

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

Evaluación de la resistencia de un método de
localización para un sistema UWB frente a las
medidas sin línea de visión directa

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, 2018



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

**Evaluación de la resistencia de un método de
localización para un sistema UWB frente a las
medidas sin línea de visión directa**

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, 2018

Trabajo Fin de Grado: Evaluación de la resistencia de un método de localización para un sistema UWB frente a las medidas sin línea de visión directa

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, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi padre, porque mis logros los sentía y celebraba como suyos. Y en gran parte, este lo es.

Agradecimientos

Con este proyecto pongo fin a una dura y a la vez bonita etapa de mi vida, en la que mi formación como persona y como ingeniero han ido de la mano.

Gracias, en primer lugar, a Dña. Eva María Arias de Reyna Domínguez, por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto y ayudarme en el desarrollo del mismo.

Gracias a todos los compañeros y amigos que han hecho de mi paso por el grado una aventura insuperable.

Y gracias, especialmente, a mi familia, por su constante apoyo, por siempre creer en mí y por desear con tantas fuerzas como yo alcanzar el sueño de ser ingeniero. A mi madre, a mi padre, a mi hermano, a mis abuelos y abuelas, gracias de corazón.

Gracias a todos.

Pablo Manuel De Rojas Malpartida

Sevilla, 2018

Resumen

Los sistemas Ultra Wide-Band (UWB) llevan desde los años ochenta en constante crecimiento y desarrollo. 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 están profundizando en el estudio de su uso en sistemas de sensores.

A medida que la tecnología UWB ha ido alcanzando relevancia, distintos organismos han ido regulando y estandarizando su uso para promover su implantación en la vida cotidiana.

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 reales, se va a evaluar la resistencia del método de multilateración single-hop para un sistema UWB frente a medidas sin línea de visión directa.

Abstract

Ultra Wide-Band (UWB) systems have been in constant growth and development since the decade of the eighties. This particular technology stands out because of a great bandwidth, great ability to provide accurate distance 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 companies are deeping into the study of its use in sensor systems.

As UWB technology has been gaining relevance, it has been standardized by different organizations, to foster its establishment in the day to day life.

The origin uses and characteristics of the technology are going to be analysed throughout the project, and the resistance of the single-hop multilateration method for an UWB system against Non Line Of Sight (NLOS) measurements, relying on a set of real measurements, it's going to be assessed.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xxii
1 Introducción	1
2 Marco histórico de UWB	3
3 UWB	7
3.1 <i>Tipos de señal</i>	7
3.2 <i>Fundamentos teóricos</i>	10
3.2.1 Ancho de banda	10
3.2.2 Canal	12
3.2.3 Máscaras de emisión	14
3.3 <i>Ventajas y desventajas de la tecnología UWB</i>	17
3.4 <i>Aplicaciones</i>	20
3.5 <i>Comparativa con otras tecnologías similares</i>	21
4 Algoritmo empleado	23
5 Descripción del material	27
5.1 <i>Componentes</i>	27
5.2 <i>Estimación de la distancia</i>	29
5.2.1 Proceso de emparejamiento	30
5.2.2 Intercambio de datos	32
6 Desarrollo práctico	35
6.1 <i>Entorno de medidas</i>	35
6.2 <i>Gráficas de implementación del método</i>	38
6.3 <i>Gráficas del conjunto de puntos.</i>	44
6.4 <i>Gráficas de puntos concretos añadiendo medidas NLOS</i>	49
6.5 <i>Gráficas RMSE</i>	53
7 Conclusión	59
8 Anexos	61
8.1 <i>Anexo A</i>	61
8.2 <i>Anexo B</i>	66
Referencias	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3–1. Valor del ancho de banda realtivo de diferentes tipos de sistemas	14
Tabla 3–2. Límite de emisiones de UWB en interior según FCC	18
Tabla 3–3. Límite de emisiones de UWB en interior según EC	19
Tabla 3–4. Comparativa de diferentes características de Wi-Fi, Bluetooth y Ultra Wide-Band	24
Tabla 5–1. Modos de trabajo del EVK1000 y sus características	33
Tabla 6–1. Relación entre las distintas configuraciones y el porcentaje de anclas NLOS-DDP	44
Tabla 6–2. Representación de los valores máximo, mínimo y media de la longitud del vector error entre las posicones real y estimada según tipo de canal	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Bandas ISM para WLAN en EE.UU.	6
Figura 2-2. Bandas ISM para WLAN en Europa	6
Figura 3-1. Respuesta de un pulso Ultra Wide-Band en el dominio del tiempo	9
Figura 3-2. Respuesta Ultra Wide-Band en el dominio frecuencial	10
Figura 3-3. Respuesta UWB, OFDM y CDMA en el dominio del tiempo	11
Figura 3-4. Respuesta CDMA en el dominio frecuencial	11
Figura 3-5. Definición del ancho de banda absoluto, frecuencia central, mínima y máxima	13
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 Tf el intervalo de muestreo	14
Figura 3-7. Efecto del incremento del ancho de banda sobre la capacidad teórica máxima	15
Figura 3-8. Esquema de tipos de canal según visión entre transmisor y receptor	16
Figura 3-9. Máscara espectral de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) para sistemas de comunicaciones en interior	17
Figura 3-10. Máscara espectral de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) para sistemas de comunicaciones en interior	17
Figura 3-11. Comparación de la densidad espectral de potencia y ancho de banda de diferentes sistemas	20
Figura 3-12. Comparación de la amplitud y duración del pulso de diferentes sistemas	20
Figura 4-1. Ejemplo de multilateración de tres nodos	26
Figura 5-1. Elementos del EVK1000 Evaluation Kit	29
Figura 5-2. Parte frontal de la placa de evaluación EVB1000	30
Figura 5-3. Parte posterior de la placa de evaluación EVB1000	31
Figura 5-4. Placa con S4 a on.	32
Figura 5-5. Placa con S4 a off.	33
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	36
Figura 6-1. Distribución de anclas y puntos en la sala	39
Figura 6-2. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 2, 3 y 4 para el punto 22	40

Figura 6-3. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3 y 4 para el punto 22	41
Figura 6-4. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3, 4 y 5 para el punto 22	41
Figura 6-5. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3 y 4 para el punto 4	42
Figura 6-6. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 2, 3 y 4 para el punto 4	42
Figura 6-7. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 3, 5 y 6 para el punto 15	43
Figura 6-8. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3, 5 y 6 para el punto 15	43
Figura 6-9. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3 y para el punto 15	44
Figura 6-10. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3, 4 y 5 para el punto 15	44
Figura 6-11. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3 y 4 para el punto 15	45
Figura 6-12. Representación gráfica del error según porcentaje de medidas NLOS-DDP para el punto de estudio 15	45
Figura 6-13. Representación del error de todas las posiciones para las anclas 1, 4 y 6 según tipo de canal	46
Figura 6-14. Representación gráfica en barras del error donde se comparan los distintos tipos de casos	48
Figura 6-15. Representación de la longitud máxima del vector error de la Tabla 6-1	49
Figura 6-16. Representación de la longitud mínima del vector error de la Tabla 6-1	49
Figura 6-17. Representación de la longitud media del vector error de la Tabla 6-1	50
Figura 6-18. Representación conjunta de la longitud máxima, mínima y media del vector error de la Tabla 6-1	50
Figura 6-19. Comparación del error añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para el punto 1 de estudio	51
Figura 6-20. Comparación del error añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para el punto 3 de estudio	52
Figura 6-21. Comparación del error añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para el punto 4 de estudio	52
Figura 6-22. Comparación del error añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para el punto 5 de estudio.	53
Figura 6-23. Comparación del error añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para el punto 6 de estudio	53

