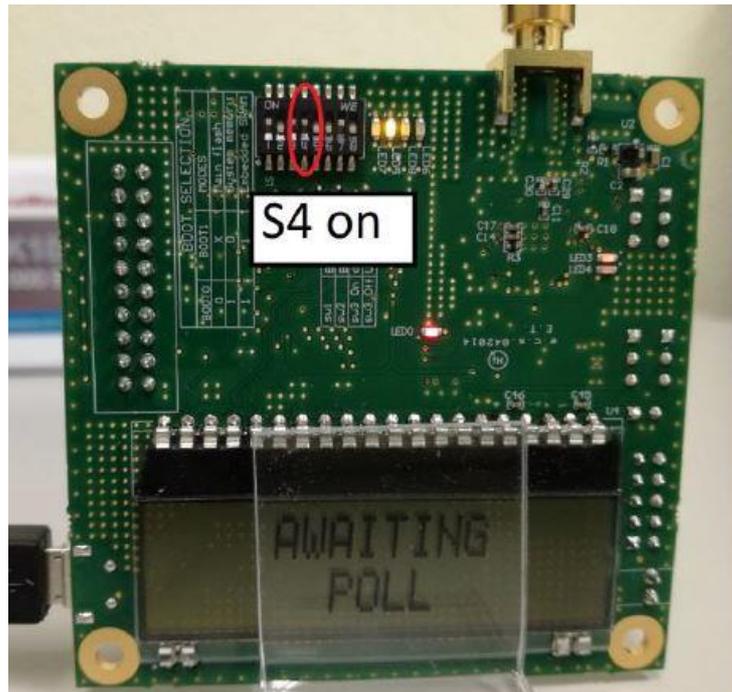


Figura 5-4: Placa con S4 a on [20].

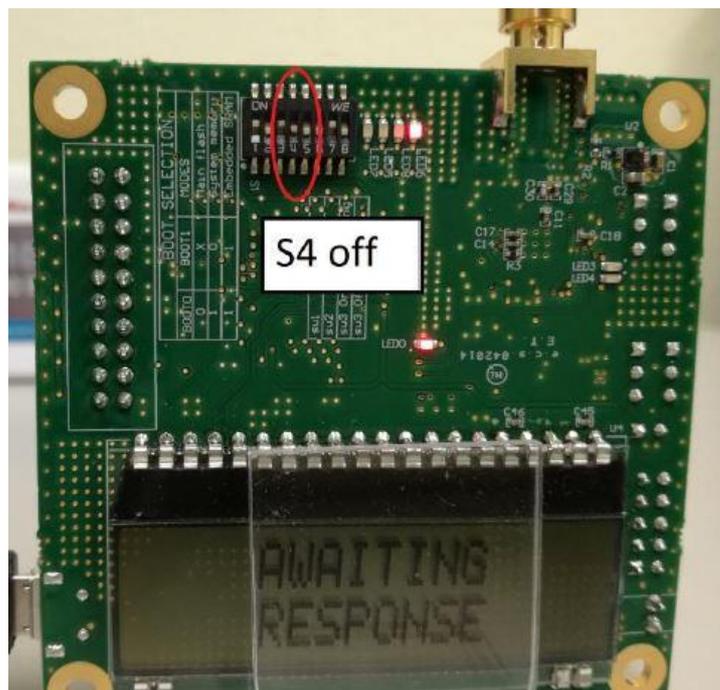


Figura 5-5: Placa con S4 a off [20].

Además, tal y como se puede también observar en las figuras anteriores, el LED 5 se ilumina cuando la placa está en modo ancla, mientras que para el modo target es el LED 6 el que se enciende.

Asimismo, el interruptor 1 del S1 debe estar en on y los interruptores 2 y 3 en off para que esté activado en proceso de “DecaRanging”.

El dispositivo posee diferentes modos de operación según los valores de los interruptores 5, 6 y 7 del selector 1. Para la toma de pruebas se ha implementado el modo 5, con una tasa de datos de 110 kbps y una frecuencia de repetición de pulsos (*Pulse Repetition Frequency*, PRF) de 16 MHz, donde los interruptores toman los valores off, off y on respectivamente. En la Tabla 5-1 se indican los diferentes modos de operación y sus características [4].

Tabla 5-1: Modos de trabajo del EVK1000 y sus características [14]

S1-5	S1-6	S1-7	Modo	Canal	Tasa de datos (kbps)	PRF (MHz)	Preámbulo
Off	Off	Off	1	2	110	16	1024
On	Off	Off	2	2	6.8	16	128
Off	On	Off	3	2	110	64	1024
On	On	Off	4	2	6.8	64	128
Off	Off	On	5	5	110	16	1024
On	Off	On	6	5	6.8	16	128
Off	On	On	7	5	110	64	1024
On	On	On	8	5	6.8	64	128

Al suministrar energía a las placas, estas lo primero que hacen es intentar asociarse. De este modo, al comienzo, el target está enviando mensajes *blink* (parpadeo) cada segundo, mostrando en su pantalla LCD el mensaje *AWAITING RESPONSE* mientras espera respuesta, como se indica en la Figura 5-5 [14].

Por otro lado, el ancla, desde que se activa, se mantiene en estado de escucha esperando a recibir un mensaje *blink*. Hasta que recibe la señal del target, en su pantalla LCD se muestra el mensaje *AWAITING POLL*, como se observa en la Figura 5-4 [4].

Una vez que el ancla recibe la señal *blink* y se vincula con el target, envía un mensaje de inicio de *ranging* para asociarse y finalizar el proceso de emparejamiento.

Este intercambio de mensajes se ilustra en la Figura 5-6.

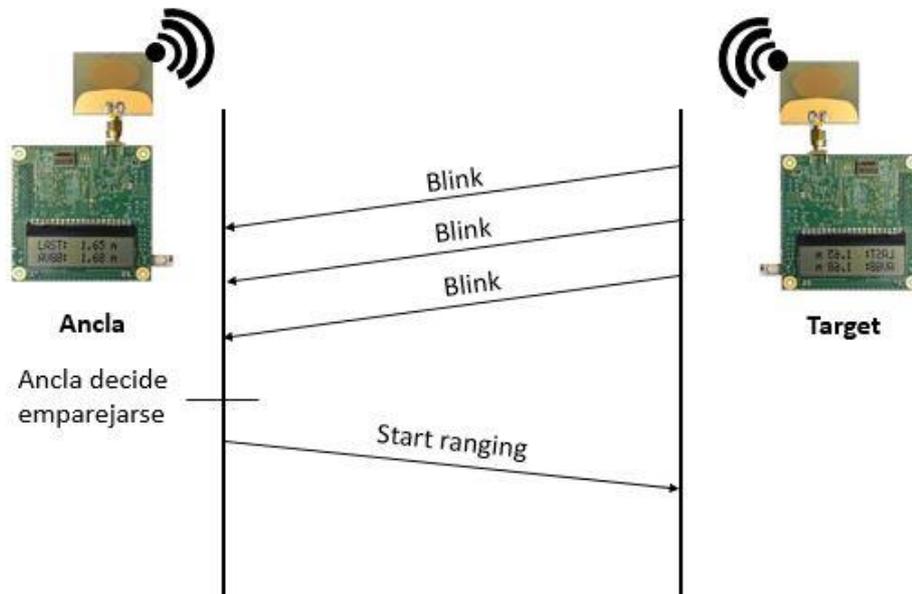


Figura 5-6: Intercambio de mensajes de asociación entre ancla y objetivo.

Las ráfagas de mensajes *blink* son muy rápidas, por lo que el número de mensajes necesarios para que el ancla decida emparejarse es indeterminado y depende de la situación de interior [4].

5.2.2 Intercambio de datos

Una vez que ambos dispositivos se han emparejado y el mensaje de *ranging* ha llegado al objetivo, comienza el intercambio de señales para estimar la posición.

Para medir la distancia son necesarios tan solo tres mensajes. El target inicializa la comunicación enviando un mensaje *poll* al ancla en un tiempo TSP (*Time of Sending Poll*) o tiempo que se tarda en enviar el mensaje *poll*. Posteriormente, el ancla guarda el tiempo TRP (*Time of Receiving Poll*) o tiempo en el que se ha recibido el mensaje *poll* y responde en el tiempo TSR (*Time Sending Response*) o tiempo en el que se ha enviado la respuesta. En cuanto el target recibe el mensaje, guarda el valor TRR (*Time of Receiving Response*) o tiempo en el que se ha recibido la respuesta, y compone el mensaje final con el valor de los tiempos TSP, TRR y TSF [4].

Una vez el ancla recibe la señal final con los valores recibidos en el mensaje junto al TRF (*Time of Receiving Final message*) y los valores anteriores en el ancla, calcula el valor del tiempo de vuelo, tal y como se indica en la Ecuación 5-1.

$$\text{distancia} = \text{ToF} \cdot c \quad (5-1)$$

Donde c es la velocidad de la luz.

$$\text{ToF} = \frac{[(\text{TRR}-\text{TSP})-(\text{TSR}-\text{TRP})+(\text{TRF}-\text{TSR})-(\text{TSF}-\text{TRR})]}{4} \quad (5-2)$$

Para finalizar, el ancla reenvía el mensaje al target para que este pueda también indicar en su LCD el valor de la distancia. En la Figura 5-7 se muestra este proceso de intercambio de mensajes entre ancla y target.

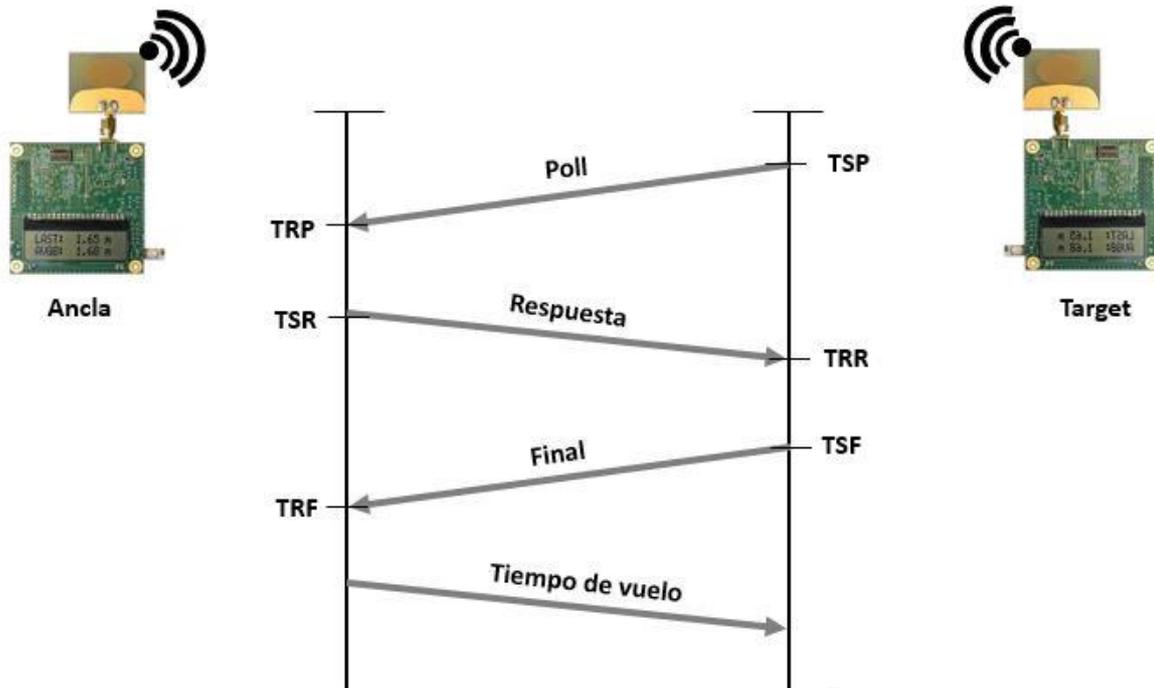


Figura 5-7: Diagrama de mensajes del two-way ranging.

Al final del proceso, se reflejarán en ambos LCDs los valores actuales de distancia estimada, a la vez que una media de las últimas ocho tomas, tal y como se muestra en la Figura 5-8. Asimismo, en la figura podemos observar la metodología de toma de medidas que se puso en práctica.

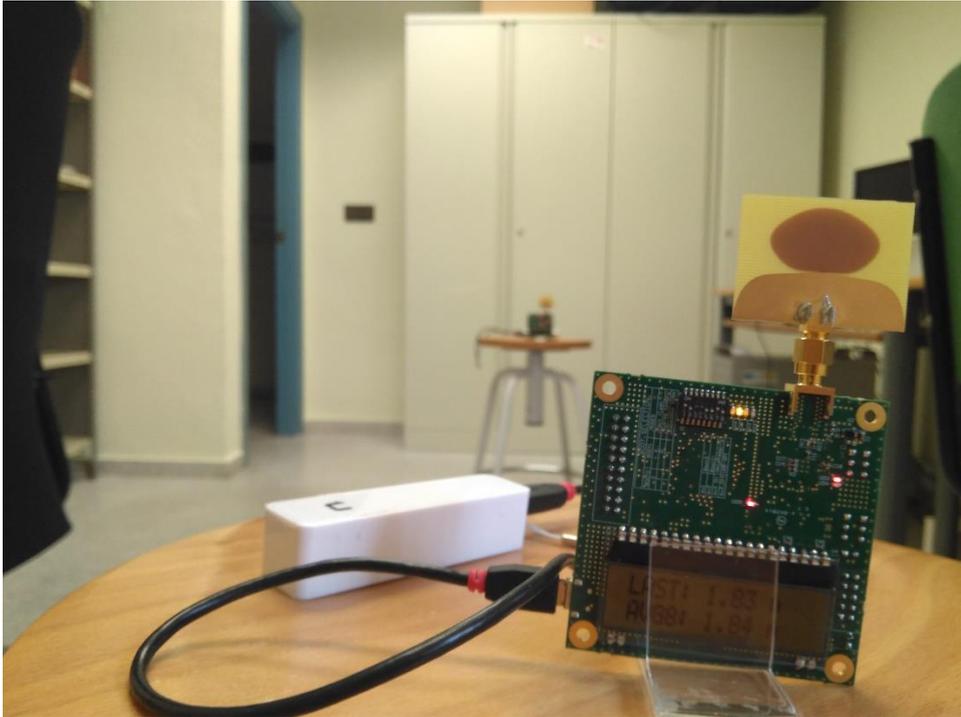


Figura 5-8: Método de toma de medidas con el EVK1000 Evaluation Kit [4].

6 ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN EMPLEADOS

En el desarrollo del proyecto se han aplicado diferentes técnicas analíticas para la estimación de la posición. En el presente capítulo se describen estos procesos y algoritmos, tanto los existentes como las alternativas propuestas.

6.1 Métodos existentes

A continuación, se muestran los diferentes métodos existentes usados en el desarrollo práctico del proyecto y el camino recorrido hasta llegar a ellos, siendo estos el algoritmo single-hop de multilateración, el método Bounding-Box, las diferentes técnicas de mínimos cuadrados, y el algoritmo que hace de suelo de los valores RMSE: NLS con conocimiento de condición de visión (NLS-CCV).

Para ello, se ha denominado la posición vectorial del ancla i como $\mathbf{a}_i = (x_i, y_i)$, la distancia estimada por el ancla i como \hat{d}_i , la posición estimada por los diferentes métodos como $\hat{\mathbf{z}} = (\hat{x}, \hat{y})$, donde M corresponde con el número total de puntos bajo estudio, N el número total de anclas y r el ancla de referencia.

6.1.1 Algoritmo single-hop de multilateración

Este algoritmo está definido con mayor detalle en el apartado 4.1 *Algoritmo single-hop de multilateración*.

En la presencia de una estimación ideal de distancia, el i -ésimo nodo define una circunferencia centrada en $z_i = (x_i, y_i)$ con radio d_i , como se observa en la Figura 6-1. La intersección de las circunferencias generadas por las anclas corresponde con la posición del punto objetivo. En un plano bidimensional, al menos tres anclas son necesarias para poder determinar las coordenadas estimadas. Matemáticamente, la posición estimada puede ser obtenida a través del siguiente sistema no lineal de ecuaciones:

$$\begin{aligned} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 &= d_1^2 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ (x_N - x)^2 + (y_N - y)^2 &= d_N^2 \end{aligned} \tag{6-1}$$

Este sistema puede ser linealizado substrayendo la última ecuación de las primeras $N-1$ ecuaciones, cuya representación matricial es la siguiente:

$$A \cdot p = b \quad (6-2)$$

Gráficamente, el algoritmo realiza un cálculo como el de la Figura 4-1, donde busca la intersección de las circunferencias generadas por las anclas.

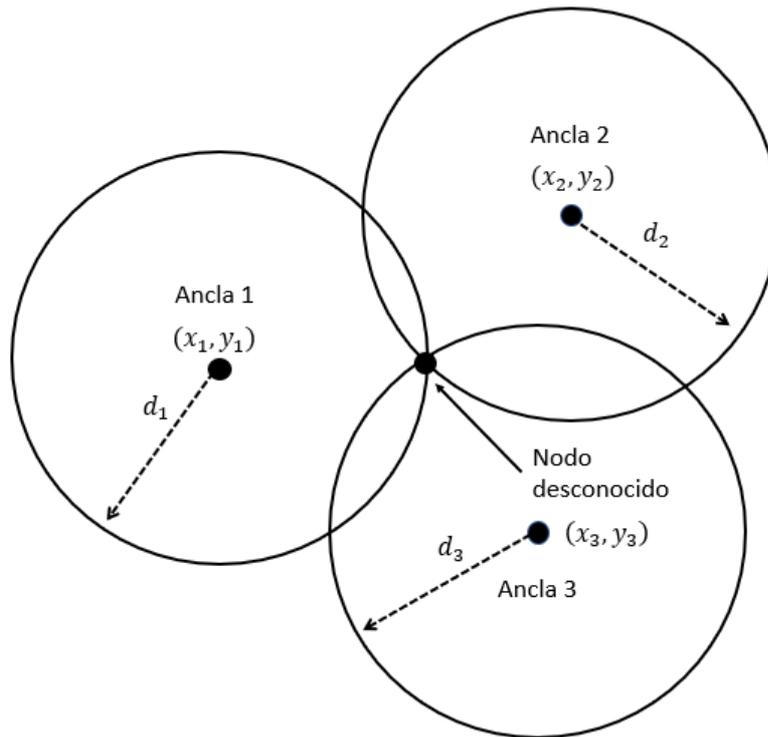


Figura 6-6-1: Ejemplo de multilateración de tres nodos.

En un escenario real los círculos pueden no intersectar en un punto común. Por ello, cuando se encuentran escenarios en los que $N > 3$, el sistema de ecuaciones es sobredefinido y puede ser resuelto por una aproximación no lineal de mínimos cuadrados (Least-Square, LS) [4].