Figura 6-24. Comparación del error de tres anclas LOS añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para cinco puntos diferentes	54
Figura 6-25. Comparación del error medio de tres anclas LOS añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP	54
Figura 6-26. Gráfica donde se muestra el RMSE de dos anclas LOS a las que se van añadiendo anclas NLOS-DDP	56
Figura 6-27. Gráfica donde se muestra el RMSE de tres anclas LOS a las que se van añadiendo anclas NLOS-DDP	57
Figura 6-28. RMSE en función de tres anclas LOS a las que se añade un ancla NLOS-UDP.	58
Figura 6-29. RMSE en función de tres anclas NLOS-DDP a las que se añade un ancla NLOS-UDP	59
Figura 9-1. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3 y 6 para el punto 16	63
Figura 9-2. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 2, 3 y 4 para el punto 16	64
Figura 9-3. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 2, 3 y 5 para el punto 6	64
Figura 9-4. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 3, 4 y 6 para el punto 14	65
Figura 9-5. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 3, 4, 5 y 6 para el punto 1.	65
Figura 9-6. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 2, 3, 4 y 6 para el punto 5	66
Figura 9-7. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 4, 5 y 6 para el punto 12	66
Figura 9-8. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 2, 4, 5 y 6 para el punto 8	67
Figura 9-9. Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 2, 4, 5 y 6 para el punto 16	67

Notación

UWB	Ultra Wide-Band
FCC	Federal Communications Commission
LTI	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

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 -

El uso de los sistemas de transmisión inalámbrica de Banda Ultra-Ancha (UWB) data de mucho tiempo atrás.

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 [11, 19].

El año 2002 marca un antes y un después en la evolución de la tecnología Ultra Wide-Band, ya que se publicaron por parte del FCC (*Federal Communications Commission*) de EE.UU. unas nuevas reglas bajo las cuales los sistemas UWB podían ser usados para aplicaciones de comunicaciones de datos personales. Es así como suscitó el gran interés de muchos colectivos diferentes gracias, sobre todo, al potencial de lograr una gran tasa de datos que se puede transmitir de forma inalámbrica con dispositivos de bajo coste. Además, esta tecnología permite compartir el espectro con otros sistemas, tanto de banda ancha como estrecha. Todo esto es posible gracias al uso de un gran ancho de banda y una densidad espectral de potencia extremadamente baja [11].

Concretamente, al mencionar el término UWB se hace referencia a una tecnología de transmisión vía radio basada en la transmisión de pulsos con unos tiempos de subida y bajada extremadamente cortos (entre algunas decenas de picosegundos y pocos nanosegundos), con una energía relativamente baja. A diferencia de las primeras transmisiones inalámbricas en las que la comunicación se realizaba mediante una señal a una frecuencia concreta (portadora) donde se incorporaba una información (moduladora) y donde el ancho de banda era bastante reducido, la transmisión por pulsos se traduce en el dominio de la frecuencia en un espectro de gran ancho de banda.

Gracias a este gran ancho de banda, y a las señales de baja potencia, los sistemas UWB presentan características tales como altas capacidades, resistencia al multitrayecto y a las 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 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.

Sin embargo, una de las limitaciones a las que se enfrentan los sistemas inalámbricos de localización en interiores basados en medidas de distancia, consiste en que las medidas con obstrucción de la línea de visión directa pueden presentar errores importantes. Las señales de Banda Ultra Ancha tienen una capacidad de penetración de obstáculos mayor que otras tecnologías, por lo que pueden mantener una buena precisión incluso en ciertos casos de obstrucción.

El proyecto que se desarrolla consiste en implementar el algoritmo de multilateración single-hop de localización para un sistema UWB, y ponerlo a prueba en una variedad de situaciones, para evaluar el efecto de las medidas sin línea de visión directa sobre la precisión de la estimación de posición. 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 de la tecnología, características y aplicaciones.
- 4.- Algoritmo empleado: Descripción del algoritmo single-hop de multilateración.
- 5.- Descripción del material: Descripción del EVK1000 *Evaluation Kit* y su funcionamiento.
- 6.- Desarrollo práctico: Exposición del estudio y análisis práctico de la tecnología.
- 7.- Conclusión.
- 8.- Anexos: Código usado para el análisis de las muestras prácticas y ejemplos gráficos para ampliar la información del capítulo 3.

2 MARCO HISTÓRICO DE UWB

La primera constancia histórica de empleo de UWB data de 1901, cuando Guglielmo Marconi transmitió secuencias de código Morse a través del océano Atlántico usando transmisores de radio por chispas [6, 12]. 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.

Es por ello que hay dudas respecto a quién atribuirle el honor de ser el inventor de Ultra Wide-Band (UWB), aunque fue Dr. Gerald F. Ross el primero que demostró la factibilidad de usar señales UWB para aplicaciones de radar y comunicaciones entre 1960 e inicios de 1970. Asimismo, el Dr. Ross fue reconocido por la Academia Nacional de Ingeniería (EE.UU.) por su esfuerzo en los estudios sobre UWB y elegido miembro integrante de la Academia en 1995 [7].

Se podría afirmar entonces que el origen de la tecnología Ultra Wide-Band se remonta a las investigaciones relacionadas con el electromagnetismo en el dominio del tiempo en 1962, viendo la respuesta al impulso de una serie de redes microondas. Después de diferentes pruebas, se descubrió que un sistema LTI (*Linear Time-Invariant*), o sistema lineal e invariable en el tiempo, podía ser totalmente caracterizado por su respuesta a una excitación impulsiva, denominando la respuesta al impulso como $h(t)$. En particular, la salida $y(t)$ de cada sistema para cualquier entrada arbitraria $x(t)$ podía ser determinada por la convolución integral, como se indica en la ecuación siguiente [7]:

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

Sin embargo, este estudio no fue realidad hasta la llegada del osciloscopio y el desarrollo de técnicas para la generación de pulsos de nanosegundos de duración. De esta forma, pudieron proporcionar aproximaciones a una excitación de pulsos muy cortos, pudiendo así la respuesta al impulso de las redes de microondas ser observada y medida directamente.

Más tarde, la invención 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).

A mediados de los años ochenta, la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) modificó la regulación del espectro que gobernaba los sistemas sin licencia. Esta modificación autorizaba la modulación en espectro ensanchado (antes tan solo era permitido su uso en el plano militar) a los productos utilizados en redes inalámbricas que operaban en los planos industrial, científico y médico, o en bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) [7]. 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. El organismo responsable en Europa es el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación, también conocido por su equivalente en inglés, *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI).

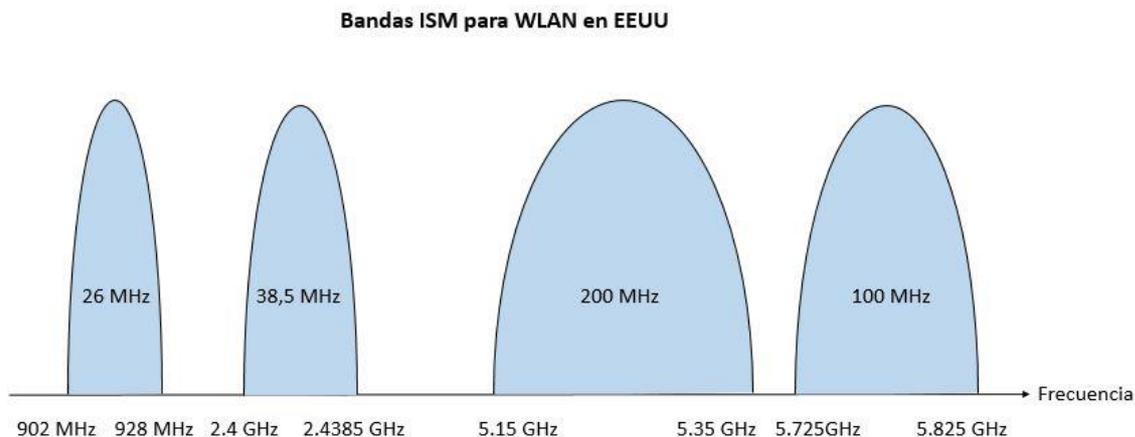


Figura 2-1: Bandas ISM para WLAN en EE.UU.

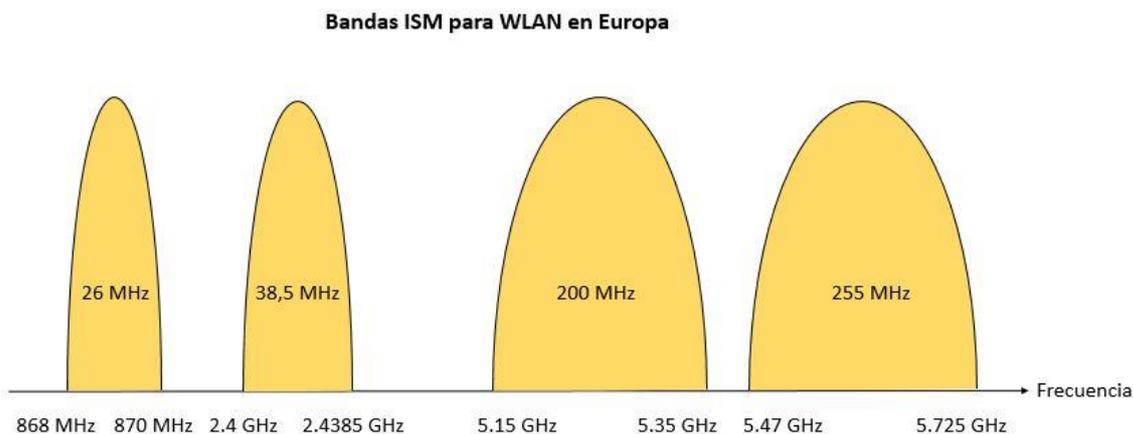


Figura 2-2: Bandas ISM para WLAN en Europa.

Generalmente, estas frecuencias permiten a usuarios de productos inalámbricos transmitir sobre ellas sin necesidad de permiso ni licencia específica, 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.

De hecho, de acuerdo a la Comisión Federal de Comunicaciones (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.

Los estándares basados en tecnología UWB son el IEEE 802.15.3a de alta tasa binaria, y el 802.15.4a de baja tasa binaria. En los Estados Unidos se ha aprobado la banda entre 3.1 GHz y 10.6 GHz (7.5 GHz) para la explotación de sistemas UWB en zonas de interior. En Europa, la banda con menos restricciones para operar en ella es mucho menor, de 2.5 GHz de extensión.

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. El cambio fue introducido en el DOUE (Diario Oficial de la Unión Europea) por la Comisión Europea [8]. En apartados posteriores se profundizará un poco más respecto a los límites de emisión de señales Ultra Wide-Band.

*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 -

A lo largo de este apartado se hará una descripción de la tecnología, partiendo de los tipos de señal y realizando un detallado análisis técnico en el que se ahondará en sus propiedades de ancho de banda y capacidad de canal, así como sus límites de emisión, características y aplicaciones principales, para finalizar destacando las diferencias entre Ultra Wide-Band y otras tecnologías similares.

3.1 Tipos de señal

Las señales UWB han ido evolucionando a medida que la tecnología y conocimientos también lo han hecho. Por ello, ha habido distintos descubrimientos y cambios a la vez que se ha ido avanzando en el aprovechamiento de las características de este tipo de sistema [21].

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. Estas características se pueden observar en la respuesta en tiempo de la Figura 3-1, y su equivalente en frecuencia en la Figura 3-2 [7, 11, 21]. Este será el tipo de UWB en el que nos centraremos a lo largo del proyecto.

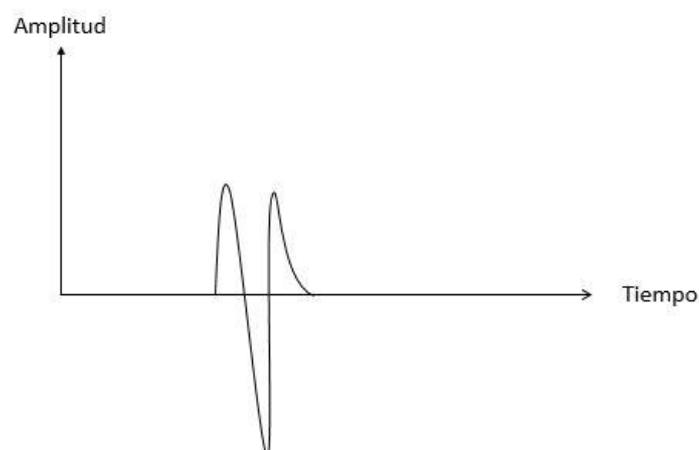


Figura 3-1: Respuesta de un pulso Ultra Wide-Band en el dominio del tiempo.

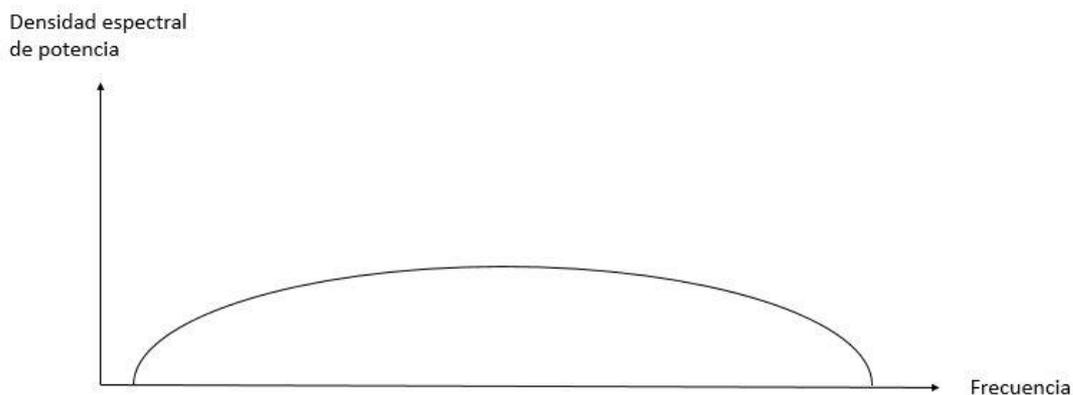


Figura 3-2: Respuesta Ultra Wide-Band en el dominio frecuencial.

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 [12, 20].

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 [6, 12, 20]. 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.