6.1.2 Método Bounding Box

Es un método de localización simple, presentado como parte de un algoritmo N-hop de multilateración, creado por S. Park, A. Savvides y M. B. Srivastava en 2002, conocido como Min-Max. La idea base es construir una *bounding box*, o caja delimitadora, que comience en cada una de las posiciones conocidas, es decir, las posiciones de las anclas a_i , y cuyos lados midan el doble de la medida de distancia estimada (\hat{d}_i) con el sistema de comunicaciones. En concreto, se definen las esquinas del *bounding box* del nodo i como:

$$(x_i - \hat{d}_i, y_i - \hat{d}_i) \cdot (x_i + \hat{d}_i, y_i + \hat{d}_i) \quad (6-3)$$

Una vez generadas todas las cajas delimitadoras, una por ancla, la posición estimada es obtenida como el centro de la intersección de una caja delimitadora final computada como el máximo de todas las coordenadas más pequeñas, y el mínimo de las coordenadas mayores, eso es:

$$[\max_i(x_i - \hat{d}_i), \max_i(y_i - \hat{d}_i)] \cdot [\min_i(x_i + \hat{d}_i), \min_i(y_i + \hat{d}_i)] \quad (6-4)$$

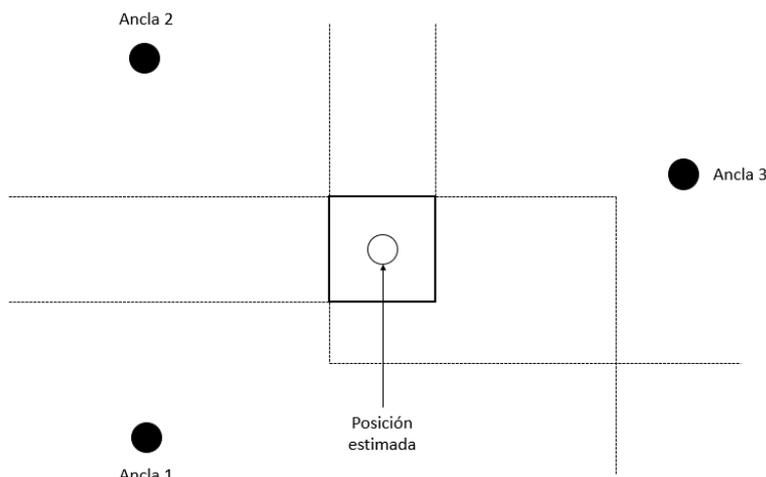


Figura 6-2: Ejemplo de *Bounding-Box*.

La posición final es el punto de intersección de las diagonales del cuadrado, y es computada como la media de la posición de los puntos de las esquinas. La ventaja de este método es que requiere muy baja complejidad de cálculos ya que únicamente realiza sumas, restas y comparaciones, por lo que la carga computacional es muy ligera. Además, responde de manera excelente ante medidas con error grande si hay suficientes medidas con un bajo error, siendo, por ello, un algoritmo bastante insensible al sesgo. Sin embargo, una clara desventaja de este método es que muestra comportamientos dispares si se introduce ruido en el rango de las mediciones [24].

Está demostrado que este método es insensible a errores de estimación NLOS, pero solo proporciona buenas estimaciones de posición en el área que engloba el perímetro que une las anclas (denominado el perímetro de ancla). Si la estimación se intenta hacer de un punto fuera de este perímetro, el método tiende a situarlo en el interior, lo que se define como el efecto perímetro. Cuánto más lejos se encuentre el punto a estimar del perímetro de ancla, peor es la estimación.

6.1.3 Técnicas de mínimos cuadrados

En esta sección, se revisarán y discutirán brevemente algunas de las técnicas de estimación de posición mediante algoritmos de mínimos cuadrados.

6.1.3.1 Solución no lineal de mínimos cuadrados (NLS)

La solución no lineal de mínimos cuadrados (NLS) es una técnica muy reconocida para la estimación de un parámetro desconocido cuya distribución de probabilidad es también desconocida. Es igualmente muy utilizada para la estimación de distancia en algoritmos de localización.

Su función está dada por la siguiente ecuación:

$$\hat{\mathbf{z}} = \arg \min_{\mathbf{z}} \{R_{es}(\mathbf{z})\} = \arg \min_{\mathbf{z}} \left\{ \sum_{i=1}^N (\hat{d}_i - \|\mathbf{z} - \mathbf{a}_i\|)^2 \right\} \quad (6-5)$$

Donde $R_{es}(\mathbf{z})$ es el error residual respecto a la localización $\mathbf{z} = (x, y)$ del objeto a estimar.

Minimizar una expresión no lineal requiere una búsqueda de métodos numéricos como el algoritmo de descenso más pronunciado (*steepest descent algorithm*) o técnicas de Gauss-Newton, que pueden llegar a ser muy costosas computacionalmente y requieren una formación sólida para evitar converger a un extremo de la función de pérdida. La implementación de este proceso se ha realizado a través de la comparación de los errores residuales obtenidos de las diferentes posiciones definidas en un grid, y la posterior computación del valor mínimo.

6.1.3.2 Solución lineal de mínimos cuadrados alternativa (LLS)

La solución de mínimos cuadrados lineal parte de la Ecuación 6-5 del apartado previo, donde, tras cierta manipulación, se representan las ecuaciones de partida – sistema de circunferencias definidas en 6.1.1 *Algoritmo single-hop de multilateración* – de la solución en formato matricial, obteniéndose:

$$A_1 \theta = \frac{1}{2} p_1, \quad (6-6)$$

donde

$$A_1 = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & -0.5 \\ x_2 & y_2 & -0.5 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & -0.5 \end{bmatrix}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ s \end{bmatrix}, p_1 = \begin{bmatrix} k_1 - \hat{d}_1^2 \\ k - \hat{d}_2^2 \\ \vdots \\ k_N - \hat{d}_N^2 \end{bmatrix} \quad (6-7)$$

Siendo $s = x^2 + y^2$ parte del vector de incógnitas. Por tanto, se tiene una función cuadrática que se podría resolver, pero, debido a la inconsistencia de las ecuaciones, sería impreciso.

Este modelo no lineal contiene el parámetro s , que tiene relación cuadrática con x e y . Para obtener un modelo lineal (LLS), se propone una técnica alternativa para cancelar esos términos no lineales. Esta se fundamenta en sustraer la r -ésima ancla del resto de expresiones, quedando el modelo como:

$$A_3 \mathbf{z} = \frac{1}{2} p_3, \quad (6-8)$$

con

$$A_3 = \begin{bmatrix} x_1 - x_r & y_1 - y_r \\ x_2 - x_r & y_2 - y_r \\ \vdots & \vdots \\ x_N - x_r & y_N - y_r \end{bmatrix}, p_3 = \begin{bmatrix} \hat{d}_r^2 - \hat{d}_1^2 - k_{r,1} \\ \hat{d}_r^2 - \hat{d}_2^2 - k_{r,2} \\ \vdots \\ \hat{d}_r^2 - \hat{d}_N^2 - k_{r,N} \end{bmatrix} \quad (6-9)$$

Donde $k_{r,i} = k_r - k_i$ y r es el ancla de referencia que es usado para obtener el modelo lineal. Por tanto, la solución LS puede ser escrita como:

$$\mathbf{z} = \frac{1}{2} (A_3^T A_3)^{-1} A_3^T \mathbf{p}_3 \quad (6-10)$$

Mientras que en el modelo no lineal se definía un círculo con los términos x^2 e y^2 , en el lineal se representaría como rectas, tal y como se muestra en la Figura 6-3.

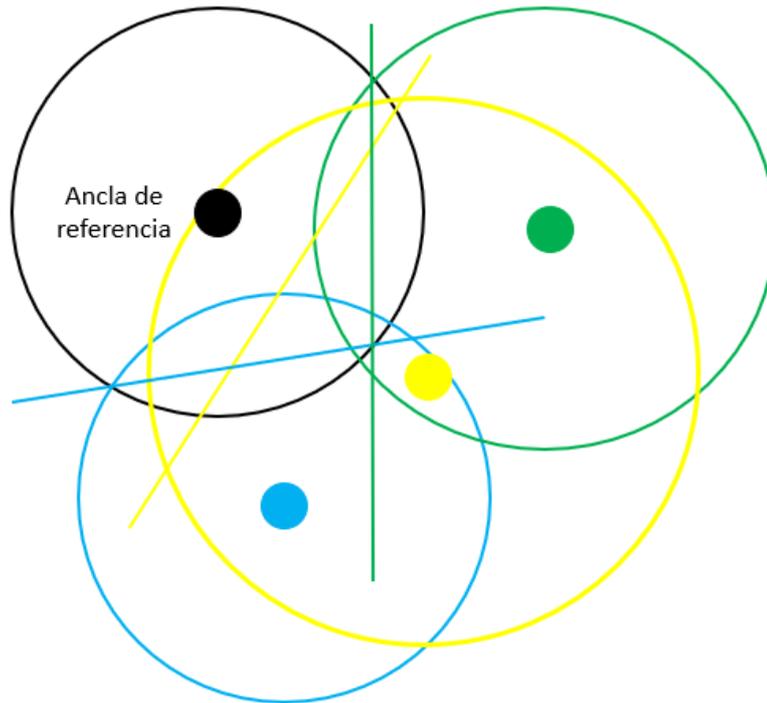


Figura 6-3: Representación con círculos y líneas del modelo no lineal y lineal, respectivamente.

Estos estimadores sufren de altos errores para las medidas de tipos NLOS, ya que tratan todos los elementos de forma equitativa, por lo que las medidas con grandes errores de estimación tienen el mismo peso que las LOS, degradándose significativamente las prestaciones de los estimadores NLS y LLS. Por tanto, se van a proponer una serie de mejoras en los estimadores lineales para suprimir los errores NLOS. Para ello, un posible método es asignar pesos diferentes según la medida, pero esto requiere información adicional para construir el vector de pesos. Por tanto, el problema de los métodos de asignación de pesos es cómo ponderar estos para obtener una respuesta eficiente ante los errores NLOS.

El proceso de selección del ancla de referencia se ha optimizado eligiendo aquella con menor distancia estimada, ya que el ancla de referencia afecta directamente a los términos de ruido del resto de medidas. Cuanto más alejada esté el ancla de referencia, más ruidosa será la aportación a las matrices del cálculo de la estimación LLS. Por tanto, la selección del ancla de referencia afectará directamente a los valores del error cuadrático medio [25].

6.1.3.3 Mínimos cuadrados ponderados

Este método se basa en la Ecuación 6-5, pero multiplicando cada valor cuadrático de diferencia de distancia entre estimada y real por β_i .

$$\hat{\mathbf{z}} = \arg \min_{\mathbf{z}} \{R_{es}(\mathbf{z})\} = \arg \min_{\mathbf{z}} \left\{ \sum_{i=1}^N \beta_i (\hat{d}_i - \|\mathbf{z} - \mathbf{a}_i\|)^2 \right\} \quad (6-11)$$

Los pesos β_i son usados, por tanto, para ponderar los errores, virando así hacia un método de mínimos cuadrados ponderados (*Weighted Least Squares*, WLS). Si la información suficiente como para usar estos pesos no existiera, se aplicaría el valor de $\beta_i = 1$ para todo i .

Como se ha mencionado previamente, los errores NLOS incurren en grandes errores para estimadores LLS y NLS. A continuación, se presentan diferentes soluciones basadas en pesos para mitigar estos. Estas variantes propuestas no se usan en el presente proyecto, pero son de interés para entender el camino recorrido hasta llegar a la versión de pesos ponderados conocida como B-WLS.

A) Método de estimación lineal en función de pesos óptimos (O-WLS):

Se introduce el término de vector de error de estimación, pero es muy complicado de obtener, por lo que se proponen otras soluciones.

B) Método de estimación lineal por pesos en función de la varianza (V-WLS):

Se introduce el término de matriz diagonal formada por las varianzas de las estimaciones de distancia. Sin embargo, aunque se conociese la varianza de las estimaciones de distancia, el método es poco práctico para errores NLOS.

C) Método de estimación lineal por identificación de pesos (I-WLS):

Un método prometedor para suprimir los errores NLOS es pesar o eliminar las estimaciones NLOS. Un ejemplo son los métodos LTS (*Least Trimmed Squares*) y LMS (*Least Median Squares*). Sin embargo, se estaría perdiendo cierta información al descartar estimaciones.

D) Método de estimación lineal de pesos residuales (R-WLS):

Parte del planteamiento del LMS y va un paso más allá, pero es menos eficiente para los casos NLOS.

Una vez analizados brevemente los métodos anteriores, se llega al planteamiento del método B-WLS, que toma una primera estimación de distancia haciendo uso del algoritmo *Bounding-Box*, para determinar el peso que asignar a las diferentes medidas.

6.1.3.4 Método de estimación lineal por pesos determinados por Bounding-Box (B-WLS)

Este método, propuesto por Yuan Yang, Yubin Zhao y Marcel Kyas en su publicación *Weighted Least-squares by Bounding-box (B-WLS) for NLOS Mitigation of Indoor Localization*, en el año 2013 [26], surge como alternativa a los anteriores, basándose en los siguientes hechos:

1. La varianza, la suma residual u otras variables de peso pueden no ser un buen indicador de los errores NLOS.
2. Hay cierta información que se pierde si se descartan posibles medidas NLOS, sobre todo si el número de anclas disponibles es bajo.

3. Las soluciones lineales con una gran combinación de medidas estimadas pueden incurrir en un aumento desproporcionado de la carga computacional.

Por tanto, se propone usar los resultados de posiciones estimadas por un método robusto ante errores NLOS para indicar el peso de las medidas obtenidas, en este estudio, el método *Bounding-Box*.

La expresión del modelo es:

$$\hat{\mathbf{z}}_{B-WLS} = \frac{1}{2} (A_3^T W A_3)^{-1} A_3^T W \mathbf{p}_3 \quad (6-12)$$

Se determinan los pesos de la matriz de covarianza como: $W = C^{-1}$, con:

$$C = 4\hat{d}_r^2 \sigma_r^2 + 2\sigma_r^4 + \text{diag} \left\{ 4\sigma_1^2 \hat{d}_1^2 + 2\sigma_1^4, \dots, 4\sigma_i^2 \hat{d}_i^2 + 2\sigma_i^4, \dots, 4\sigma_N^2 \hat{d}_N^2 + 2\sigma_N^4 \right\}, \quad (6-13)$$

con $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, $i \neq r$, y donde σ_i es la incertidumbre de la estimación i -ésima representada por la diferencia entre la medida de distancia (\hat{d}_i) y la distancia estimada por el método *Bounding-Box* ($d_{\text{Bounding-Box}-a}$).

$$\sigma_i = \hat{d}_i - d_{\text{Bounding-Box}-a_i} \quad (6-14)$$

Siendo $d_{\text{Bounding-Box}-a_i}$ la distancia entre la posición estimada por el método *Bounding-Box* y cada ancla.

$$d_{\text{Bounding-Box}-a_i} = \|\hat{\mathbf{z}}_{\text{Bounding-Box}-a_i} - \mathbf{a}_i\| \quad (6-15)$$

El efecto perímetro del algoritmo *Bounding-Box* (6.1.2 Método *Bounding Box*) puede ser ignorado si solo se usa este método para la determinación de los pesos: si la posición a estimar está situada muy lejos del perímetro de ancla, entonces $d_{\text{Bounding-Box}-a_i}$ es más pequeña que la medida entre el punto \mathbf{z} y las anclas, por lo que σ_i es un valor muy grande. Al ser ponderado σ_i a la inversa, haría que el método B-WLS sufra mínimamente el efecto perímetro [26].

Además, de la Ecuación 6-14, se observa como para medidas NLOS que presenten un gran error, el valor de σ_i también será elevado y, por ende, el peso que aplicaría representaría un valor pequeño.

Cabe resaltar que el método B-WLS que se ha empleado en la parte práctica es una versión mejorada del mismo, siguiendo la propuesta de Ismail Güvenç en [25], donde se calcula el ancla de referencia como aquella cuya distancia al punto bajo estudio es la menor, consiguiendo así obtener los valores mínimos de ruido. De esta forma, el ancla de referencia r se determina como:

$$r = \arg \min_i \{\hat{d}_i\}, \text{ con } i = 1, 2, \dots, N \quad (6-16)$$

6.1.3.5 Método NLS-CCV

El método NLS con conocimiento de condición de visión parte de las bases teóricas del NLS. Se ha observado que las medidas NLOS-DDP son aceptables para la posterior estimación de la posición [4, 27], pero no las NLOS-UDP. Por tanto, la distinción se va a realizar entre medidas DDP – englobando LOS y NLOS-DDP – y NLOS-UDP, asignando un peso distinto a cada tipo.

De esta forma, la ecuación de este método se construye como:

$$\hat{\mathbf{z}} = \arg \min_{\mathbf{z}} \{R_{es}(\mathbf{z})\} = \arg \min_{\mathbf{z}} \left\{ \sum_{i=1}^N \theta_i (\hat{d}_i - \|\mathbf{z} - \mathbf{a}_i\|)^2 \right\}, \quad (6-17)$$

donde a θ_i se le asigna el valor unidad para aquellas medidas cuya condición de visión sea DDP, mientras que θ_i equivale a 0.005 para todas las medidas UWB cuya condición de visión sea UDP. Esta última asignación de valor no es cero ya que las medidas UDP, aunque contengan grandes errores, siempre aportan cierta información de valor. De hecho, si se hace $\theta_i = 0 \forall i \in UDP$, los errores finales obtenidos suelen ser mayores a los que se alcanzan dándole un valor residual a esos pesos.

La respuesta del NLS-CCV debe ser siempre mejor que la del resto, aunque también se debe tener en cuenta que, cuando el número de anclas con condición de visión UDP es muy alta, los errores pueden aumentar bruscamente, ya que se dispondrían de muy pocas medidas con pesos relevantes para determinar las coordenadas.

6.2 Métodos propuestos

En el presente apartado se describen los diferentes métodos alternativos propuestos.

6.2.1 Métodos fundamentados en NLS

Con el fin de mejorar los procesos existentes, se ha propuesto una modificación sobre el método NLS básico, basado en seguir la filosofía del B-WLS pero tomando como método troncal el NLS, por lo que se denominará como BB-NLS. Esta variante consiste en usar la Ecuación 6-14, pero para generar los $\beta_i = \frac{1}{\sigma_i}$, buscando la proporcionalidad definida por que el peso tenga el menor valor cuanto mayor sea σ_i .

Otra variante propuesta consiste en hacer una corrección sobre los valores de σ_i , diagnosticar cuáles provienen de condiciones de visión DDP y dar posteriormente un valor igual a todas, para después aplicarlo a BB-NLS, por lo que se le denominará como BB-NLS corregido, o BB-NLS-C.

El método propuesto BB-NLS-C, aunque basándose en NLS, se incluirá en el próximo apartado 6.2.2 *Métodos que tratan por igual a las medidas DDP*.