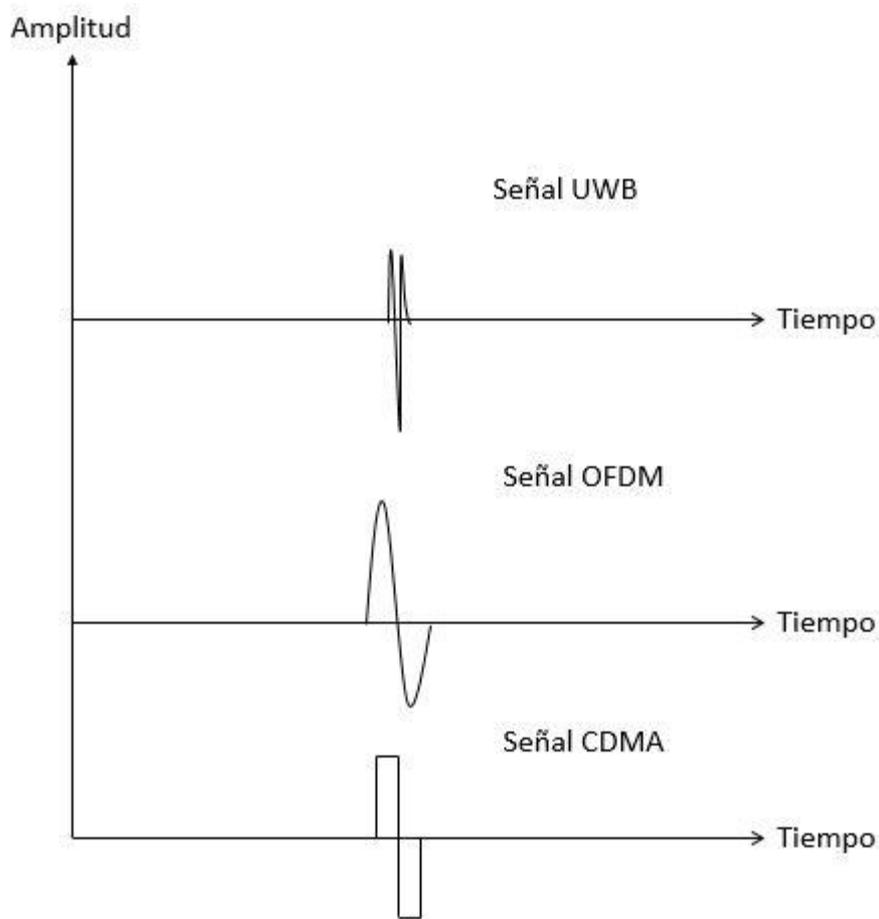


Figura 3-3: Respuesta UWB, OFDM y CDMA en el dominio del tiempo.

La técnica DS-SS 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-SS), 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 [21]. De este modo, la forma del espectro DS-SS 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 DS-SS.

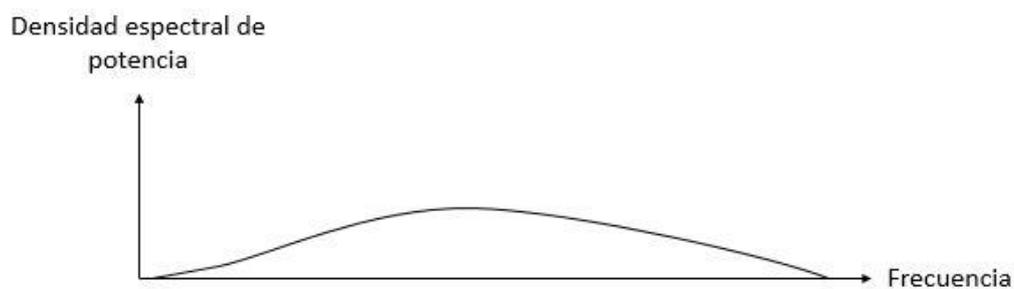


Figura 3- 4: Respuesta DS-SS en el dominio frecuencial.

Para el caso de OFDM Multibanda [5], 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 los sistemas OFDM fueron los principales candidatos 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 802.15.3a 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 picosegundos. 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 disponer 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. Si lo expresamos de forma matemática se expresaría como [11]:

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

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

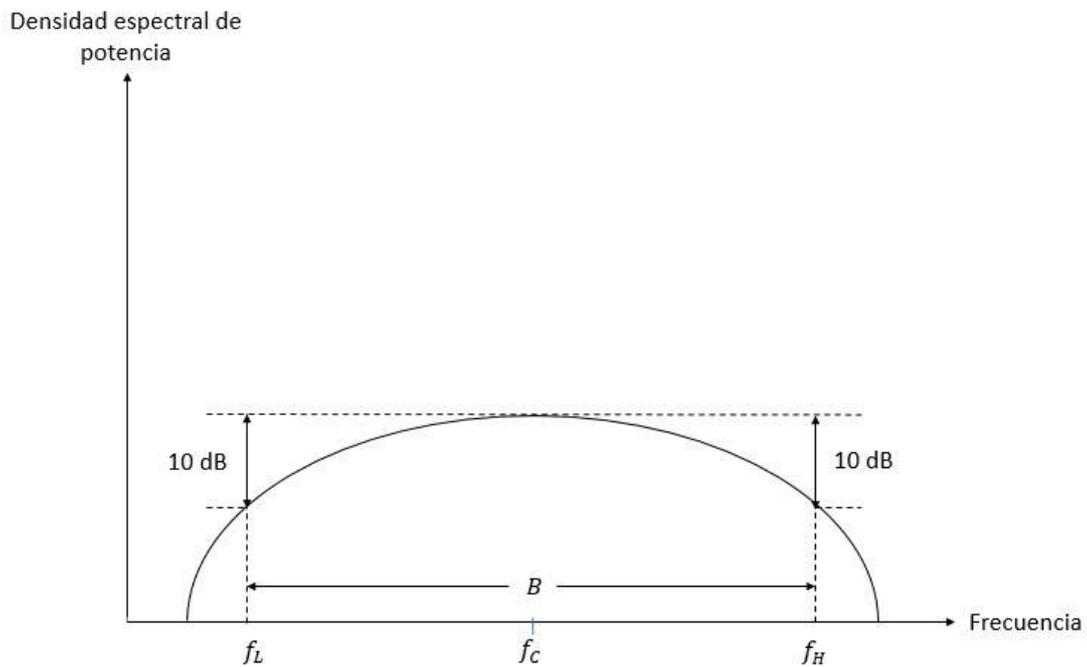


Figura 3-5: Definición de ancho de banda absoluto, frecuencia central, mínima y máxima [16].

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 [6], se puede obtener una relación donde 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 restricciones [6]:

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

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

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

Tabla 3-1: Valor del ancho de banda relativo de diferentes tipos de sistemas [6].

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 [19]. 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.

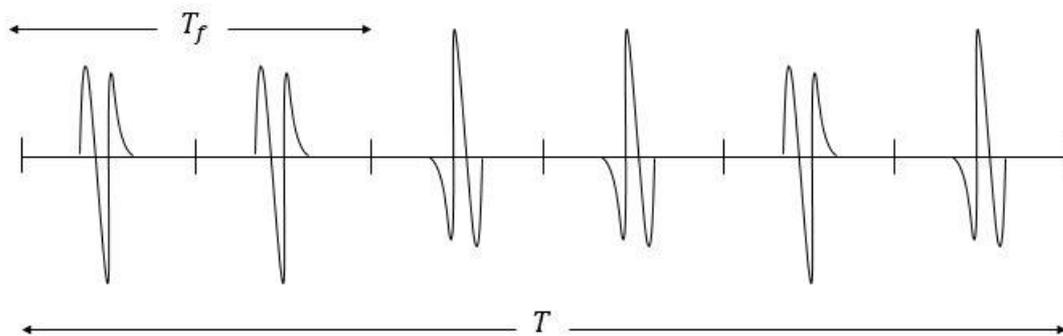


Figura 3-6: Ejemplo de señal UWB de pulsos de corta duración y bajo *duty cycle*, donde T es la duración total de la señal y T_f el intervalo de muestreo [16].

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 destacables de UWB es la capacidad del canal, como se ha destacado previamente. Según el teorema de Shannon [3], 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.

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

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.

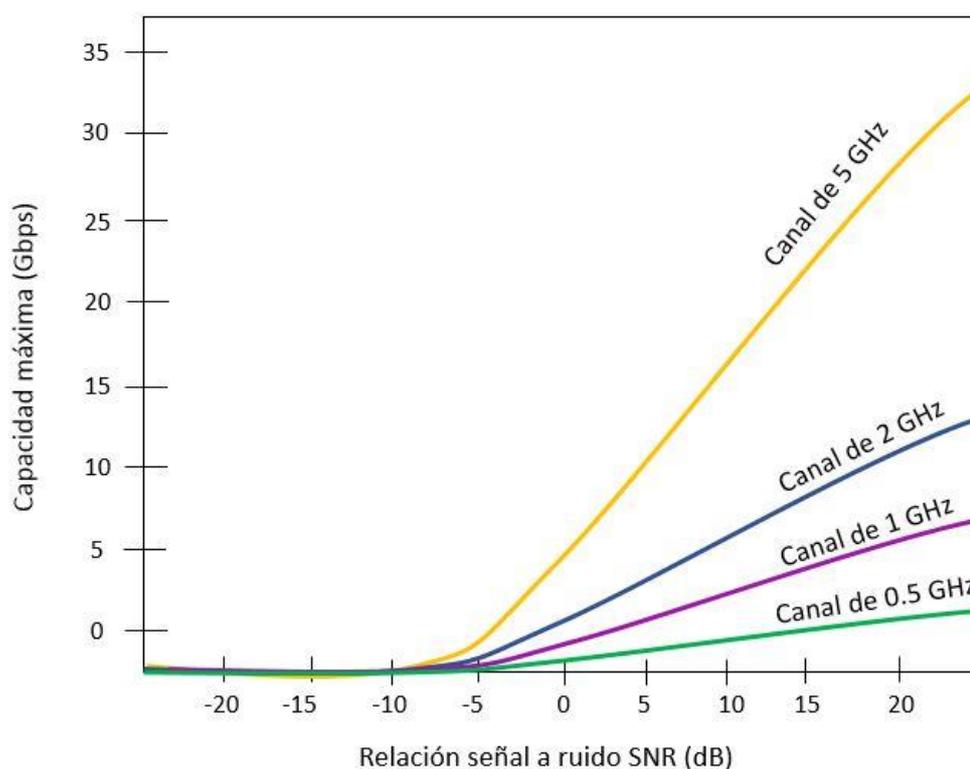


Figura 3-7: Efecto del incremento del ancho de banda sobre la capacidad teórica máxima.

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 también problemas para la implantación efectiva de estas tecnologías, que han hecho que en la actualidad no se contemplen para aplicaciones de comunicaciones.

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, este caso se denomina canal con Línea de Visión Directa o, en inglés, *Line Of Sight* (LOS).

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 retrasa mucho su llegada al objetivo, imposibilitando así que se detecte la señal del camino directo. 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 de ilustra la clasificación de los canales ayudándonos de las placas EVB1000.

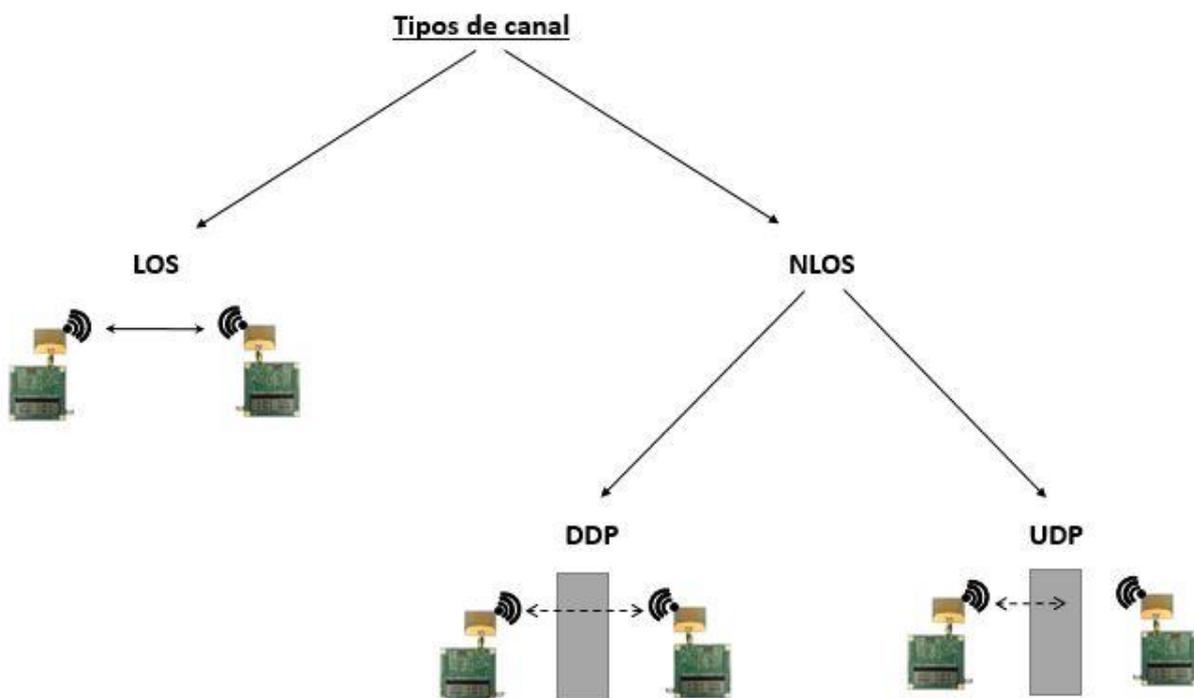


Figura 3-8: Esquema de tipos de canal según visión entre transmisor y receptor.

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, en 2002 la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) emitió un informe (*First Report and Order*) 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 [11]. 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 3-8, la densidad espectral de potencia media no debe exceder -41.3 dBm/GHz en la banda que va desde 3.1 a 10.6 GHz, siendo la norma más restrictiva fuera de dicha banda [4, 5, 6, 7, 16, 19]. En lo que respecta a Europa, en la Figura 3-9 se observa que el rango de frecuencias con límite de -41.3 dBm/GHz 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/GHz por la FCC. En las imágenes a continuación se ilustran con detalle los límites FCC y EC para sistemas de comunicaciones en interiores.