6.2.1.1 Método BB-NLS

Siguiendo la definición que se presentó en el apartado previo, con $\hat{\mathbf{z}}$ la posición estimada final, \hat{d}_i las medidas de distancia, y donde σ_i es la incertidumbre de la estimación i -ésima representada por la diferencia entre la medida UWB (\hat{d}_i) y la distancia estimada por el método *Bounding-Box* ($d_{\text{Bounding-Box}-a}$). De este modo, BB-NLS estaría definido como:

$$\hat{\mathbf{z}} = \arg \min_{\mathbf{z}} \{R_{es}(\mathbf{z})\} = \arg \min_{\mathbf{z}} \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i} (\hat{d}_i - \|\mathbf{z} - \mathbf{a}_i\|)^2 \right\}, \quad (6-18)$$

con:

$$\sigma_i = \hat{d}_i - d_{\text{Bounding-Box}-a_i} \quad (6-19)$$

De esta forma, se ponderará cada medida estimada con el valor inverso de la diferencia obtenida entre la distancia estimada mediante medidas UWB y la calculada por el método *Bounding-Box*. El resultado que presente este método alternativo propuesto será más certero cuanto más precisa sea la estimación *Bounding-Box* en términos de distinción de medidas UDP.

6.2.2 Métodos que tratan por igual a las medidas DDP

La ponderación de los pesos que se otorgan a las medidas UWB es, sin duda alguna, tarea fundamental para obtener unos mejores resultados en estimación de posición. El objeto de este capítulo es mostrar los métodos alternativos que otorguen un mismo peso a todas las medidas UWB identificadas como DDP.

Con este fin, se proponen dos variantes. La primera de ellas, consiste en hacer una corrección sobre los valores de σ_i , diagnosticar cuáles provienen de condiciones de visión DDP y dar posteriormente un valor igual a todas, para después aplicarlo a BB-NLS. Esta propuesta se denominará como BB-NLS corregido, o BB-NLS-C.

6.2.2.1 BB-NLS-C

Este algoritmo alternativo va un paso más allá del BB-NLS y, partiendo de los σ_i calculados, determina el valor de los β_i , para obtener la siguiente ecuación, nuevamente basada en la del NLS básico:

$$\hat{\mathbf{z}} = \arg \min_{\mathbf{z}} \{R_{es}(\mathbf{z})\} = \arg \min_{\mathbf{z}} \left\{ \sum_{i=1}^N \beta_i (\hat{d}_i - \|\mathbf{z} - \mathbf{a}_i\|)^2 \right\}, \quad (6-20)$$

donde para el cómputo de los valores β_i se han propuesto diferentes alternativas. La clave para que este método planteado mejore las prestaciones ofrecidas por el B-WLS o BB-NLS, es que logre diferenciar de manera precisa los valores procedentes de condiciones de visión DDP, para después otorgarles un peso de forma homogénea. Sin embargo, es una tarea ardua ponderar adecuadamente la calidad de las medidas UWB obtenidas.

Estos experimentos ayudarán a determinar si es ventajoso o no tratar de forma homogénea a todas las medidas que se consideren con una calidad suficientemente buena.

6.2.2.2 B-WLS-C

Este método alternativo se basa en los mismos fundamentos presentados en el apartado anterior, pero aplicados al algoritmo B-WLS. Es decir, se van a modificar los pesos introducidos en la matriz de covarianza, con un valor homogéneo determinado, según el término σ_i .

6.2.3 Métodos que añaden una iteración más sobre B-WLS

El fin de este apartado es estudiar el comportamiento de algoritmos alternativos que se basen en las estimaciones de posición presentadas por B-WLS, e iterando una vez más, obtenga unos nuevos valores de estas. Partiendo de este concepto, se proponen dos nuevos métodos.

El primero de ellos, se basa en 6.2.1.1 *Método BB-NLS*, únicamente diferenciándose en los valores σ_i , que se calcularán con las distancias estimadas por B-WLS en vez de la provenientes del método *Bounding-Box*, y se denominará como BB-NLS reiterativo, o BB-NLS-R. El segundo método propuesto

se basa en 6.1.3.4 *Método de estimación lineal por pesos determinados por Bounding-Box (B-WLS)*, pero usando nuevamente la distancia calculada por un previo B-WLS en la Ecuación 6-14, en vez de la distancia presentada por el método *Bounding-Box*. A este nuevo algoritmo se le bautizará como B-WLS reiterativo, o B-WLS-R.

6.2.3.1 Método BB-NLS-R

El cambio sustancial del BB-NLS-R surge a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_i = \hat{d}_i - d_{B-WLS-a_i} \quad (6-21)$$

Donde $d_{B-WLS-a_i}$ hace referencia a la medida de localización estimada por una previa aplicación del algoritmo B-WLS. Este nuevo valor de σ_i se aplica a la Ecuación 6-11, con $\beta_i = \frac{1}{\sigma_i}$.

6.2.3.2 Método B-WLS-R

La construcción de este método se realiza haciendo uso de las ecuaciones de B-WLS (Ecuación 6-12), pero empleando la Ecuación 6-21 en vez de la Ecuación 6-14 para la construcción de los pesos. De esta forma, se estaría proponiendo el planteamiento matricial de B-WLS, pero estimando los pesos a partir de las distancias obtenidas por el paso por un B-WLS previo.

7 EVALUACIÓN DE LOS ALGORITMOS

Tell me and I will forget; show me and I may remember; involve me and I will understand.

Dímelo y lo olvidaré; muéstramelo y lo recordaré; involúcrame y lo aprenderé.

- Confucio -

Para estudiar la respuesta de los diferentes algoritmos presentados en el capítulo anterior, se ha generado un conjunto significativo de medidas simuladas mediante un método realista y otro con la base de datos de medidas reales tomada en el TFG, y se ha analizado el comportamiento de los métodos mediante el cálculo de los errores cuadráticos medios.

7.1 Modelado de errores de medidas de distancia

Con el fin de conseguir un banco de datos suficientemente variado y amplio para que los resultados obtenidos sean significativos, se genera un conjunto de medidas simuladas con el modelo realista (ya que está basado en medidas reales) que proponen Bardia Alavi y Kaveh Pahlavan en su publicación “*Modeling of the TOA-based Distance Measurement Error Using UWB Indoor Radio Measurements*” del año 2006 [27].

Se definen los errores que sufre una estimación de medida UWB en interiores como, primero, debido a la dispersión multicamino de la propia señal en condiciones de detección del camino directo (*detected direct path*, DDP), y, segundo, a los errores causados por caminos de señal directa no detectada (UDP). El comportamiento estadístico de este último error es también función del ancho de banda.

Los errores aleatorios pequeños son causados por señales que llegan al receptor en un tiempo cercano al del rayo directo. Por otro lado, los errores más grandes ocurren cuando el rayo directo se encuentra por debajo del umbral de detección, por lo que el primer trayecto detectado es erróneamente el de los trayectos multipath. Nos referimos a esta última situación como la del camino directo no detectado (*undetected direct path*, UDP).

7.1.1 Error de medida de distancia

Asumiendo que la distancia real entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) es d ; la distancia estimada es $\hat{d}_w = c\hat{\tau}_w$, donde c es la velocidad de la luz y $\hat{\tau}_w$ es la estimación del tiempo que tarda la señal en alcanzar el receptor a través del camino directo. La distancia real d es medida físicamente entre Tx y Rx, y la estimación \hat{d} es obtenida mediante el primer pico de la señal UWB recibida. Basándonos en lo anteriormente expuesto, se podría definir el error como:

$$\epsilon_W(d) = \hat{d}_W - d \quad (7-1)$$

Donde W hace referencia a la dependencia del error de la medida estimada con el ancho de banda.

Para el modelado de la distancia diferenciamos los errores pequeños provocados por el multipath (incertidumbre en la estimación del retardo exacto de un determinado trayecto), de los grandes provocados por medidas UDP. Nos referimos a los primeros como $\epsilon_{M,W}(d)$, a los que surgen de condiciones UDP como $\epsilon_{U,W}(d)$. Los errores multipath siempre existen, y los causados por condiciones UDP solo existen cuando se dan esas condiciones. Por tanto, modelamos la ocurrencia de las condiciones UDP con una variable aleatoria $\zeta_W(d)$ que toma el valor "1" cuando se dan condiciones UDP y "0" cuando no. Por tanto, el modelo planteado para $\epsilon_W(d)$ está dado por:

$$\epsilon_W(d) = \epsilon_{M,W}(d) + \zeta_W(d)\epsilon_{U,W}(d) \quad (7-2)$$

7.1.1.1 Modelado del error multipath

De forma natural, uno espera un aumento del error de medida de distancia con el aumento de la distancia entre el Tx y Rx. La observación de los resultados de medidas empíricas muestra que este crecimiento del error no se comporta de forma lineal. Por tanto, se introduce un término logarítmico para modelar el comportamiento no lineal. Se obtiene de los resultados de medida que el error se comporta como una distribución Gaussiana, quedando:

$$\epsilon_{M,W}(d) = \mathcal{G}(m_{M,W}, \sigma_{M,W}) \log(1 + d) \quad (7-3)$$

donde $\mathcal{G}(m_{M,W}, \sigma_{M,W})$ es una variable aleatoria gaussiana con media $m_{M,W}$ y varianza $\sigma_{M,W}^2$. Los valores de estos términos están definidos por los autores como resultado de su extenso conjunto de medidas reales para diferentes anchos de banda, donde, para el presente proyecto y tecnología, se estima tomar los valores $m_{M,W} = 0.09m$, $\sigma_{M,W}^2 = 13.6cm$, para $W = 1GHz$. Cabe destacar que, debido a su naturaleza, $\epsilon_{M,W}(d)$ puede ser tanto positivo como negativo, por lo que un modelo gaussiano con una media cercana a cero puede modelar este error.

7.1.1.2 Modelado del error UDP

Para modelar la medida de error de distancia UDP se necesita definir dos parámetros, $\xi_W(d)$ y $\epsilon_{U,W}(d)$. $\xi_W(d)$ es una variable aleatoria binaria con función densidad de probabilidad mostrada en la Ecuación 7-4, donde $P_{U,W}(d)$ es la probabilidad de ocurrencia de la condición UDP - que se observó en el entorno particular de experimentación de [27] - dado un ancho de banda concreto. Asimismo, esta variable es también función de la distancia. Basados en medidas de canales UWB y en la observación, se asume que la probabilidad de condiciones UDP en localizaciones cercanas al Tx y lejanas de este toman valores muy diferentes. Por tanto, se definen los 10 metros de distancia como el punto de referencia para diferenciar dos regiones con distinta probabilidad de ocurrencia de los errores UDP. De este modo, para medidas más pequeñas que el punto de referencia, $P_{U,W}(d)$ se modela como $P_{closeU,W}(d)$, y por encima de ese valor como $P_{farU,W}(d)$.

$$f_{\xi_W}(x) = (1 - P_{U,W}(d))\delta(x) + P_{U,W}(d)\delta(x - 1) \quad (7-4)$$

Para los términos que modelan $f_{\xi_W}(x)$ los autores también definieron unos valores según el ancho de banda, donde se ha tomado $P_{closeU,W}(d) = 0.064$ y $P_{farU,W}(d) = 0.620$, con $W = 1GHz$. A medida

que el receptor se aleja del transmisor, la potencia del rayo directo disminuye, aumentando la probabilidad de que se dé la condición de UDP. Para modelar este comportamiento, se realiza una definición similar a la del caso DDP, pero esta vez el error no puede ser negativo.

Por tanto, modelado de error UDP se puede expresar como:

$$\epsilon_{U,W}(d) = g(m_{U,W}, \sigma_{U,W}) \quad (7-5)$$

7.2 Error cuadrático medio

Para entender realmente el impacto de las medidas UDP, hay que dar un paso más de abstracción en el estudio, agrupando todas las medidas y datos anteriormente mostrados y presentando información concreta y detallada. Por ello, la mejor forma para comprender cuánto y cómo afectan en las medidas las anclas UDP, es analizando el RMSE resultante. La expresión usada es:

$$RMSE \approx \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \|\hat{\mathbf{z}}_i - \mathbf{z}_i\|} , \quad (7-6)$$

donde \mathbf{z}_i y $\hat{\mathbf{z}}_i$ son, respectivamente, la posición real y la posición estimada de los diferentes puntos bajo estudio, y M el número de puntos [4].

8 DESARROLLO PRÁCTICO-TEÓRICO

En el presente apartado se analizan y desarrollan diferentes métodos, tanto existentes como variantes propuestas, para paliar el impacto de los efectos de las medidas *Ultra Wideband* en presencia de obstáculos. Esta investigación se divide en dos estudios diferenciados: análisis sobre un banco de medidas estimadas y análisis sobre medidas reales.

8.1 Análisis de medidas simuladas

Con el fin de tener un banco de medidas plural y variado, se ha realizado el análisis sobre un conjunto de simulaciones de medidas de distancia computado mediante el método propuesto por Alavi y Pahlavan, definido en 7.1.1 *Error de medida de distancia*. Sin embargo, se ha sustituido la Ecuación (7-6) por una variable aleatoria binaria equiprobable, con el fin de que se diese una mayor riqueza de tipos de medida, independientemente de la distancia entre el ancla y el punto a estimar. De esta forma, se ha simulado la obtención de 1000 puntos, generados aleatoriamente en el entorno que se muestra en el apartado siguiente.

8.1.1 Entorno

Para realizar el estudio, se ha construido una cuadrícula de 9.5 x 7.5 metros, en la que se han distribuido 12 anclas de forma equitativa a lo largo del perímetro, encontrándose los puntos a estimar siempre en su interior, tal y como se muestra en la Figura 8-1.

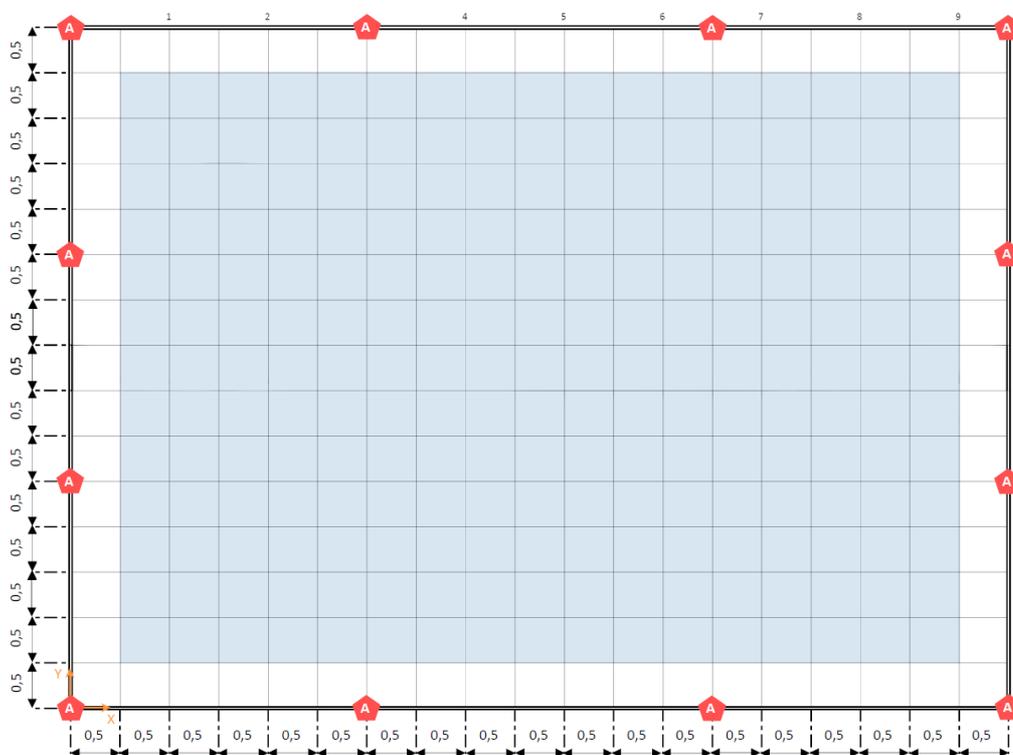


Figura 8-1: Entorno de medidas para simulaciones.

La simulación de estos puntos ha sido realizada mediante el software Matlab, generados de forma aleatoria con una precisión de 14 decimales (formato short en Matlab), por lo que estas posiciones podrán encontrarse en cualquier lugar de la cuadrícula que define el entorno. Estas medidas, tal y como se explicó en 7.1 *Modelado de errores de medidas de distancia*, se generan como UDP o DDP según una variable aleatoria. Con el fin de poder identificar qué medidas son UDP y cuáles DDP en el análisis de los resultados, se captura y se usa en el estudio el valor de esta variable aleatoria.

Las medidas obtenidas por simulación con el algoritmo de Alavi-Pahlavan son diferentes para cada ejecución. Por tanto, para el estudio en este proyecto se tomará la foto de una ejecución, si bien se ha estudiado el comportamiento de los métodos con varias iteraciones.

El objetivo del actual proyecto es analizar el comportamiento del método B-WLS, ya que, teóricamente, aprovechar el *Bounding-Box* para tener un primer diagnóstico sobre qué medidas son UDP, alivia el impacto negativo de estas. Para ello, se va a estudiar la respuesta del método en distintas situaciones, a la vez que se comparará con otros métodos, tanto existentes como otros propuestos, explorando así si existen posibles variantes que pudiesen mejorar el método B-WLS, o, por el contrario, el planteamiento original de este es el óptimo. Cabe recordar que el método B-WLS que se ha empleado es una versión mejorada del mismo, siguiendo la propuesta de Ismail Güvenç en [25], donde se ha propuesto optimizar la elección del ancla de referencia en cada ejecución como aquella cuya distancia al punto bajo estudio es la menor.

Se va a abordar el análisis desde los siguientes aspectos:

- Comparación de B-WLS con los métodos LLS básico y NLS básico.
- Comparación de B-WLS con métodos fundamentados en NLS.
- Comparación de B-WLS con métodos que tratan por igual a las medidas DDP.
- Comparación de B-WLS con métodos que añaden una iteración más sobre B-WLS.

8.1.2 Comparación de B-WLS con los métodos LLS básico y NLS básico

A lo largo de esta sección se compararán las respuestas a las simulaciones en el entorno de los métodos NLS básico, LLS básico, *Bounding-Box* y B-WLS.

El método NLS básico debe presentar una mayor precisión en la estimación de la posición ya que usa la información completa de todas las anclas. De forma opuesta, el método LLS básico, con el fin de linealizar el cálculo, omite un grado de libertad en sus ecuaciones, obviando cierta información. Este comportamiento teórico es corroborado por las simulaciones, tal y como se observa en la Tabla 8-1, donde se muestran los resultados de RMSE por conjuntos aislados de número de anclas.

Asimismo, en esta Tabla 8-1, los valores de RMSE (Ecuación 7-6) correspondientes al método NLS básico se encuentran, en todas las situaciones planteadas, por debajo de los equivalentes para el método LLS. Por otro lado, a medida que el número de medidas con condiciones DDP aumentan, los resultados otorgados por los métodos NLS y *Bounding Box* se aproximan más.