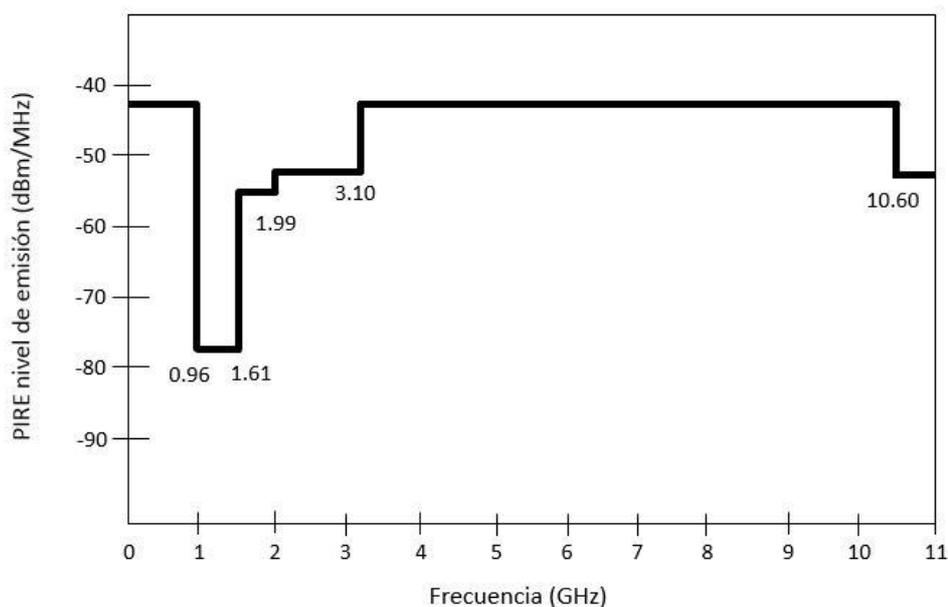


Figura 3-8: Máscara espectral de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) para sistemas de comunicaciones en interior.

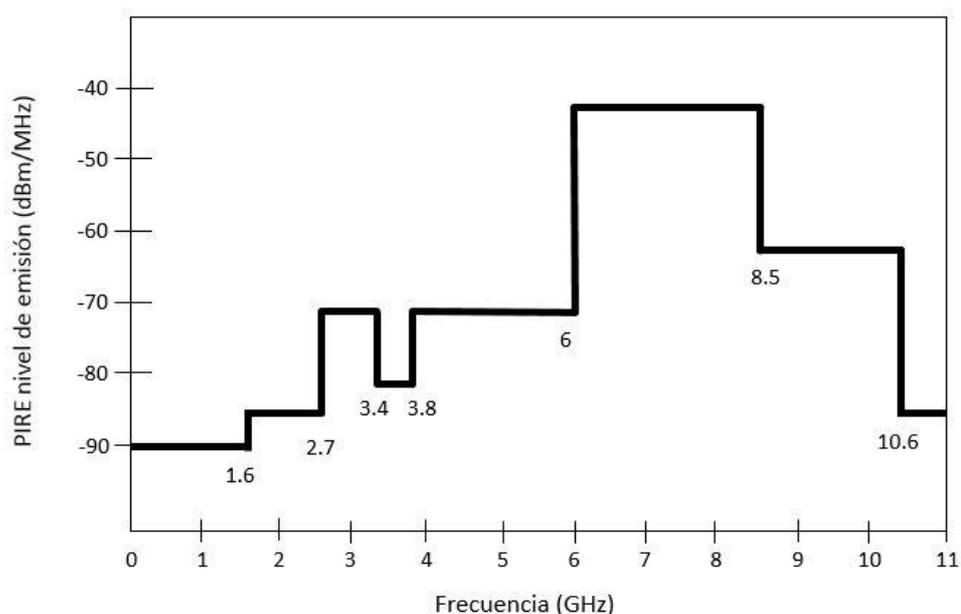


Figura 3-9: Máscara espectral de la Comisión Europea (EC) para sistemas de comunicaciones en interior.

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 distintos 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 los enlaces a unos 10 metros limitando esta tecnología a aplicaciones de redes inalámbricas de área personal (WPAN). Si no se limitara la potencia de transmisión, aumentaría 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 [10]:

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

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

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

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

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 correspondientes 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.

3.3 Ventajas y desventajas de la tecnología UWB

Debido a sus características particulares, UWB tiene una serie de ventajas destacadas [2, 5, 6, 7, 20]:

- Es indetectable, al confundirse con ruido, y posee gran resistencia a interferencias procedentes de la banda estrecha. Como vemos en la Figura 3-10, 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 3-10. Además, en la Figura 3-11 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 pueda apreciar mejor las diferencias de respuesta para la densidad de espectral de potencia y la amplitud de la señal entre los distintos sistemas.

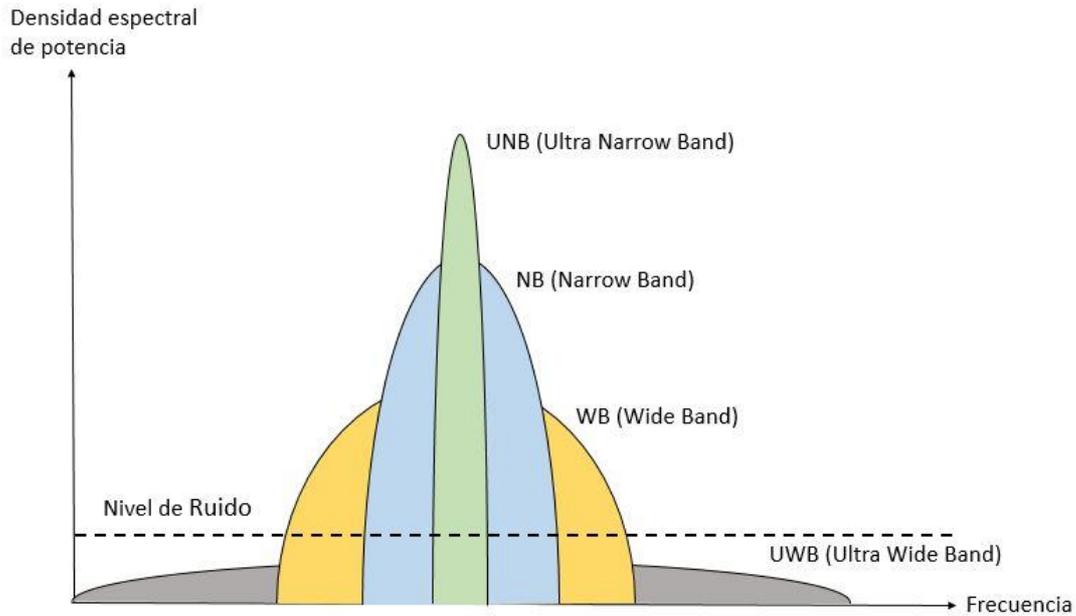


Figura 3-10: Comparación de la densidad espectral de potencia y el ancho de banda de diferentes sistemas.