Tabla 8-1: RMSE de los métodos LLS, NLS y B-WLS en función del número y tipo de anclas

Nº anclas DDP	Nº anclas UDP	RMSE LLS (m)	RMSE NLS (m)	RMSE B- BOX (m)	RMSE B-WLS (m)
3	9	0,8979	0,7097	0,4939	0,3102
4	8	0,9116	0,7014	0,5127	0,3007
5	7	0,7943	0,6125	0,4354	0,2496
6	6	0,7095	0,5404	0,4405	0,2446
7	5	0,6728	0,5018	0,3859	0,1932
8	4	0,6059	0,4678	0,3682	0,195
9	3	0,5599	0,4053	0,3901	0,1665

Además, se observa que, al computar con cierto tratamiento las bases del método LLS, se obtienen resultados mucho mejores que los del NLS básico, como es el caso del B-WLS. El factor clave de este método, como se explicó anteriormente, es la ponderación de las medidas que se realiza en función de las estimadas por el algoritmo *Bounding-Box*, capaz de responder de forma robusta ante condiciones UDP. Sin embargo, este algoritmo, de forma aislada, no aporta una precisión buena, ya que se mantiene en un orden de RMSE muy elevado – comparado con el método B-WLS – hasta porcentajes muy altos de número de anclas DDP.

En la Figura 8-2 se muestran los resultados de la tabla anterior gráficamente. Así, se denota que el método B-WLS responde, en todos y cada uno de los diferentes casos plasmados, de forma más precisa, seguido por *Bounding-Box*, y por el método NLS, quedándose en último lugar el LLS. Estos resultados apoyan las valoraciones teóricas presentadas anteriormente.

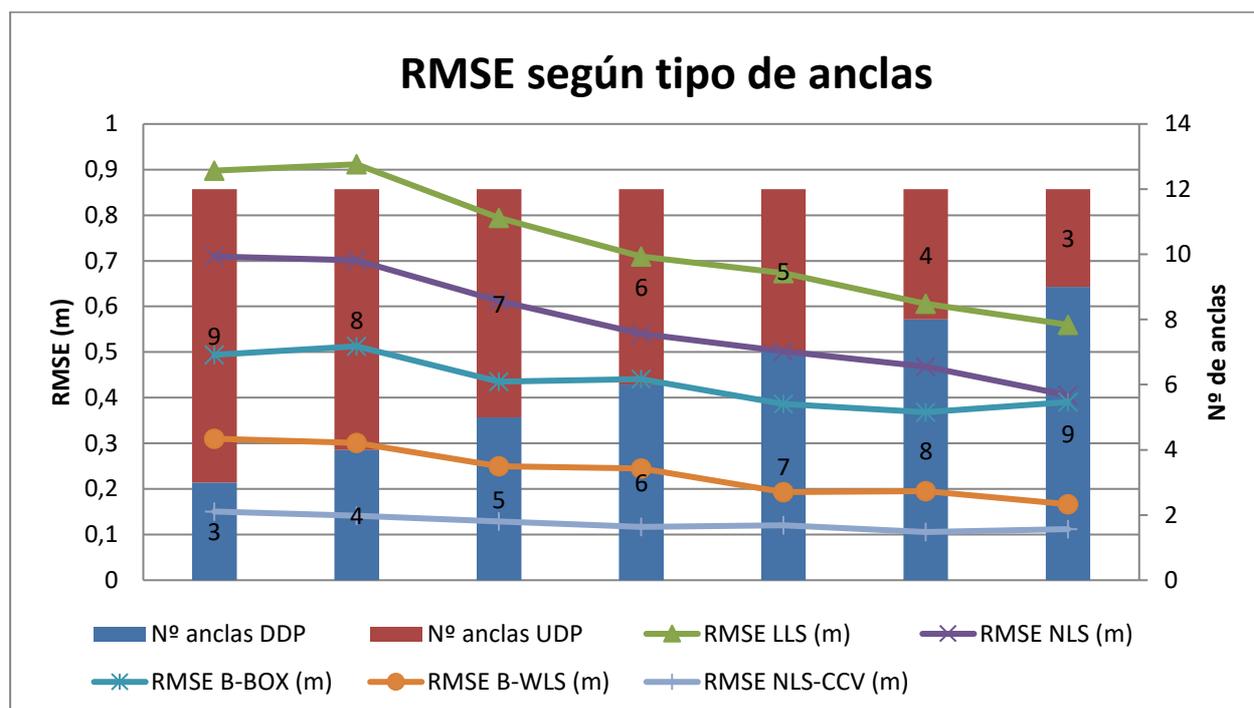


Figura 8-2: RMSE de los métodos básicos, Bounding Box y B-WLS según número y tipo de anclas

Para ver la respuesta de estos métodos ante las medidas de canal directo no detectado, se han comparado los RMSE obtenidos según el número mínimo de anclas con condiciones UDP. De esta forma, se observa en la Tabla 8-2 como la respuesta del NLS básico es peor que la del método *Bounding-Box*, y a medida que el número de anclas UDP va aumentando, la diferencia a favor de *Bounding-Box* también lo hace, mostrándose como un método robusto ante medidas UDP.

Tabla 8-2: RMSE de los diferentes métodos frente al número mínimo anclas UDP

Nº mín. anclas UDP	RMSE LLS (m)	RMSE NLS (m)	RMSE B-BOX (m)	RMSE B-WLS (m)
0	0,7409	0,5656	0,4322	0,2379
2	0,7415	0,5661	0,4315	0,2378
4	0,7528	0,5762	0,435	0,2423
6	0,8023	0,6169	0,4614	0,2639
8	0,9165	0,7082	0,5123	0,3005

Además, tanto en la Tabla 8-2 como en la Figura 8-3, destacan los valores de RMSE presentados por B-WLS, cuya respuesta es, con diferencia, mucho mejor que las del resto de métodos con los que se compara, siendo su comportamiento el más cercano al ideal NLS-CCV, que se presentará en el próximo apartado.

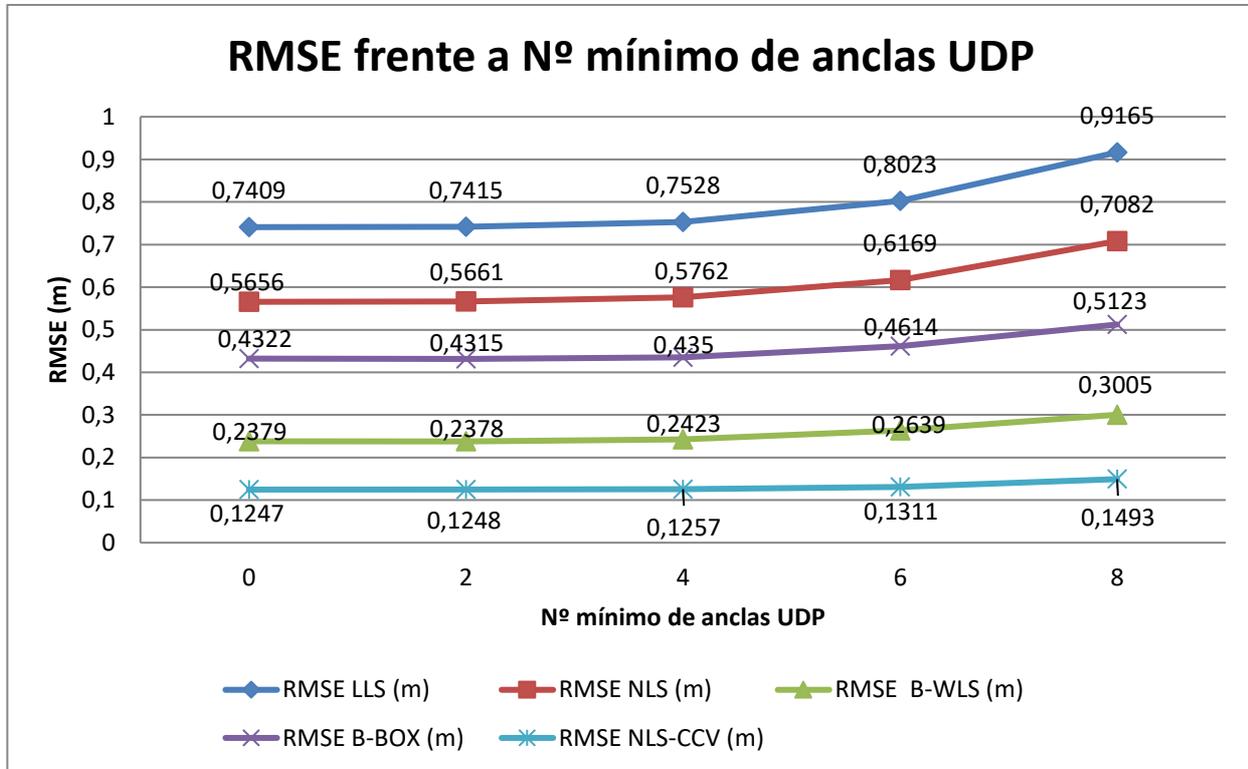


Figura 8-3: RMSE de métodos básicos, Bounding-Box y B-WLS frente a condiciones UDP.

Por tanto, se tiene que, en comparación con los métodos básicos de LLS y NLS, B-WLS tiene una mejor respuesta ante medidas UDP. Del mismo modo, el método *Bounding-Box* como propio de estimación de posición presenta unos valores mejores que los básicos y poco variantes, resultando así de gran ayuda para ponderar los pesos de las medidas en el método B-WLS, gracias a su buena respuesta ante estimaciones con condición de visión UDP.

8.1.3 Comparación con métodos fundamentados en NLS

A lo largo de este apartado se estudiará la respuesta de los métodos NLS-CCV y BB-NLS. El método propuesto BB-NLS-C, aunque basándose en NLS, se incluirá en el próximo apartado 8.1.4 *Comparación de B-WLS con métodos que tratan por igual a las medidas DDP*.

8.1.3.1 NLS-CCV

La construcción teórica de este método se puede observar en el apartado 6.1.3.5 *Método NLS-CCV*.

En la Tabla 8-3 se observa como el comportamiento del NLS con conocimiento de condición de visión responde mucho mejor para las diferentes situaciones aisladas mostradas si se compara con el B-WLS.

Tabla 8-3: RMSE de los métodos B-WLS y NLS-CCV en función del número y tipo de anclas

Nº anclas DDP	Nº anclas UDP	RMSE B-WLS (m)	RMSE CON. COND. VISIÓN (m)
3	9	0,3102	0,1505
4	8	0,3007	0,1415
5	7	0,2496	0,1289
6	6	0,2446	0,1172
7	5	0,1932	0,1202
8	4	0,195	0,1056
9	3	0,1665	0,112

En lo que respecta al comportamiento frente a medidas UWB con condición UDP, en la Tabla 8-4 se presenta el comportamiento de B-WLS y NLS-CCV a medida que aumenta el número de puntos con estimaciones UDP, observándose cómo la respuesta del RMSE de NLS-CCV se mantiene en valores bajos e inferiores al resto para todos los casos. Esto es, principalmente, debido a que conoce el tipo de señal, y lo pondera en consecuencia.

Tabla 8-4: RMSE de los métodos B-WLS y NLS-CCV frente a número mínimo de anclas UDP

Nº mín. anclas UDP	RMSE B-WLS (m)	RMSE NLS-CCV (m)
0	0,2379	0,1247
2	0,2378	0,1248
4	0,2423	0,1257
6	0,2639	0,1311
8	0,3005	0,1493

Tanto el valor suelo que presenta el NLS-CCV, como la subida de RMSE para proporciones altas de número de anclas UDP, se puede observar en la Figura 8-4.

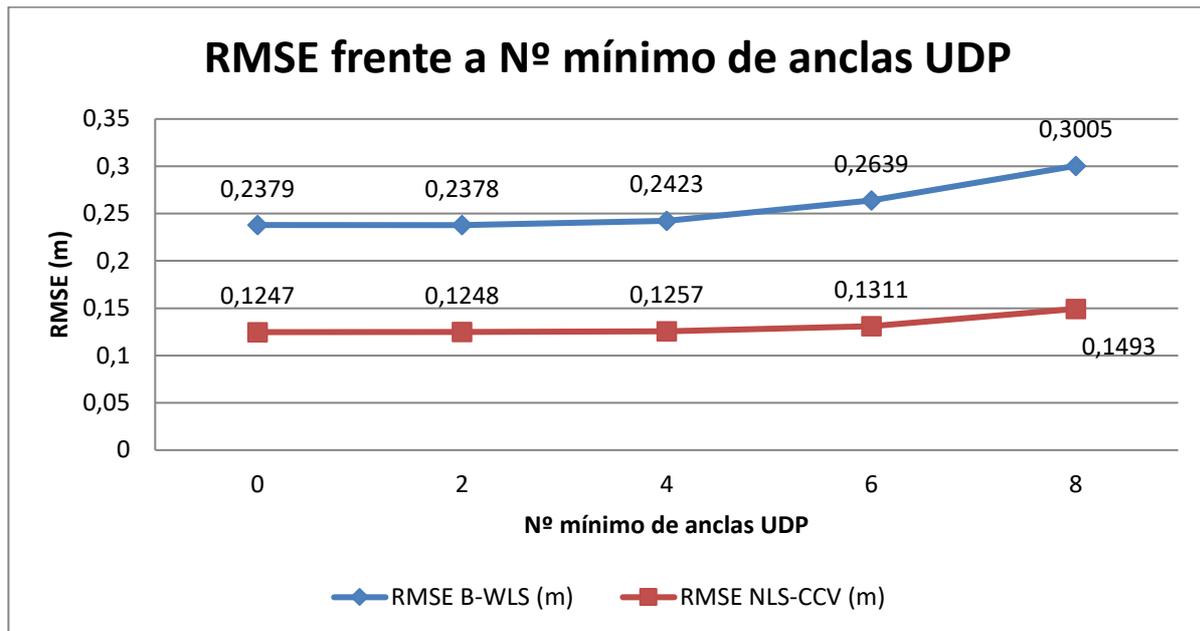


Figura 8-4: RMSE de los métodos B-WLS y NLS-CCV frente al N° mínimo de medidas UDP.

8.1.3.2 BB-NLS

Las bases sobre las que se construye este método se describen en el apartado 6.2.1.1 *Método BB-NLS*.

Se espera de BB-NLS que su respuesta sea mejor que la del NLS básico y, por ende, del LLS básico. Además, observamos en la Tabla 8-5 y Figura 8-6, cómo este método presenta también mejores valores de RMSE que el B-WLS, aunque no se reflejan mejoras de precisión muy notables.

Tabla 8-5: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS en función del número y tipo de anclas

N° anclas DDP	N° anclas UDP	RMSE LLS (m)	RMSE NLS (m)	RMSE B-WLS (m)	RMSE BB-NLS (m)
3	9	0,8979	0,7097	0,3102	0,3470
4	8	0,9116	0,7014	0,3007	0,2791
5	7	0,7943	0,6125	0,2496	0,2551
6	6	0,7095	0,5404	0,2446	0,2226
7	5	0,6728	0,5018	0,1932	0,1961
8	4	0,6059	0,4678	0,195	0,1649
9	3	0,5599	0,4053	0,1665	0,1564

Este comportamiento también se puede corroborar visualmente a través de la Figura 8-6, donde los métodos básicos NLS y LLS se encuentran en términos de RMSE superiores a los de B-WLS y BB-NLS, siendo el valor suelo en del método NLS-CCV. Para proporciones de número de anclas con condición de visión DDP elevadas, los métodos B-WLS y BB-NLS responden en valores de RMSE similares.

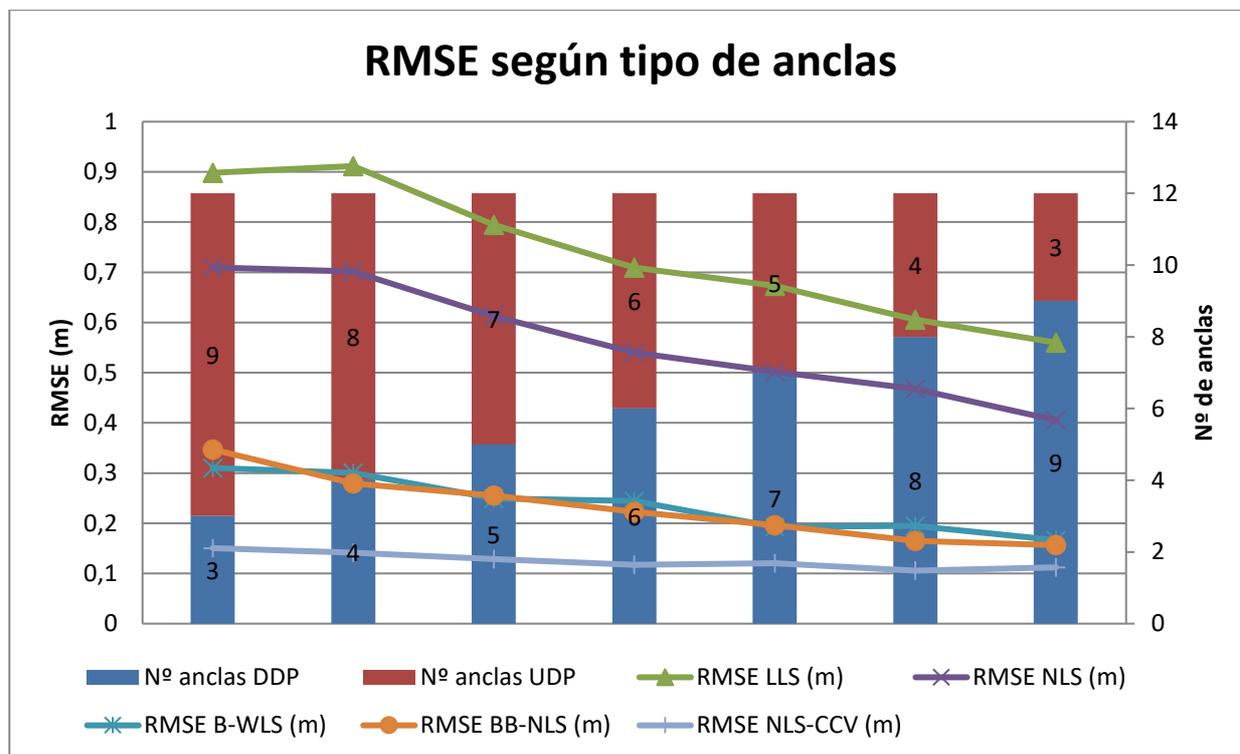


Figura 8-5: RMSE de los métodos básicos, B-WLS y BB-NLS según número y tipo de anclas.

Analizando la respuesta al aumento de anclas sin detección del rayo directo de los métodos B-WLS y BB-NLS, se observa en la Tabla 8-6 cómo la respuesta del nuevo método propuesto tiene un comportamiento parejo al del B-WLS.

Tabla 8-6: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS frente al número mínimo de anclas UDP

Nº mín. anclas UDP	RMSE B-WLS (m)	RMSE BB-NLS (m)
0	0,2379	0,2305
2	0,2378	0,2307
4	0,2423	0,2354
6	0,2639	0,2579
8	0,3005	0,3003

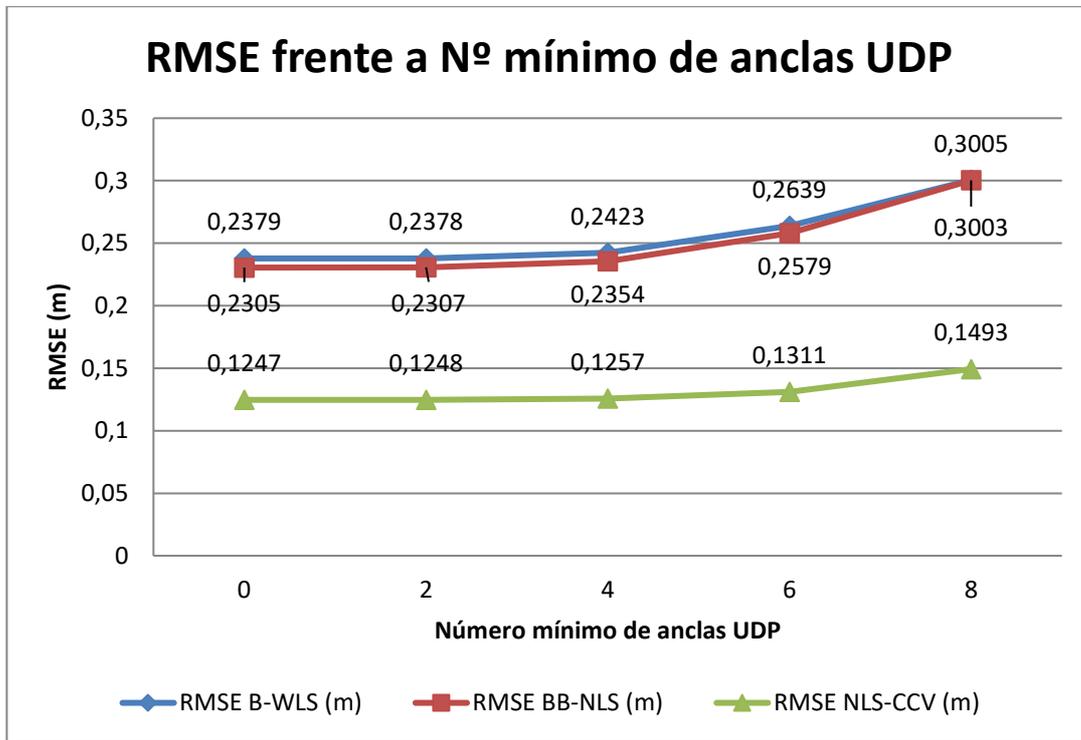


Figura 8-6: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS frente al N° mínimo de medidas UDP presentes.

Este comportamiento se ve también reflejado en la Figura 8-6, donde la respuesta de ambos métodos a medida que se van retirando de los cálculos los casos más favorables con una mayor proporción de medidas DDP es similar, y con una diferencia de precisión que se mantiene relativamente constante a lo largo de la figura, volviendo a marcar el método NLS-CCV los valores mínimos.

8.1.4 Comparación de B-WLS con métodos que tratan por igual a las medidas DDP

A lo largo de este apartado se analizará la respuesta del método BB-NLS-C y B-WLS-C. En ambas propuestas, se han ensayado distintas estrategias para determinar si una medida es DDP, para elegir cuál incluir en el diseño de los métodos.

8.1.4.1 BB-NLS-C

Los fundamentos teóricos sobre los que se construye esta propuesta alternativa se describen en 6.2.2.1 *BB-NLS-C*.

En la Tabla 8-7 se muestran los diferentes valores a comparar con un valor de corte y los pesos asignados si la medida se diagnostica como DDP, así como el RMSE obtenido para el conjunto de los 1000 puntos simulados, con todas las configuraciones diferentes de condiciones de visión de las anclas.

Tabla 8-7: RMSE obtenidos para los distintos escenarios planteados para BB-NLS-C

Valor a comparar	Valor de corte (m)	Peso asignado	RMSE BB-NLS-C (m)	RMSE B-WLS (m)
σ_i	media($ \sigma $)	min($ \sigma_i $)	0,2712	0,2379
σ_i	0,45	media($ \sigma_i $)	0,2933	0,2379
σ_i	0,45	media($ \sigma $)	0,2697	0,2379
σ_i	0.45	min($ \sigma_i $)	0,2578	0,2379

Donde media($|\sigma|$) hace referencia a la media de todos los valores obtenidos como

$$\sigma = \hat{d} - d_{\text{Bounding-Box}} \quad (8-1)$$

min($|\sigma_i|$) indica el valor mínimo de los errores generados por cada ancla (Ecuación 6-14), aplicándose el valor de media($|\sigma_i|$) para el mismo conjunto.

Para comprobar la respuesta al descarte progresivo de los casos más favorables, en la Figura 8-7 y Tabla 8-8 tomamos el caso estudiado en la Tabla 8-7 con respuesta más favorable, correspondiéndose con el valor de corte 0.45 y peso asignado min($|\sigma_i|$).

Tabla 8-8: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS-C frente a número mínimo de anclas UDP

Nº mín. anclas UDP	Valor a comparar	Valor de corte (m)	Peso asignado	RMSE BB-NLS-C (m)	RMSE B-WLS (m)
0	σ_i	0.45	min($ \sigma_i $)	0,3158	0,2379
2	σ_i	0.45	min($ \sigma_i $)	0,3162	0,2378
4	σ_i	0.45	min($ \sigma_i $)	0,3201	0,2423
6	σ_i	0.45	min($ \sigma_i $)	0,3401	0,2639
8	σ_i	0.45	min($ \sigma_i $)	0,3365	0,3005

Se obtiene, por tanto, que ninguno de los valores propuestos aplicados a la construcción NLS (Ecuación 6-11), genera unos pesos suficientes como para superar a las prestaciones del B-WLS, como se observa en la Figura 8-7. De hecho, el BB-NLS-C genera errores de estimación RMSE superiores, de varios centímetros de diferencia.

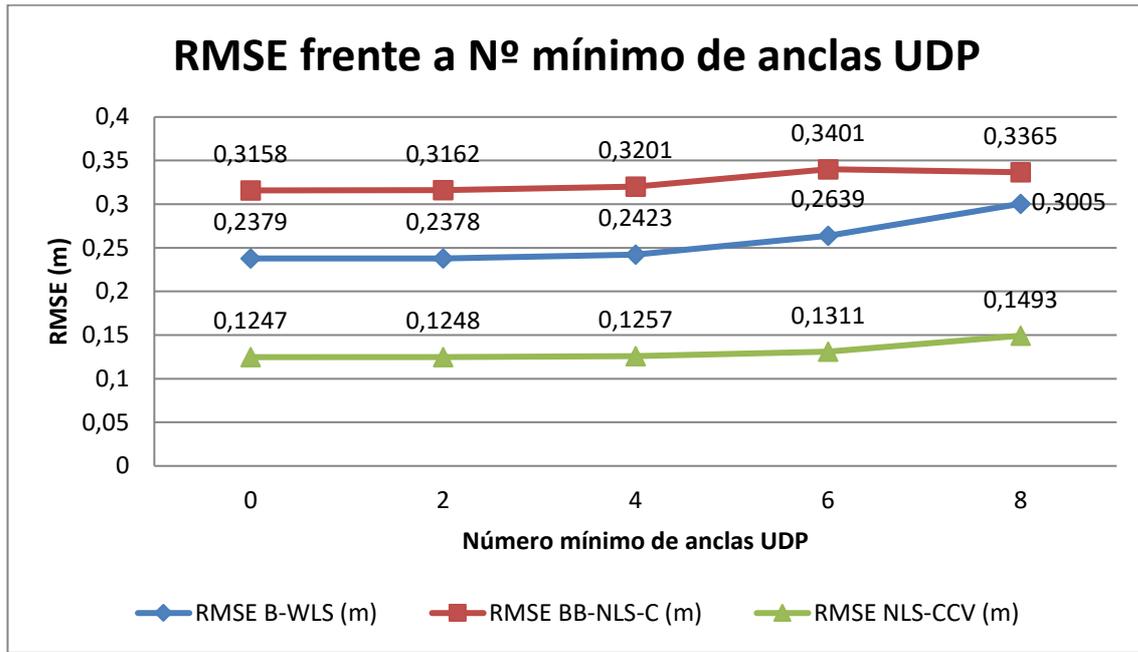


Figura 8-7: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS-C frente al N° mínimo de medidas UDP presentes.

8.1.4.2 B-WLS-C

Las bases teóricas sobre las que se construye este método alternativo se describen en 6.2.2.2 B-WLS-C.

Tras el estudio práctico, se observa que este método presenta mejor respuesta que el BB-NLS-C, aunque teniendo aún peores valores de RMSE en comparación con el B-WLS.

Tabla 8-9: RMSE obtenidos para los distintos escenarios planteados para B-WLS-C

Valor a comparar	Valor de corte	Peso asignado	RMSE B-WLS-C	RMSE B-WLS
σ_i	media($ \sigma $)	min($ \sigma_i $)	0,2578	0,2379
σ_i	0,45	media($ \sigma_i $)	0,2578	0,2378
σ_i	0,45	media($ \sigma $)	0,2618	0,2423
σ_i	0.45	min($ \sigma_i $)	0,2805	0,2639

Donde media($|\sigma|$) hace referencia a la Ecuación 6-14, min($|\sigma_i|$) indica el valor mínimo de los errores generados por cada ancla, siendo media($|\sigma_i|$) el valor medio para el mismo conjunto.

Con el fin de observar la respuesta al descarte progresivo de los casos más favorables, se procede como en los análisis del apartado anterior, y se toma el caso estudiado en Tabla 8-9 con respuesta más favorable, correspondiéndose con el valor de corte 0.45 y peso asignado min($|\sigma_i|$).

Tabla 8-10: RMSE de los métodos métodos B-WLS y B-WLS-C frente a número mínimo de anclas UDP

Nº mín. anclas UDP	Valor a comparar	Valor de corte	Peso asignado	RMSE B-WLS-C	RMSE B-WLS
0	σ_i	0.45	$\min(\sigma_i)$	0,2578	0,2379
2	σ_i	0.45	$\min(\sigma_i)$	0,2578	0,2378
4	σ_i	0.45	$\min(\sigma_i)$	0,2618	0,2423
6	σ_i	0.45	$\min(\sigma_i)$	0,2805	0,2639
8	σ_i	0.45	$\min(\sigma_i)$	0,3092	0,3005

En la Tabla 8-10 se observa que la respuesta del B-WLS-C, presenta prestaciones inferiores al de B-WLS, aunque con una diferencia muy pequeña. Este mismo comportamiento se puede denotar de forma gráfica en la Figura 8-8-8.

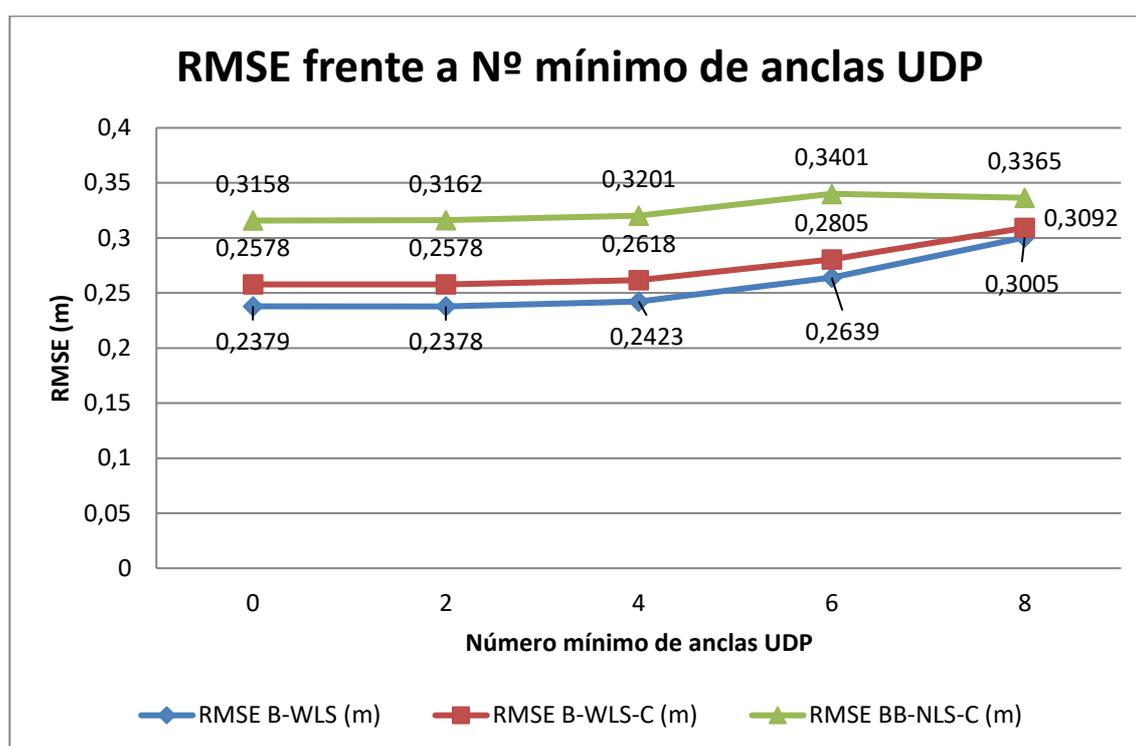


Figura 8-8-8: RMSE de los métodos B-WLS y B-WLS-C frente al Nº mínimo de medidas UDP presentes.

Se determina, por tanto, que no hay ningún valor alternativo que, aplicado a la construcción matricial que hace el método B-WLS (Ecuación 6-13), genere mejores pesos y, por ende, mayor precisión de estimación.

8.1.5 Comparación de B-WLS con métodos que añaden una iteración más sobre B-WLS

A lo largo de este apartado se analiza el comportamiento en variados escenarios de los métodos BB-NLS-R y B-WLS-R.

8.1.5.1 BB-NLS-R

La base teórica de este método se muestra en el apartado 6.2.3.1 *Método BB-NLS-R*.

Cabe esperar de este método un comportamiento mejor que el del BB-NLS simple, ya que las estimaciones B-WLS aportan mayor precisión. Esta conducta se puede observar en la Tabla 8-11, donde destaca que, efectivamente, las estimaciones BB-NLS-R aportan valores más cercanos a la posición real.

Tabla 8-11: RMSE de los métodos B-WLS, BB-NLS y BB-NLS-R en función del número y tipo de anclas

Nº anclas DDP	Nº anclas UDP	RMSE B-WLS (m)	RMSE BB-NLS (m)	RMSE BB-NLS-R (m)
3	9	0,3102	0,3470	0,3005
4	8	0,3007	0,2791	0,2505
5	7	0,2496	0,2551	0,2153
6	6	0,2446	0,2226	0,1849
7	5	0,1932	0,1961	0,1628
8	4	0,195	0,1649	0,1352
9	3	0,1665	0,1564	0,1244

Para el estudio de condiciones de visión aisladas, se muestra en la Figura 8-9 como los métodos B-WLS, BB-NLS y BB-NLS-R, presentan cada uno de ellos mejor comportamiento que el anterior, si bien siendo la reducción de RMSE poco significativa entre los dos últimos.

Concretamente, en la Figura 8-9, la mejora relativa del método BB-NLS-R es mayor a medida que aumenta la proporción de anclas DDP, donde en el caso de 7 anclas DDP y 5 UDP su valor se encuentra aproximadamente en el punto intermedio entre el del B-WLS y el método idealizado de referencia.

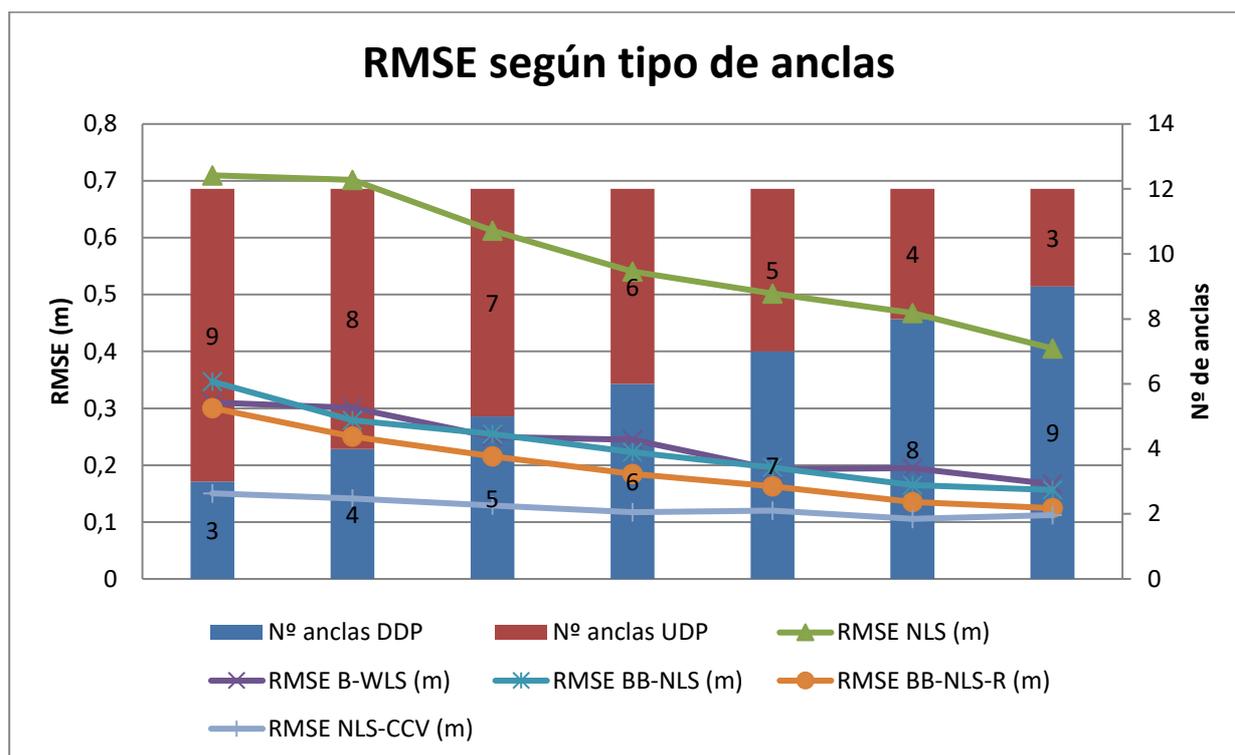


Figura 8-9: RMSE de los métodos NLS, B-WLS, BB-NLS y BB-NLS-R según número y tipo de anclas.

Procediendo como en los apartados anteriores, se estudia la robustez del BB-NLS-R frente al descarte progresivo de los casos más favorables, denotándose en la Tabla 8-12 como el método BB-NLS-R también presenta una respuesta más precisa.