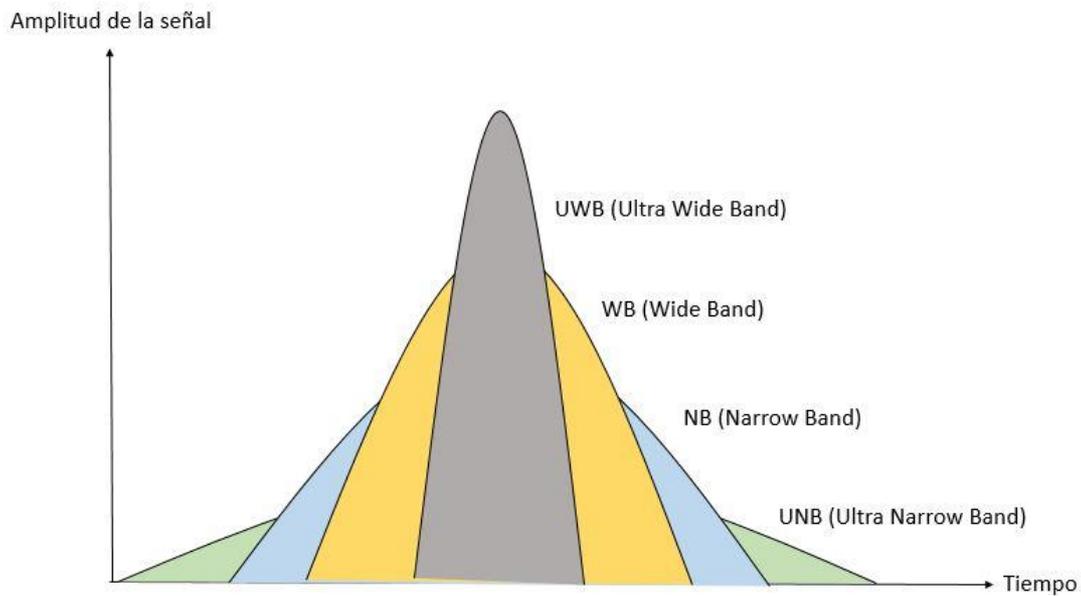


Figura 3-11: Comparación de la amplitud y la duración del pulso de diferentes sistemas.

- 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 3-10.
- 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 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 3-10, 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.

Estas características mencionadas permitirán emplear esta tecnología en diferentes ámbitos en la sociedad, desde aplicaciones militares a dispositivos diarios, en posicionamiento, comunicaciones y aplicaciones radar.

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.

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 [7]:

- 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.
- Altímetros 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 [2].

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) o el entretenimiento (desarrollo de juegos multimedia).

Otra posible aplicación son las emergentes redes de sensores. Las aplicaciones en este campo incluyen la supervisión de viviendas y entornos de oficina, la monitorización de la seguridad en los aeropuertos y centros de convenciones, así como el seguimiento al aire libre.

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 [9].

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 son confundidas con ruido ambiente o ruido de fondo. Asimismo, las transmisiones pueden cifrarse sin ningún tipo de limitación y se pueden 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. En la Tabla 3-4 se ilustra una comparación en precio, consumo, velocidad, seguridad y alcance de las tecnologías en cuestión.

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

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

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 estandarización y menor 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 ALGORITMO EMPLEADO

Para resolver el problema de la determinación de la posición (x, y) de un nodo de posición desconocida, usamos estimaciones de distancia d_i entre el nodo a estimar y un conjunto de N anclas situadas en posiciones conocidas (x_i, y_i) , donde $i = 1, 2, \dots, N$. Esta estimación puede ser obtenida mediante diferentes métodos como, por ejemplo, con medidas de tiempo de llegada (ToA, *Time of Arrival*) o de potencia de señal recibida (RSS, *Received Signal Strength*) [13, 16].

Las medidas de tiempo de llegada proporcionan información de la distancia entre dos nodos estimando el “tiempo de vuelo” de una señal que viaja de un nodo a otro. Por tanto, una medida ToA en un nodo proporciona una región en forma de círculo. Para prevenir ambigüedad en las estimaciones ToA, los dos nodos deberán tener un reloj común, o intercambiar información del tiempo mediante ciertos protocolos, es decir, deberán estar vinculados.

A diferencia de las técnicas basadas en RSS, la precisión de la aproximación basada en el tiempo se puede mejorar aumentando la SNR o el ancho de banda eficaz. Como las señales UWB tienen un amplio ancho de banda, esta propiedad permite estimaciones de localización muy precisas utilizando técnicas basadas en el tiempo. Al tener una precisión alta en condiciones ideales, la sincronización de reloj entre nodos se convierte en un factor importante que afecta a la precisión de la estimación de ToA.

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:

$$A \cdot p = b\tag{4-2}$$

Gráficamente, el algoritmo realiza un cálculo como el de la Figura 4-1, donde busca la intersección de

las circunferencias generadas por las anclas.

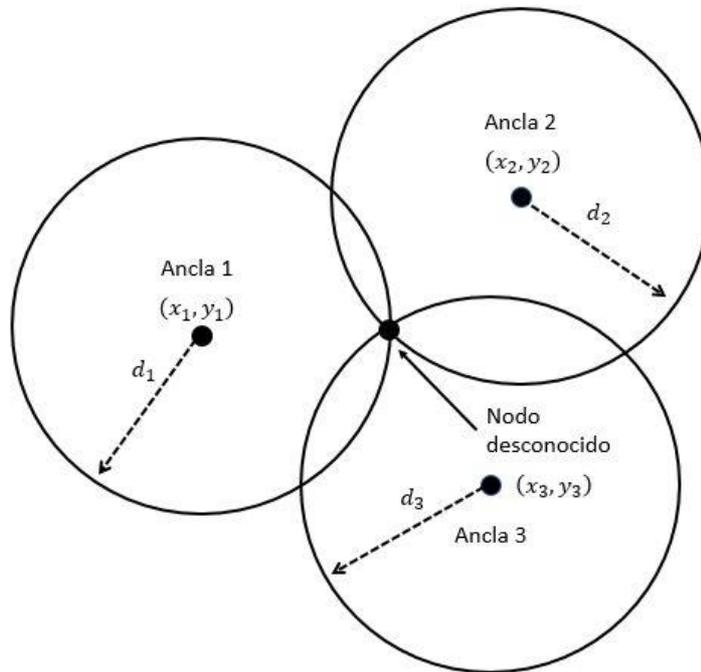


Figura 4-1: Ejemplo de multilateración de tres nodos.

Donde se determinan los valores de A y b como:

$$A \triangleq \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_N) & 2(y_1 - y_N) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{N-1} - x_N) & 2(y_{N-1} - y_N) \end{bmatrix}$$

$$b \triangleq \begin{bmatrix} x_1^2 - x_N^2 + y_1^2 - y_N^2 + d_N^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{N-1}^2 - x_N^2 + y_{N-1}^2 - y_N^2 + d_N^2 - d_{N-1}^2 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

El punto desconocido que deseamos estimar se define de la siguiente forma:

$$p \triangleq \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4-4)$$

En un escenario real donde con alta probabilidad se encuentren errores en las estimaciones, la Ecuación (4-2) puede ser inconsistente, es decir, los círculos no intersecan 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):

$$\hat{p}^{(LS)} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (2-5)$$

Asumiendo siempre que $A^T A$ es no singular, donde el superíndice T indica la traspuesta de la matriz.

5 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

Scientists discover the world that exists, engineers create the world that never was.

Los científicos descubren el mundo tal como es, los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido.

- Theodore von Karman -

Para la toma de muestras del proyecto se ha usado 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.

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.