Tabla 8-12: RMSE de los métodos B-WLS, BB-NLS y BB-NLS-R frente al N^o mínimo de anclas UDP

N ^o mín. anclas UDP	RMSE B-WLS (m)	RMSE BB-NLS (m)	RMSE BB-NLS-R (m)
0	0,2379	0,2305	0,1954
2	0,2378	0,2307	0,1956
4	0,2423	0,2354	0,1998
6	0,2639	0,2579	0,2205
8	0,3005	0,3003	0,2642

Con las variantes propuestas, por tanto, se logra una ligera mejora de RMSE, como también se observa en la Figura 8-10. El método NLS-CCV vuelve a marcar el valor suelo.

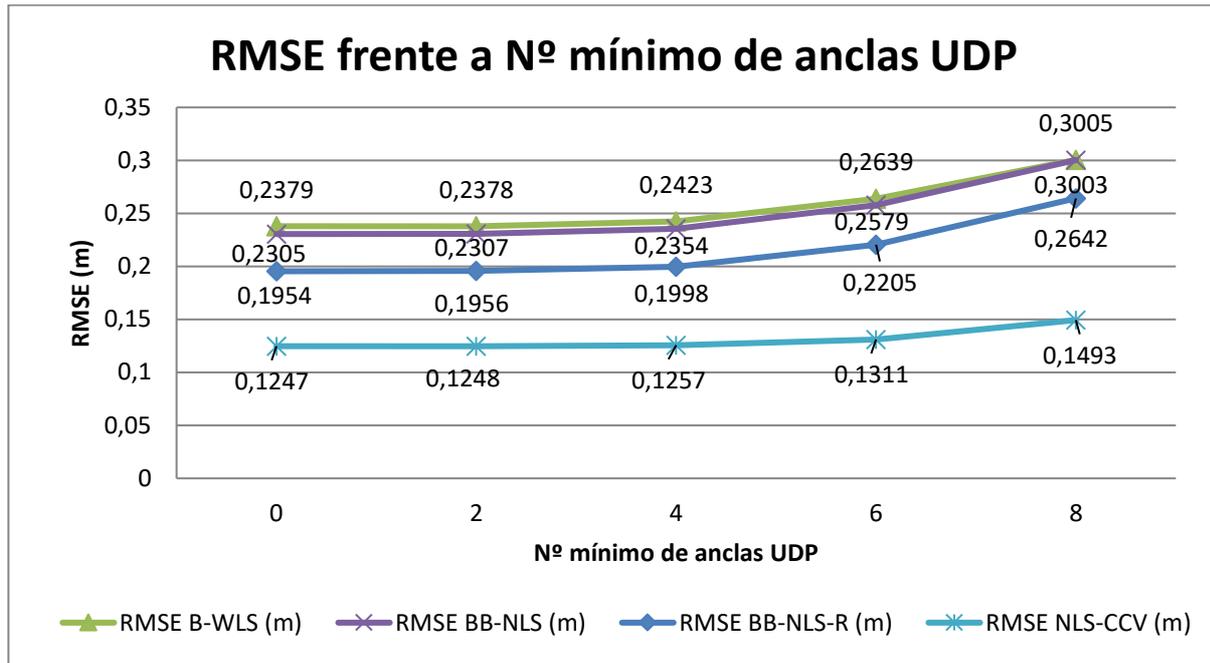


Figura 8-10: RMSE de los métodos B-WLS y BB-NLS-R frente al N^o mínimo de medidas UDP presentes.

En la Figura 8-10 se observa que el método BB-NLS-R se acerca a los valores obtenidos por el NLS-CCV, diferenciándose de los comportamientos de las curvas de B-WLS y BB-NLS.

8.1.5.2 B-WLS-R

La construcción teórica de este método se describe en el apartado 6.2.3.2 *Método B-WLS-R*.

El comportamiento de B-WLS-R es intermedio entre el BB-NLS-R y el B-WLS, tal y como se puede advertir en la Tabla 8-13.

Tabla 8-13: RMSE de los métodos B-WLS, BB-NLS-R y B-WLS-R en función del número y tipo de anclas

N ^o anclas DDP	N ^o anclas UDP	RMSE B-WLS (m)	RMSE BB-NLS-R (m)	RMSE B-WLS-R (m)
3	9	0,3102	0,3005	0,3111
4	8	0,3007	0,2505	0,2665
5	7	0,2496	0,2153	0,2191
6	6	0,2446	0,1849	0,2147
7	5	0,1932	0,1628	0,1635
8	4	0,1950	0,1352	0,1561
9	3	0,1665	0,1244	0,1321

El comportamiento aislado a nivel visual se puede contemplar en la Figura 8-11. En esta se muestra como el comportamiento del método B-WLS-R mejora al del B-WLS, pero siempre se mantiene en valores peores a los ofrecidos por el BB-NLS-R.

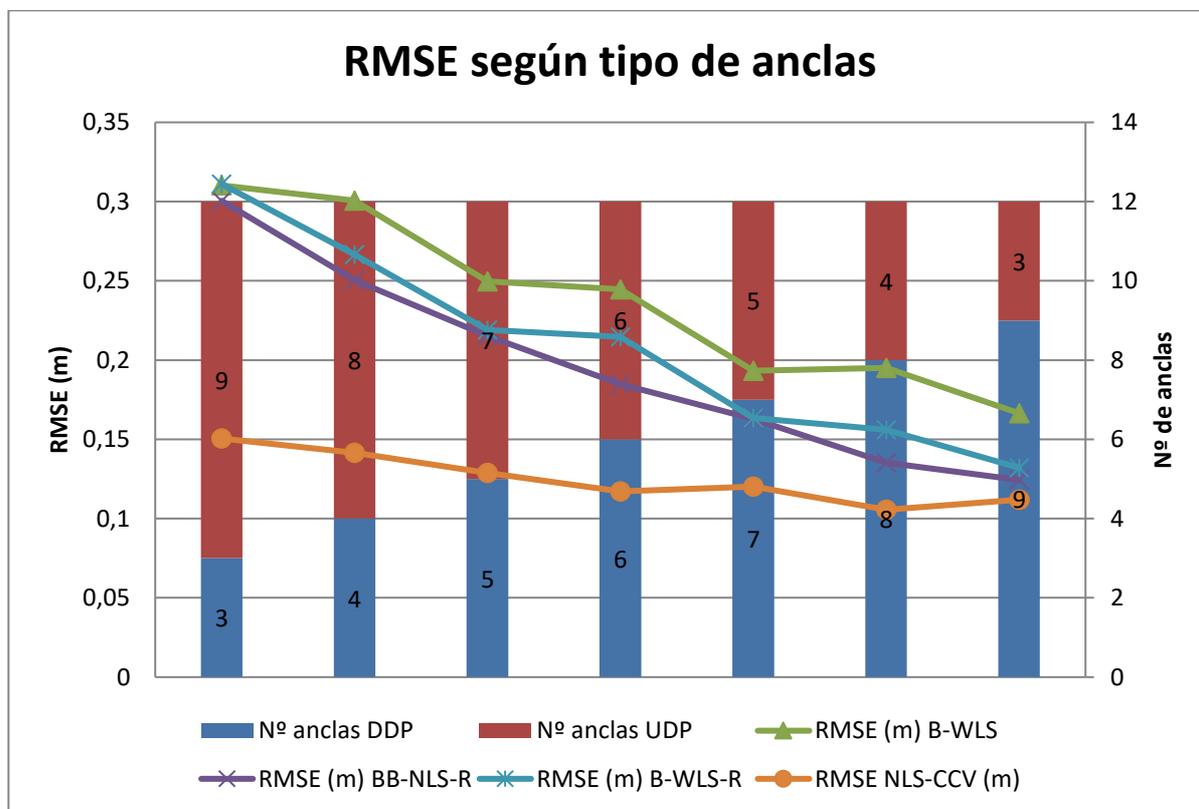


Figura 8-11: RMSE de los métodos B-WLS, BB-NLS-R y B-WLS-R según número y tipo de anclas.

Del análisis de la respuesta del método B-WLS-R, mostrado en Tabla 8-14 y gráficamente en Figura 8-12, se observa que los comportamientos presentados por B-WLS-R y BB-NLS-R presentan valores muy próximos, si bien el método B-NLS-R sigue teniendo una respuesta más suave.

Tabla 8-14: RMSE de los métodos B-WLS, BB-NLS-R y B-WLS-R frente a Nº de medidas mín. UDP

Nº mín. anclas UDP	RMSE B-WLS (m)	RMSE BB-NLS-R (m)	RMSE B-WLS-R (m)
0	0,2379	0,1954	0,2086
2	0,2378	0,1956	0,2088
4	0,2423	0,1998	0,2133
6	0,2639	0,2205	0,2360
8	0,3005	0,2642	0,2766

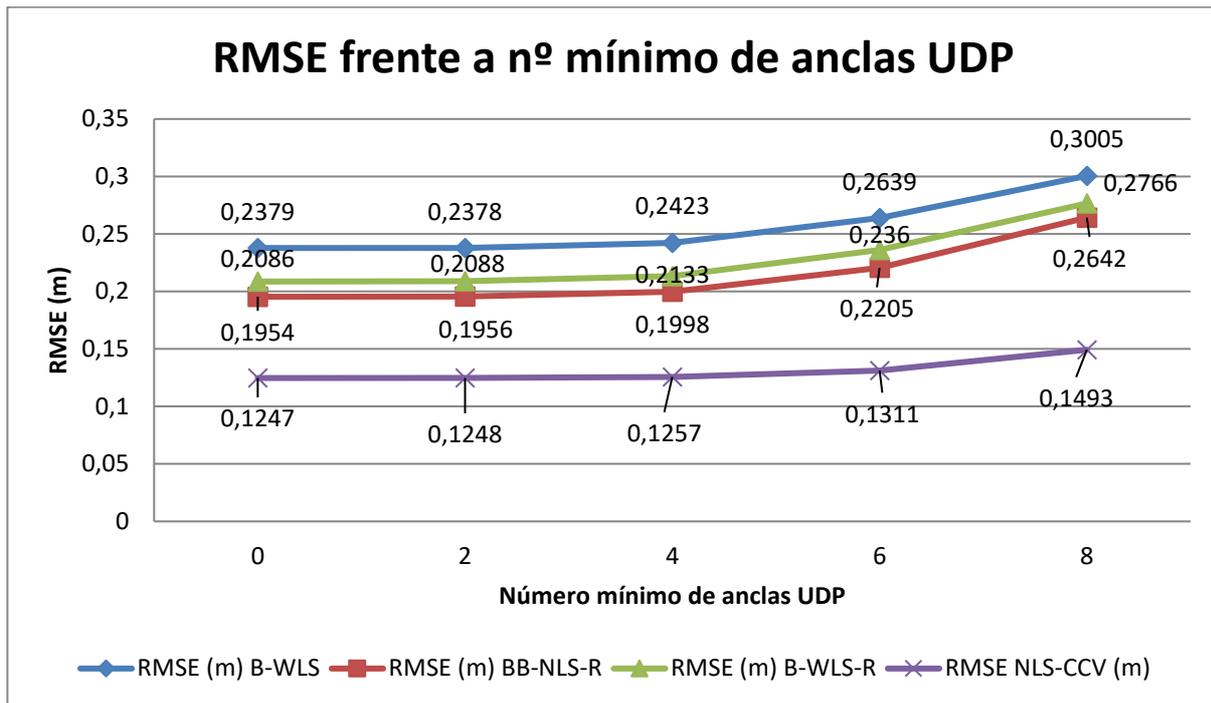


Figura 8-12: RMSE de los métodos B-WLS y B-WLS-R frente al N^o mínimo de medidas UDP presentes.

En la figura anterior se observa, como se mencionó previamente, que el comportamiento del método B-WLS-R mejora al del B-WLS, manteniéndose el método BB-NLS-R como el que aporta la estimación de localización más precisa.

8.2 Análisis de medidas reales

En el desarrollo del Trabajo Final de Grado, para evaluar de forma práctica la resistencia del método de localización para un sistema UWB sin línea de visión directa, se tomaron diversas medidas con el software EVK1000, analizado en el capítulo 5 *Descripción del material*, en una situación de interior. Concretamente, se realizó el estudio en una sala y pasillo del departamento de "Teoría de la señal y comunicaciones" de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

8.2.1 Entorno

Para realizar el estudio, se ha construido una cuadrícula siguiendo el dibujo de las propias losetas de la sala y pasillos adyacentes. Además, se han definido una serie de puntos en los que se han tomado las medidas, así como la posición de seis anclas. En la Figura 8-13 se puede ver la distribución y posición exacta de los veintidós puntos y seis anclas. El hecho de que el entorno sea conocido, permite realizar el estudio sabiendo de antemano la condición de visión de cada punto con cada ancla. Las simulaciones se realizaron siempre con la puerta abierta, por lo que el Ancla 6 dispone de visión directa con ciertos puntos del interior de la sala.

Para el estudio de los puntos del interior de la sala, se encuentra el Ancla 5 separada por un muro, con influencia de mesas de madera; el Ancla 6 tiene visión directa con ciertos puntos del interior y obstáculos como la puerta de madera y muros para otros puntos, mientras que el Ancla 2 es clave para el estudio de medidas UDP, ya que la comunicación entre esta ancla y los puntos del interior de

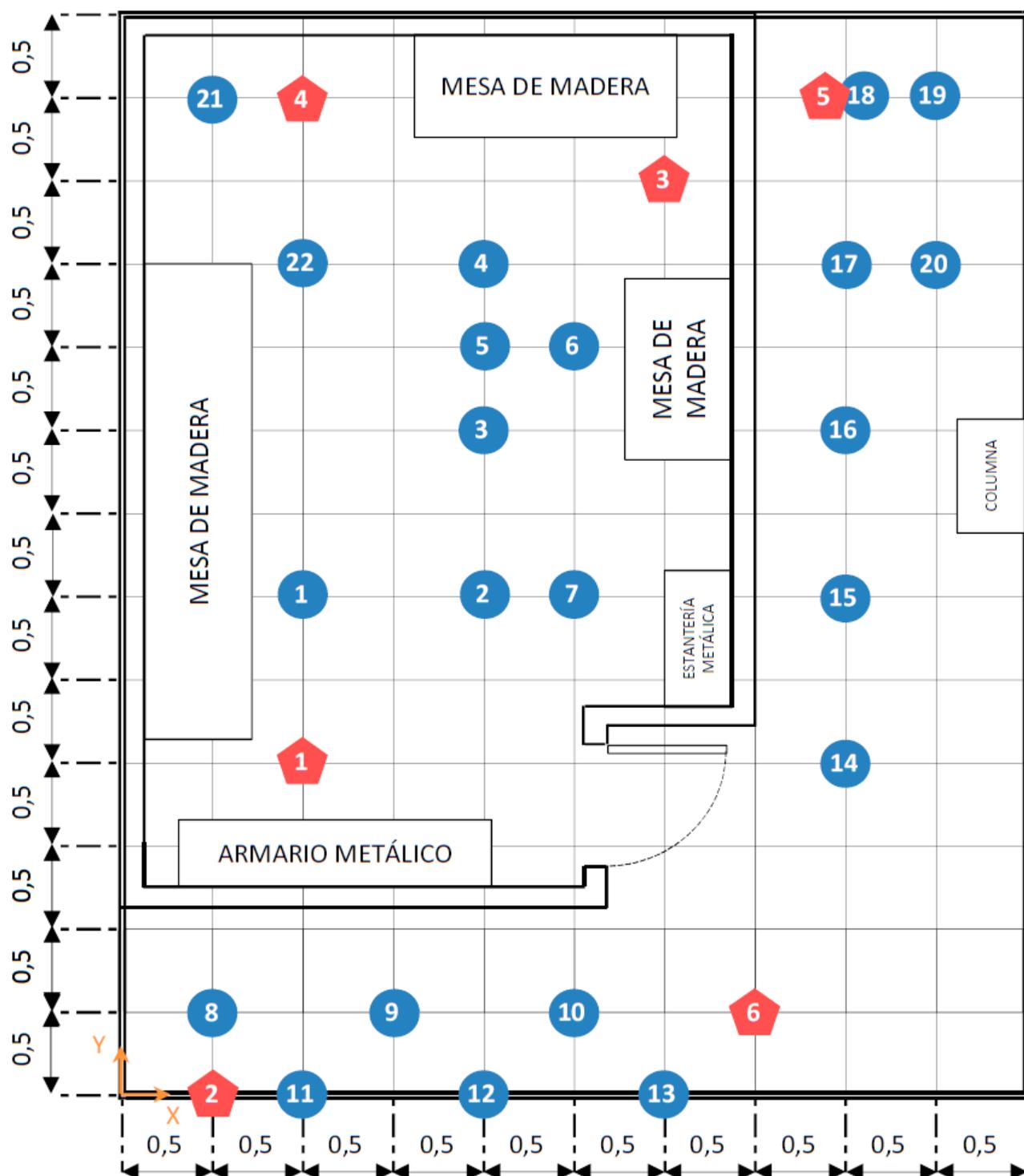


Figura 8-13: Distribución de anclas y puntos en la sala.

la sala se ve obstruida por un armario metálico, por lo que intervendrán trayectos diferentes del directo.

Por otro lado, para los puntos exteriores, numerados de 8 al 13, algunos están influidos por el armario metálico para las anclas 1, 3 y 4. De igual forma, en lo referente a estas mismas anclas, para las posiciones entre la 14 y 20 la señal es influida por una mesa de madera o estantería metálica, según la

transmisión de la señal.

Para el estudio de canales LOS, las anclas 1, 3 y 4 tienen visión directa con los puntos interiores, el Ancla 5 con las posiciones del pasillo de la derecha de la sala, al igual que para el Ancla 6, que además posee línea de visión directa con los puntos del 8 al 13, como el Ancla 2. Asimismo, como se indicó previamente, el Ancla 6 tiene canal de línea de visión directa LOS para las posiciones 1 y 2 [4].

Para resumir todas estas condiciones de visión según la posición y el ancla, se ha construido la Tabla 8-15.

Tabla 8-15: Condición de visión de las diferentes anclas con los puntos en el análisis real

Puntos Anclas	Puntos																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	L	L	L	L	L	L	L	U	U	U	U	U	D	D	D	D	D	D	D	D	L	L
2	U	U	U	U	U	U	U	L	L	L	L	L	L	D	D	U	U	U	U	U	U	U
3	L	L	L	L	L	L	L	U	U	L	U	D	D	D	D	D	D	D	D	D	L	L
4	L	L	L	L	L	L	L	U	U	U	U	U	U	D	D	D	D	D	D	D	L	L
5	D	D	D	D	D	D	D	U	U	D	U	U	D	L	L	L	L	L	L	L	D	D
6	D	D	D	D	D	D	D	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	D	L

Donde las letras “L”, “D” y “U” hacen referencia a condiciones de visión LOS-DDP, NLOS-DDP y NLOS-UDP, respectivamente. Sin embargo, para el fin de este proyecto, la clasificación de estas posiciones se ceñirá a dos grupos: DDP (englobando señales LOS-DDP y NLOS-DDP), y UDP (señales NLOS-UDP).

8.2.2 Comparación con medidas reales

Para el conjunto de las medidas reales tomadas, se han calculado las estimaciones de posición mediante los mismos métodos que en 8.1 *Análisis de medidas simuladas*. De esta forma, se muestra en la Tabla 8-16 los resultados de RMSE para los 23 puntos bajo estudio, y para los diferentes métodos.

Tabla 8-16: RMSE de los diferentes métodos para el escenario de medias reales

Método	RMSE (m)
LLS básico	0,7113
NLS básico	0,4592
NLS-CCV	0,3321
BOUNDING-BOX	0,6412
B-WLS	0,4142
BB-NLS	0,3762
BB-NLS-C	0,4472
BB-NLS-R	0,4104
B-WLS-R	0,4631

Los resultados obtenidos son coherentes con el entorno simulado. En el emplazamiento físico de la sala de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, las anclas se colocaron de manera que no formaban un perímetro en el que englobaban a los puntos bajos estudio, dificultando el cálculo de sus coordenadas.

Respecto a los resultados dados y conclusiones deducidas por las medidas reales, hay que destacar que no se pretende atribuir a los valores resultantes de RMSE una validez general, ya que el número de valores de error que se incluyen en el cálculo de la media muestral es relativamente pequeño.

La codificación de todos los métodos usados a lo largo de este apartado se adjunta en *Anexos*.

9 CONCLUSIÓN

El uso de medidas UWB para redes de sensores y para el Internet de las Cosas (IoT) es, sin duda, uno de los campos con mayor proyección y futuro inmediato en el que la tecnología UWB puede aportar grandes avances.

El objeto principal del presente proyecto se basa en analizar y desarrollar tanto algunos de los métodos de localización existentes como variantes para paliar el impacto de los errores de las medidas *Ultra Wideband* en presencia de obstáculos. Una vez plasmada toda la información y llegado a diferentes conclusiones extraídas de las muestras y los estudios, cabe señalar los siguientes aspectos principales:

- De forma general, los métodos NLS, aunque generando mayor carga computacional, responden de manera más satisfactoria que los LLS.
- El método de Bounding-Box por sí solo no aporta un buen valor de RMSE, pero sí presenta una buena respuesta ante el aumento de medidas UDP, por lo que es muy bueno para combinarlo con estrategias LLS o NLS para determinar los pesos a usar.
- El método B-WLS (en la versión mejorada que se ha propuesto optimizando la elección del ancla de referencia) consigue una mejora significativa en comparación con los métodos básicos NLS y LLS, acercando sus prestaciones a las de la referencia con conocimiento perfecto de la condición de visión NLS-CCV.
- El método BB-NLS, fundamentado en NLS, presenta una respuesta similar al del B-WLS.
- El método *Bounding-Box* tiene una respuesta muy robusta frente a las medidas UDP, otorgando unas estimaciones que generan unos pesos muy acertados. Al querer crear métodos que traten por igual a todas las medidas DDP, con las estrategias concretas que se han explorado, los resultados son siempre peores que los del B-WLS.
- Añadir una iteración más sobre los resultados obtenidos por el B-WLS proporciona resultados más precisos, como el método B-WLS-R o BB-NLS-R, a costa de un aumento considerable de la complejidad computacional. El comportamiento de estos métodos se acerca más al del NLS-CCV a medida que aumenta la proporción de anclas DDP frente a las de UDP.

Tras haber realizado una comparación exhaustiva con las diferentes propuestas mostradas a lo largo del proyecto, se concluye que el uso de *Bounding-Box* como método robusto ante medidas UDP, para ponderar los pesos de la matriz de covarianza de B-WLS, y la propia construcción matricial de este método - aun siendo una versión linealizada del NLS - responde de manera excelente en cuestión de localización en interiores basado en medidas UWB.

Por otro lado, el método que finalmente ofrece mejores prestaciones en términos de localización frente a medidas UDP es el BB-NLS-R, a costa de un aumento de la carga computacional, mostrando

una alternativa en el compromiso prestaciones-carga. Aunque en general esta mejora es pequeña en términos absolutos (del orden de pocos centímetros), a medida que la proporción entre anclas DDP y UDP aumenta, esta mejora se hace más significativa en el sentido de aproximar las prestaciones del algoritmo BB-NLS-R a las del algoritmo idealizado NLS-CCV que se ha usado como referencia.

10 ANEXOS

Para completar la información dada en los puntos anteriores, se disponen los códigos usados para la generación de los diferentes métodos del documento. Este material busca servir de complemento y apoyo al contenido del proyecto.

A) Fichero orquestador_metodos.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: orquestador_metodos.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código encargado de llamar
%%%              a los diferentes métodos analizados en el proyecto.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

close all, clear all
tic
format short
% Generación de datos base
Posiciones_Anclas=xlsread('MedidasExtraidas','NUEVAS_ANCLAS');
%Posiciones_Puntos=xlsread('MedidasExtraidas','NUEVOS_PUNTOS_255');
Num_puntos=1000;
Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
Posiciones_Puntos=[];

% Cálculo de posiciones aleatorias
Posiciones_Puntos = posiciones_puntos(Num_puntos,0.5,9,0.5,7);

% Cálculo de vector de distancias a posiciones aleatorias
Distancia_ancla_posicion =
calc_distancia(Posiciones_Anclas,Posiciones_Puntos);

% Cálculo del grid
grid_posiciones=[];
rango_posiciones_x=0.5:0.1:9;
rango_posiciones_y=0.5:0.1:7;
grid_posiciones = genera_grid(rango_posiciones_x,rango_posiciones_y);

% Distancia anclas - puntos del grid
Distancia_ancla_grid = calc_distancia(Posiciones_Anclas,grid_posiciones);

% Generacion de tabla de las distancias estimadas
[M_error,M_tipo]=alavi_pahlavan(Posiciones_Anclas,Posiciones_Puntos);
DistanciaEstimada_ancla_posicion=Distancia_ancla_posicion + M_error;
% Para facilitar uso
d_e=DistanciaEstimada_ancla_posicion;
d_r=Distancia_ancla_posicion;

% Matriz de resultados
Record=[];
```

```

% Se exportan las coordenadas reales del punto a analizar
Record(:,1)=Posiciones_Puntos(:,1);
Record(:,2)=Posiciones_Puntos(:,2);

% Método LLS Básico
for punto=1:Num_puntos
% Calculo de ancla de referencia RS (Reference Selection)
[Ancla_r, A_r] =
calculo_ancla_referencia(d_e,Posiciones_Anclas,Num_anclas,punto);
x_e_LLS = metodo_LLS_basico(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto);
Record(punto,3)=x_e_LLS(1);
Record(punto,4)=x_e_LLS(2);
end

% Metodo NLS básico
x_e_NLS =
metodo_NLS_basico(Posiciones_Anclas,d_e,grid_posiciones,Distancia_ancla_grid)
;
Record(:,5)=x_e_NLS(:,1);
Record(:,6)=x_e_NLS(:,2);

% Metodo NLS con conocimiento de condición de visión
x_e_con_cond_vision =
metodo_NLS_con_cond_vision(Posiciones_Anclas,d_e,grid_posiciones,Distancia_ancla_grid,M_tipo);
Record(:,7)=x_e_con_cond_vision(:,1);
Record(:,8)=x_e_con_cond_vision(:,2);

% Método Bounding Box
x_bounding_box = bounding_box_gen(Posiciones_Anclas,d_e);
Record(:,9)=x_bounding_box(:,1);
Record(:,10)=x_bounding_box(:,2);

% Método B-WLS
for punto=1:Num_puntos
% Calculo de ancla de referencia RS (Reference Selection)
[Ancla_r, A_r] =
calculo_ancla_referencia(d_e,Posiciones_Anclas,Num_anclas,punto);
x_e_BWLS = metodo_BWLS(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto);
Record(punto,11)=x_e_BWLS(1);
Record(punto,12)=x_e_BWLS(2);
x_M(punto,:)=x_e_BWLS;
end

% Método BB_NLS
x_e_BB_NLS =
metodo_BB_NLS(Posiciones_Anclas,d_e,x_bounding_box,grid_posiciones,Distancia_ancla_grid);
Record(:,13)=x_e_BB_NLS(:,1);
Record(:,14)=x_e_BB_NLS(:,2);

% Método BB-NLS-C
x_e_BB_NLS_C = metodo_BB_NLS_C(Posiciones_Anclas,d_e,x_bounding_box,grid_posiciones,Distancia_ancla_grid);
Record(:,17)=x_e_BB_NLS_C(:,1);
Record(:,18)=x_e_BB_NLS_C(:,2);

% Método B-WLS-C

```

```

for punto=1:Num_puntos
% Calculo de ancla de referencia RS (Reference Selection)
[Ancla_r, A_r] =
calculo_ancla_referencia(d_e,Posiciones_Anclas,Num_anclas,punto);
x_bwls_c = metodo_BWLS_C(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto);
Record(punto,15)=x_bwls_c(1);
Record(punto,16)=x_bwls_c(2);
end

% Método B-WLS-R
for punto=1:Num_puntos
% Calculo de ancla de referencia RS (Reference Selection)
[Ancla_r, A_r] =
calculo_ancla_referencia(d_e,Posiciones_Anclas,Num_anclas,punto);
x_bwls_r = metodo_BWLS_r(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto,x_M);
Record(punto,19)=x_bwls_r(1);
Record(punto,20)=x_bwls_r(2);
end

% Método BB-NLS-R
x_e_BB-NLS_R =
metodo_BB-NLS(Posiciones_Anclas,d_e,x_M,grid_posiciones,Distancia_ancla_grid)
;
Record(:,21)=x_e_BB-NLS_R(:,1);
Record(:,22)=x_e_BB-NLS_R(:,2);

% Exportacion a hoja Excel
xlswrite('MedidasExtraidas',Record, 'Estimaciones');
xlswrite('MedidasExtraidas',M_error, 'Errores');
xlswrite('MedidasExtraidas',M_tipo, 'TipoMedida');

toc

```

B) Fichero orquestador_metodos_med_reales.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: orquestador_metodos_med_reales.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código encargado de llamar
%%%                a los diferentes métodos usados para analizar las medidas
%%%                reales.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
close all, clear all
tic
format short
% Generación de datos base
Ancla1=xlsread('A','A1');
Ancla2=xlsread('A','A2');
Ancla3=xlsread('A','A4');
Ancla4=xlsread('A','A5');
Ancla5=xlsread('A','A6');
Ancla6=xlsread('A','A7');
Posiciones_Anclas=xlsread('A','ANCLAS');
Posiciones_Puntos=xlsread('A','POSICIONES');
M_tipo=xlsread('MedidasExtraidas','TipoMedida_reales');
Num_puntos=23;
Num_anclas=6;

```

```

% Cálculo de vector de distancias a posiciones aleatorias
Distancia_ancla_posicion =
calc_distancia(Posiciones_Anclas,Posiciones_Puntos);

% Cálculo del grid
grid_posiciones=[];
rango_posiciones_x=0.5:0.1:9;
rango_posiciones_y=0.5:0.1:7;
grid_posiciones = genera_grid(rango_posiciones_x,rango_posiciones_y);

% Distancia anclas - puntos del grid
Distancia_ancla_grid = calc_distancia(Posiciones_Anclas,grid_posiciones);

% Generacion de tabla de las distancias estimadas
for j=1:Num_puntos
    DistanciaEstimada_ancla_posicion(1,j) = Ancla1(j,10);
end

for j=1:Num_puntos
    DistanciaEstimada_ancla_posicion(2,j) = Ancla2(j,1);
end

for j=1:Num_puntos
    DistanciaEstimada_ancla_posicion(3,j) = Ancla3(j,11);
end

for j=1:Num_puntos
    DistanciaEstimada_ancla_posicion(4,j) = Ancla4(j,1);
end

for j=1:Num_puntos
    DistanciaEstimada_ancla_posicion(5,j) = Ancla5(j,1);
end

for j=1:Num_puntos
    DistanciaEstimada_ancla_posicion(6,j) = Ancla6(j,1);
end

% Para facilitar uso
d_e=DistanciaEstimada_ancla_posicion;
d_r=Distancia_ancla_posicion;

% Calculo de matriz error
M_error=d_r-d_e;

% Matriz donde se van a guardar los resultados
Record=[];

% Se exportan las coordenadas reales del punto a analizar
Record(:,1)=Posiciones_Puntos(:,1);
Record(:,2)=Posiciones_Puntos(:,2);

% Método LLS Básico
for punto=1:Num_puntos
% Calculo de ancla de referencia RS (Reference Selection)
[Ancla_r, A_r] =
calculo_ancla_referencia(d_e,Posiciones_Anclas,Num_anclas,punto);
x_e_LLS = metodo_LLS_basico(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto);

```

```

Record(punto,3)=x_e_LLS(1);
Record(punto,4)=x_e_LLS(2);
end

% Metodo NLS básico
x_e_NLS =
metodo_NLS_basico(Posiciones_Anclas,d_e,grid_posiciones,Distancia_ancla_grid)
;
Record(:,5)=x_e_NLS(:,1);
Record(:,6)=x_e_NLS(:,2);

% Metodo NLS con conocimiento de condicion de visión
x_e_con_cond_vision =
metodo_NLS_con_cond_vision(Posiciones_Anclas,d_e,grid_posiciones,Distancia_ancla_grid,M_tipo');
Record(:,7)=x_e_con_cond_vision(:,1);
Record(:,8)=x_e_con_cond_vision(:,2);

% Método Bounding Box
x_bounding_box = bounding_box_gen(Posiciones_Anclas,d_e);
Record(:,9)=x_bounding_box(:,1);
Record(:,10)=x_bounding_box(:,2);

% Método B-WLS
for punto=1:Num_puntos
% Calculo de ancla de referencia RS (Reference Selection)
[Ancla_r, A_r] =
calculo_ancla_referencia(d_e,Posiciones_Anclas,Num_anclas,punto);
x_e_BWLS = metodo_BWLS(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto);
Record(punto,11)=x_e_BWLS(1);
Record(punto,12)=x_e_BWLS(2);
x_M(punto,:)=x_e_BWLS;
end

% Método BB-NLS
x_e_BB_NLS =
metodo_BB_NLS(Posiciones_Anclas,d_e,x_bounding_box,grid_posiciones,Distancia_ancla_grid);
Record(:,13)=x_e_BB_NLS(:,1);
Record(:,14)=x_e_BB_NLS(:,2);

% Método BB-NLS-C
x_e_BB_NLS_C = metodo_BB_NLS_C(Posiciones_Anclas,d_e,x_bounding_box,grid_posiciones,Distancia_ancla_grid);
Record(:,17)=x_e_BB_NLS_C(:,1);
Record(:,18)=x_e_BB_NLS_C(:,2);

% Método B-WLS-C
for punto=1:Num_puntos
% Calculo de ancla de referencia RS (Reference Selection)
[Ancla_r, A_r] =
calculo_ancla_referencia(d_e,Posiciones_Anclas,Num_anclas,punto);
x_bwls_c = metodo_BWLS_C(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto);
Record(punto,15)=x_bwls_c(1);
Record(punto,16)=x_bwls_c(2);
end

% Método B-WLS-R
for punto=1:Num_puntos
% Calculo de ancla de referencia RS (Reference Selection)

```

```
[Ancla_r, A_r] =
calculo_ancla_referencia(d_e, Posiciones_Anclas, Num_anclas, punto);
x_bwls_r = metodo_BWLS_r(Posiciones_Anclas, d_e, Ancla_r, A_r, punto, x_M);
Record(punto,19)=x_bwls_r(1);
Record(punto,20)=x_bwls_r(2);
end

% Método BB-NLS-R
x_e_BB_NLS_R =
metodo_BB_NLS(Posiciones_Anclas, d_e, x_M, grid_posiciones, Distancia_ancla_grid)
;
Record(:,21)=x_e_BB_NLS_R(:,1);
Record(:,22)=x_e_BB_NLS_R(:,2);

% Exportacion a hoja Excel
xlswrite('MedidasExtraidas', Record, 'Estimaciones_reales');

toc
```

C) Fichero posiciones_puntos.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: posiciones_puntos.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%%                 del cálculo de las posiciones de los puntos.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Cálculo de posiciones aleatorias de los puntos a estimar
function [Posiciones_Puntos] =
posiciones_puntos(Num_puntos, min_x, max_x, min_y, max_y)

Posiciones_Puntos=[];
Posiciones_Puntos(:,1) = (max_x-min_x).*rand(Num_puntos,1) + min_x;
Posiciones_Puntos(:,2) = (max_y-min_y).*rand(Num_puntos,1) + min_y;

end
```

D) Fichero calc_distancia.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: calc_distancia.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%%                 del cálculo de la distancia entre dos matrices.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [Distancia] = calc_distancia (Posiciones_Anclas, Posiciones_Puntos)
Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
Num_puntos=length(Posiciones_Puntos);
    for i=1:Num_anclas
```

```

A = [Posiciones_Anclas(i,1) Posiciones_Anclas(i,2)];
for x=1:Num_puntos
    X = [Posiciones_Puntos(x,1) Posiciones_Puntos(x,2)];
    Distancia(i,x) = pdist2(X,A,'euclidean');
end
end

```

```
end
```

E) Fichero calculo_ancla_referencia.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: calculo_ancla_referencia.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%%                del cálculo del ancla de referencia.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [Ancla_r, A_r] =
calculo_ancla_referencia(DistanciaEstimada_ancla_posicion,Posiciones_Anclas,N
um_anclas,punto)
for Ancla_r=1:Num_anclas
    for i=1:Num_anclas
        v_dis(i)=DistanciaEstimada_ancla_posicion(i, punto);
    end
end
Ancla_r = find(v_dis==min(v_dis),1);
A_r = Posiciones_Anclas(Ancla_r,:);
end

```

F) Fichero genera_grid.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: genera_grid.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%%                del cálculo del grid de posiciones.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [grid_posiciones] =
genera_grid(rango_posiciones_x,rango_posiciones_y)

    for j=1:length(rango_posiciones_y)
        for i=1:length(rango_posiciones_x)
            grid_posiciones(length(rango_posiciones_x)*(j-
1)+i,1)=rango_posiciones_x(i);
            grid_posiciones(length(rango_posiciones_x)*(j-
1)+i,2)=rango_posiciones_y(j);
        end
    end
end

```

G) Fichero alavi_pahlavan.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: alavi_pahlavan.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%%                del metodo de Alavi y Pahlavan.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [e_t_w,E_w] = alavi_pahlavan (M_anclas, M_puntos)

% Generación de datos base
Posiciones_Anclas=M_anclas;
Posiciones_Puntos=M_puntos;
Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
Num_puntos=length(Posiciones_Puntos);

for i=1:Num_anclas
    A = [Posiciones_Anclas(i,1) Posiciones_Anclas(i,2)];
    for x=1:Num_puntos
        X = [Posiciones_Puntos(x,1) Posiciones_Puntos(x,2)];
        Distancia_ancla_posicion(i,x) = pdist2(X,A,'euclidean');
    end
end

% Modelado de error DDP
mean_m = 0.09; std_m = 13.6/100;
e_M_w =
mean_m*ones(Num_anclas,Num_puntos)+std_m*randn(Num_anclas,Num_puntos).*log10(
1+Distancia_ancla_posicion);
E_w=[];

% Ocurrencia de condición UDP
Pfar_U = 0.620; Pclose_U = 0.064;
for i=1:Num_anclas
    for j=1:Num_puntos
        if Distancia_ancla_posicion(i,j)>10
            P_U_w=Pfar_U;
        else
            P_U_w=Pclose_U;
        end
        bina=round(rand);
        E_w(i,j) = round((1-P_U_w)*bina+P_U_w*(1-bina));
    end
end
mean_udp = 0.96; std_udp = 60.4/100;

e_U_w = mean_udp+std_udp*randn(Num_anclas,Num_puntos);
% Error total
e_t_w = e_M_w + E_w.*e_U_w;

end

```



```

function [x_e_BB_NLS] =
metodo_BB_NLS(Posiciones_Anclas,d_e,x_bounding_box,grid_posiciones,Distancia_
ancla_grid)
Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
Num_puntos=length(d_e);
% BB-NLS
d_bounding_box = zeros(Num_anclas,Num_puntos);
% Distancia entre estimacion bounding_box y cada ancla
for j=1:Num_puntos
    for k=1:Num_anclas
        d_bounding_box(k,j)=
pdist2(x_bounding_box(j,:),Posiciones_Anclas(k,:), 'euclidean');
    end
end
sigma_alt_1 = abs(d_e - d_bounding_box);
BB_NLS=zeros(length(grid_posiciones),Num_puntos);
punto_BB_NLS=zeros(Num_puntos,1);
    for x=1:Num_puntos
        for i=1:Num_anclas
            for pts=1:length(grid_posiciones)
                BB_NLS(pts,x)=BB_NLS(pts,x)+(1/sigma_alt_1(i,x))*(d_e(i,x) -
Distancia_ancla_grid(i,pts))^2;
            end
        end
        punto_BB_NLS(x) = find(BB_NLS(:,x)==min(BB_NLS(:,x)),1);
    end

x_e_BB_NLS=grid_posiciones(punto_BB_NLS,:);

end

```

J) Fichero metodo_BB_NLS_C.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: metodo_BB_NLS_C.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%%                  del metodo BB-NLS-C.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [x_e_BB_NLS_C] =
metodo_BB_NLS_C(Posiciones_Anclas,d_e,x_bounding_box,
grid_posiciones,Distancia_ancla_grid)

% Calculos de numero de anclas y puntos
Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
Num_puntos=length(d_e);
% Distancia entre estimacion bounding_box y cada ancla
d_bounding_box = zeros(Num_anclas,Num_puntos);
for j=1:Num_puntos
    for k=1:Num_anclas
        d_bounding_box(k,j)=
pdist2(x_bounding_box(j,:),Posiciones_Anclas(k,:), 'euclidean');
    end
end

```

```

end

sigma_alt_3 = abs(d_e - d_bounding_box);
m=sigma_alt_3.*d_e;

W_alt_3=zeros(Num_anclas,Num_puntos);
for punto=1:Num_puntos
    for i=1:Num_anclas
        if m(i,punto)<= 0.45
            peso_alt_3=1/min(sigma_alt_3(i,:));
        else
            peso_alt_3=1/sigma_alt_3(i,punto);
        end
        W_alt_3(i,punto)=peso_alt_3;
    end
end

M_alt_3=zeros(length(grid_posiciones),Num_puntos);
for x=1:Num_puntos
    for i=1:Num_anclas
        for pts=1:length(grid_posiciones)
            M_alt_3(pts,x)=M_alt_3(pts,x)+W_alt_3(i,x)*(d_e(i,x) -
Distancia_ancla_grid(i,pts))^2;
        end
    end
    punto_alt_3(x) = find(M_alt_3(:,x)==min(M_alt_3(:,x)),1);
end

x_e_BB_NLS_C=grid_posiciones(punto_alt_3,:);

end

```

K) Fichero metodo_BWLS.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: metodo_BWLS.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%%                del metodo B-WLS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [x_e] = metodo_BWLS(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto)
Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
Num_puntos=length(d_e);
A_p=[];
% Generacion de las matrices
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        A_p = [ A_p ; Posiciones_Anclas(i,:)];
    end
end
A_3 = A_p - A_r.*ones(Num_anclas-1,2);
k_r_i = [];
k_r = A_r(1).^2+A_r(2).^2;
% Calculo k_i
for i=1:Num_anclas

```

```

    if i ~= Ancla_r
        k_i(i) = Posiciones_Anclas(i,1).^2+Posiciones_Anclas(i,2).^2;
    end
end
% Calculo k_r_i
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        k_r_i(i) = k_r - k_i(i);
    end
end
% Calculo de P_3
P_3=[];
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        P_3 = [ P_3 ; d_e(Ancla_r,punto).^2-d_e(i,punto).^2-k_r_i(i)];
    end
end
% Bounding Box
x_bounding_box = bounding_box_gen(Posiciones_Anclas,d_e);
d_bounding_box = zeros(Num_anclas,Num_puntos);
% Distancia entre estimación bounding_box y cada ancla
for j=1:Num_puntos
    for k=1:Num_anclas
        d_bounding_box(k,j)=
pdist2(x_bounding_box(j,:),Posiciones_Anclas(k,:), 'euclidean');
    end
end
sigma = d_e(:,punto) - d_bounding_box(:,punto);
M_diag=[];
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        M_diag=[M_diag,4*sigma(i).^2*d_e(i,punto).^2+2*sigma(i).^4];
    end
end
C=4*d_e(Ancla_r,punto).^2*sigma(Ancla_r).^2+2*sigma(Ancla_r).^4+diag(M_diag);
W=C^(-1);
% Posicion estimada
x_e = 0.5*(A_3'*W*A_3)^(-1)*A_3'*W*P_3;
end

```

L) Fichero metodo_BWLS_R.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: metodo_BWLS_R.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%%                del metodo B_WLS_R.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [x_e_bwls_r] =
metodo_BWLS_r(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto,x_M)

Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
Num_puntos=length(d_e);

A_p=[];

```



```

function [x_e_LLS] =
metodo_LLS_basico(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto)
Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
% Generacion de las matrices
A_p=[];
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        A_p = [ A_p ; Posiciones_Anclas(i,:)];
    end
end
A_3 = A_p - A_r.*ones(Num_anclas-1,2);
k_r_i = [];
k_r = A_r(1).^2+A_r(2).^2;
% Calculo k_i
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        k_i(i) = Posiciones_Anclas(i,1).^2+Posiciones_Anclas(i,2).^2;
    end
end
% Calculo k_r_i
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        k_r_i(i) = k_r - k_i(i);
    end
end
% Calculo de P_3
P_3=[];
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        P_3 = [ P_3 ; d_e(Ancla_r,punto).^2-d_e(i,punto).^2-k_r_i(i)];
    end
end
x_e_LLS = 0.5*(A_3'*A_3)^(-1)*A_3'*P_3;

end

```

N) Fichero metodo_NLS_basico.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: metodo_NLS_basico.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%%                del método NLS básico.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [x_e_NLS] =
metodo_NLS_basico(Posiciones_Anclas,d_e,grid_posiciones,Distancia_ancla_grid)
% Calculo de numeros de puntos y anclas
Num_puntos=length(d_e);
Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
% Metodo NLS
M_NLS=zeros(length(grid_posiciones),Num_puntos);
punto_NLS=zeros(Num_puntos,1);
    for x=1:Num_puntos
        for i=1:Num_anclas
            for pts=1:length(grid_posiciones)

```

```

        M_NLS(pts,x)=M_NLS(pts,x)+(d_e(i,x) -
Distancia_ancla_grid(i,pts))^2;
    end
end
% Índice del menor de los valores calculados
punto_NLS(x) = find(M_NLS(:,x)==min(M_NLS(:,x)),1);
end
% Usando el índice calculado, se calcula el valor de ese índice
x_e_NLS=grid_posiciones(punto_NLS,:);

end

```

O) Fichero metodo_NLS_con_cond_vision.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Nombre del archivo: metodo_NLS_con_cond_vision.m
%% Fecha: 15/06/2021
%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%              del método NLS con conocimiento de condición de visión.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [x_e_bin] =
metodo_NLS_con_cond_vision(Posiciones_Anclas,d_e,grid_posiciones,Distancia_an
cla_grid,M_tipo)

Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
Num_puntos=length(d_e);

% Decision binaria en función de error
W_b=zeros(Num_anclas,Num_puntos);
for punto=1:Num_puntos
    for i=1:Num_anclas
        % Matriz aleatoria binaria
        if M_tipo(i,punto) < 1
            peso=1;
        else
            peso=0.005;
        end
        W_b(i,punto)=peso;
    end
end
% Métodos NLS
M_BIN=zeros(length(grid_posiciones),Num_puntos);
for x=1:Num_puntos
    for i=1:Num_anclas
        for pts=1:length(grid_posiciones)
            M_BIN(pts,x)=M_BIN(pts,x)+W_b(i,x)*(d_e(i,x) -
Distancia_ancla_grid(i,pts))^2;
        end
    end
    punto_bin(x) = find(M_BIN(:,x)==min(M_BIN(:,x)),1);
end

x_e_bin=grid_posiciones(punto_bin,:);

```

end

P) Fichero metodo_B_WLS_C.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: metodo_B_WLS_C.m
%%% Fecha: 15/06/2021
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para la ejecución
%%%                del metodo B-WLS-C.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [x_e_alt_2] = metodo_BWLS_C(Posiciones_Anclas,d_e,Ancla_r,A_r,punto)

Num_anclas=length(Posiciones_Anclas);
Num_puntos=length(d_e);

A_p=[];
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        A_p = [ A_p ; Posiciones_Anclas(i,:)];
    end
end
A_3 = A_p - A_r.*ones(Num_anclas-1,2);
k_r_i = [];
k_r = A_r(1).^2+A_r(2).^2;
% Calculo k_i
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        k_i(i) = Posiciones_Anclas(i,1).^2+Posiciones_Anclas(i,2).^2;
    end
end
% Calculo k_r_i
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        k_r_i(i) = k_r - k_i(i);
    end
end
% Calculo de P_3
P_3=[];
for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r
        P_3 = [ P_3 ; d_e(Ancla_r,punto).^2-d_e(i,punto).^2-k_r_i(i)];
    end
end

% Bounding Box
x_bounding_box = bounding_box_gen(Posiciones_Anclas,d_e);
d_bounding_box = zeros(Num_anclas,Num_puntos);
% Distancia entre estimación bounding_box y cada ancla
for j=1:Num_puntos
    for k=1:Num_anclas
        d_bounding_box(k,j)=
pdist2(x_bounding_box(j,:),Posiciones_Anclas(k,:), 'euclidean');
    end
end
end

```

```
% Distancia entre estimacion bounding_box y cada ancla
sigma_alt_2 = d_e(:,punto) - d_bounding_box(:,punto);
M_diag_alt_2=[];

for i=1:Num_anclas
    if abs(sigma_alt_2(i))< 0.45
        sigma_alt_2(i)=min(abs(sigma_alt_2(:)));
    end
end

for i=1:Num_anclas
    if i ~= Ancla_r

M_diag_alt_2=[M_diag_alt_2,4*sigma_alt_2(i).^2*d_e(i,punto).^2+2*sigma_alt_2(
i).^4];
        end
    end
C_alt_2=4*d_e(Ancla_r,punto).^2*sigma_alt_2(Ancla_r).^2+2*sigma_alt_2(Ancla_r
).^4+diag(M_diag_alt_2);
W_alt_2=C_alt_2^(-1);
% Posicion estimada
x_e_alt_2 = 0.5*(A_3'*W_alt_2*A_3)^(-1)*A_3'*W_alt_2*P_3;

end
```


REFERENCIAS

- [1] Eva Lagunas Targarona. Prof.: Dr. Monste Nájjar Martón. Proyecto Final de Carrera. Estimación conjunta de TOA y DOA en sistemas UWB para localización. [consulta: 21 junio 2021] Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7325/PFC_EvaLagunas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [2] Autor: Juan Luis Martín Porras. Tutora: Dra. Eva María Arias de Reyna Domínguez. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Sevilla. *Estudio de un Esquema de Adquisición Temporal de Complejidad Ajustable para UWB*. Sevilla, 2014 [consulta: 10 junio 2021].
- [3] Federal Communications Commission. FCC 02-48. 22 de abril del 2002 [consulta: 10 junio 2021] Disponible en: https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Orders/2002/fcc02048.pdf
- [4] Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida. Tutora: Dra. Eva María Arias de Reyna Domínguez. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla. *Evaluación de la resistencia de un método de localización para un sistema UWB frente a las medidas sin línea de visión directa*. Sevilla, 2018 [consulta: 10 junio 2021].
- [5] Autor: Mario Casas González. Profesores: Dr. Carlos Crespo Cadenas, Dr. Rashid Mehmood. Proyecto Fin de Carrera Universidad de Sevilla. *Localización Precisa de Objetos Indoor mediante señales UWB y técnicas TOA*. Sevilla, 2007.
- [6] *Ultra-wideband (UWB o Banda ultra ancha)*. Ingeniatic, 2011 [consulta: 8 junio 2021] Disponible en: <https://www.etsist.upm.es/estaticos/ingeniatic/index.php/tecnologias/item/639-ultra-wideband-uw-b-o-banda-ultra-ancha.html>
- [7] Autor: Gonzalo Llano Ramírez. Director: Dr. Juan Reig Pascual. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia *Modelado en frecuencia del canal UWB y su aplicación en el análisis de técnicas de modulación adaptativa en sistemas MB-OFDM UWB para redes WPAN*. Valencia, 2010 [consulta: 10 junio 2021].
- [8] Daniela Ximena González Caamaño. Estudio comparativo del estandar UltraWide Band (UWB) frente a bluetooth y zigbee. Profesor patrocinante: Sr. Néstor Fierro Morineaud. 2011. [consulta: 11 junio 2021] Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/bmficg643e/doc/bmficg643e.pdf>
- [9] Decisión de Ejecución de la Comisión, de 7 de octubre de 2014, que modifica la Decisión 2007/131/CE por la que se autoriza la utilización armonizada del espectro radioeléctrico para los equipos que utilizan tecnología de banda ultraancha en la Comunidad. Publicado en DOUE, núm. 293, de 9 de octubre de 2014, páginas 48 a 56. [consulta: 7 junio 2021] Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2014-83038>
- [10] *El futuro de la tecnología UWB y estándar IEEE 802.15.4z*. RealTrac Technologies, 2019 [consulta: 11 junio 2021] Disponible en: <https://real-trac.com/es/company/blog/the-future-of-uw-b-technology-and-the-ieee-802-15-4-z/>
- [11] *Members*. UWB Alliance, 2019 [consulta: 8 junio 2021] Disponible en: <https://uwballiance.org/#MembersUWB>
- [12] Autor: Tamara Rivera Robles. Tutora: Dra. Eva María Arias de Reyna Domínguez. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Sevilla. *Localización en interior con UWB. Técnicas de estimación de tiempo de llegada en*

- detector de energía*. Sevilla, 2014 [consulta: 10 junio 2021].
- [13] Homayoun Nikookar, Ramjee Prasad. Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications. Springer Science & Business Media. 2008 [consulta: 10 junio 2021].
- [14] Autor: Luis De la Calle Rozadillas. Tutora: Dra. Eva María Arias de Reyna Domínguez. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla. *Evaluación de dispositivos UWB para la localización en interiores con medidas de distancia*. Sevilla, 2017 [consulta: 10 junio 2021].
- [15] Temas Avanzados en comunicaciones TAC (2007-08), Univ. Autónoma de Madrid. [consulta: 20 junio 2021] Disponible en: http://arantxa.ii.uam.es/~tac/Documentacion/Tema_IV_Introduccion_UWB_ver0.pdf
- [16] Sinan Gezici, member IEEE, and H. Vincent Poor, fellow IEEE. *Position Estimation by Ultra-Wide-Band Signals*. Vol. 97, No. 2, 2009 [consulta: 10 junio 2021].
- [17] Jordi Diaz. *Tecnología Ultra-WideBand (UWB) La revolución a corto alcance*. Center for Communications and Signal Processing Research, New Jersey Institute of Technology. [consulta: 10 junio 2021] BURAN nº19 abril 2003. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/9890/Article010.pdf>
- [18] Garcia-Pardo, Concepcion & Cano, Maria Victoria & Molina-Garcia-Pardo, Jose-Maria & Víctor Rodríguez, José & Pascual García, Juan & Juan-Llacer, Leandro. (2010) [consulta: 10 junio 2021]. *Sistema de comunicaciones UWB*.
- [19] ETSI EN 302 065-1 v2.1.1 (2016-11) Harmonised European Standard. Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Part 1: Requirements for Generic UWB applications. [consulta: 10 junio 2021] Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302000_302099/30206501/02.01.01_60/en_30206501v020101p.pdf
- [20] *UWB: la revolución de las redes personales*. En: Comunicaciones World nº 200, IDG Communications S.A, 2005 [consulta: 10 junio 2021]. Disponible en: <https://www.ramonmillan.com/tutoriales/uwb.php>
- [21] *WAN - Ultra Narrow Band (UNB)* [consulta: 10 junio 2021]. Disponible en: <https://www.m2comm.co/front-page/technology/wan-ultra-narrow-band-unb/>
- [22] LifeWire. Bradley Mitchell. *What does UWB mean?* Julio 2018 [consulta: 10 junio 2021]. Disponible en: <https://www.lifewire.com/ultra-wide-band-817953>
- [23] Decawave SceneSor DWM1000 Module. Decawave. [consulta: 10 junio 2021] Disponible en: <http://www.decawave.com/products/dwm1000-module>
- [24] Wireless Sensor and Actuator Networks. Technologies, Analysis and Design. Autores: Roberto Verdone Davide Dardari Gianluca Mazzini Andrea Conti. Capítulo 8: Localisation and Time Synchronisation Techniques for WSANs. 2008 [consulta: 10 junio 2021].
- [25] A Survey on TOA Based Wireless Localization and NLOS Mitigation Techniques. Autores: Ismail Güvenç, Chia-Chin Chong. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 11, No. 3, Third Quarter, 2009 [consulta: 1 junio 2021].
- [26] Weighted Least-squares by Bounding-box (B-WLS) for NLOS Mitigation of Indoor Localization. Autores: Yuan Yang, Yubin Zhao, Marcel Kyas. Department of Mathematics and Computer Science, Freie Universität Berlin, 2013 [consulta: 11 junio 2021].

- [27] Modeling of the TOA-based Distance Measurement Error Using UWB Indoor Radio Measurements. Autores: Bardia Alavi, Student Member, IEEE, and Kaveh Pahlavan, Fellow, IEEE. IEEE Communications Letters, vol. 10, no. 4, April 2006 [consulta: 11 junio 2021].