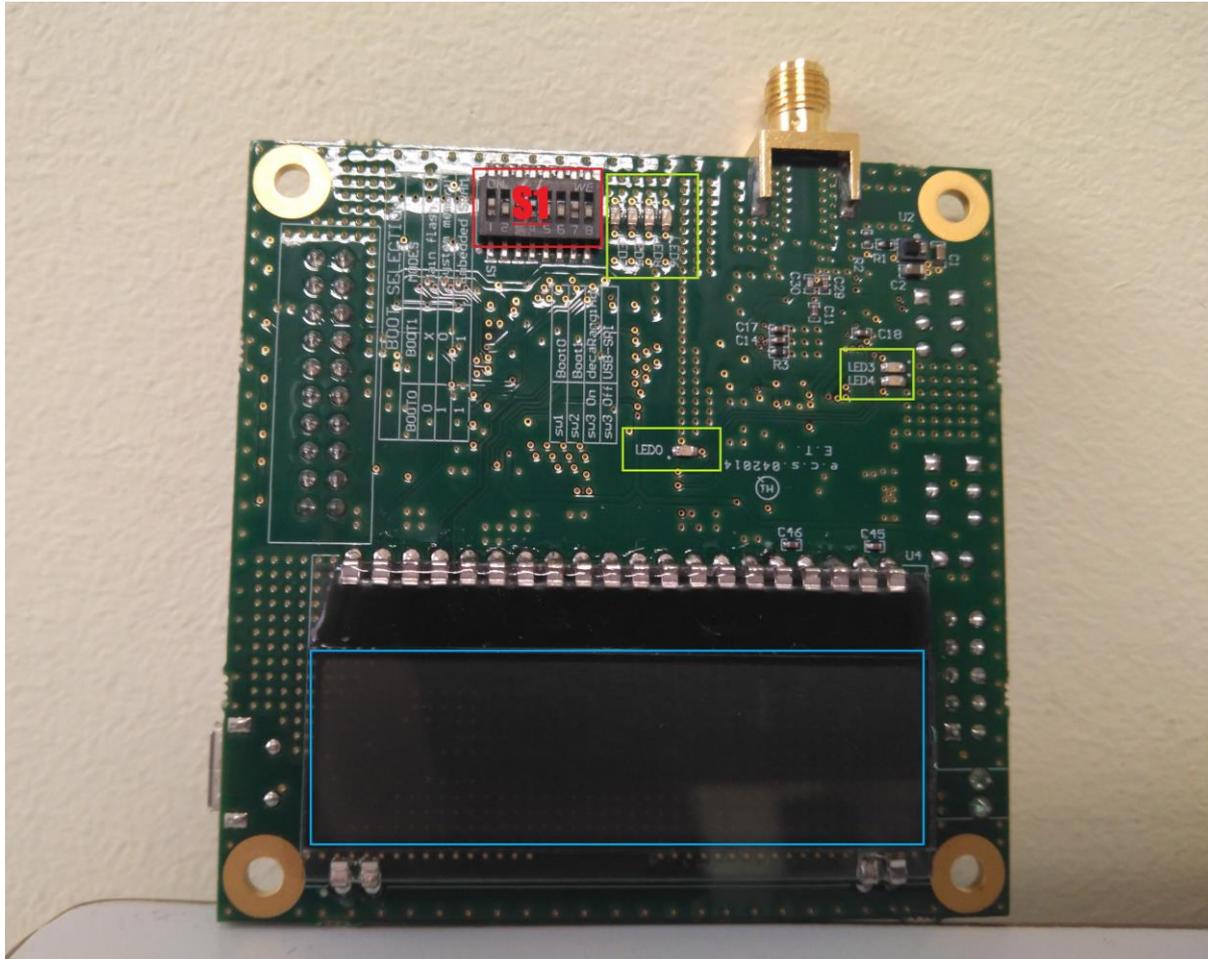


Figura 5-2: Parte frontal de la placa de evaluación EVB1000.

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, 20].

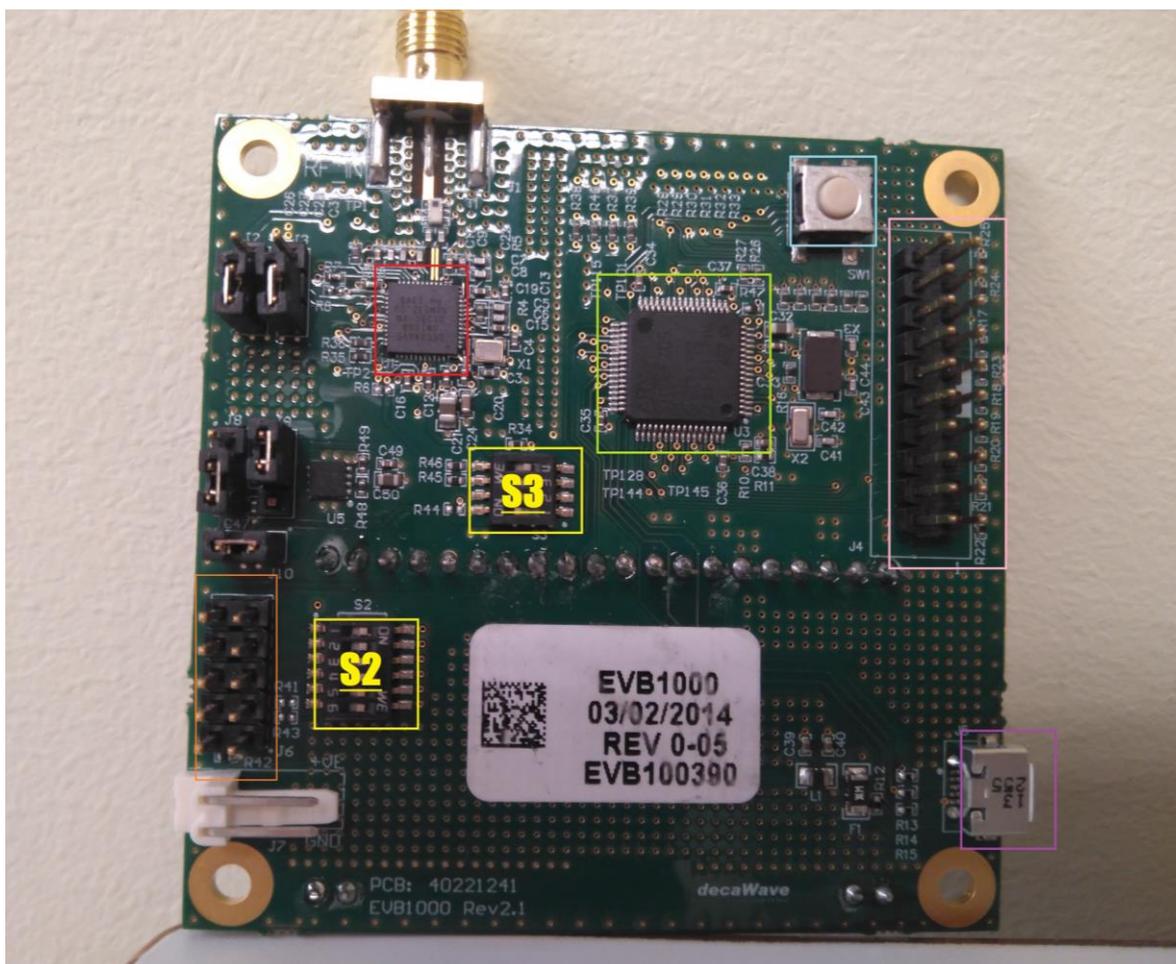


Figura 5-3: Parte posterior de la placa de evaluación EVB1000.

Estos dispositivos poseen las siguientes características [14, 20]:

- 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 [14].

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 alimentación.

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 [14]:

- Rango de distancias a las que se pueden situar los transmisores.
- Precisión de las medidas de distancia.
- Espectro de transmisión.
- Consumo de potencia y corriente.
- Inmunidad a multirayectos.
- 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 [14]. 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 su posición lo denotaremos como target (objetivo), mientras que la placa de la que conocemos la posición y con la que queremos averiguar 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 las Figuras 5-4 y 5-5.

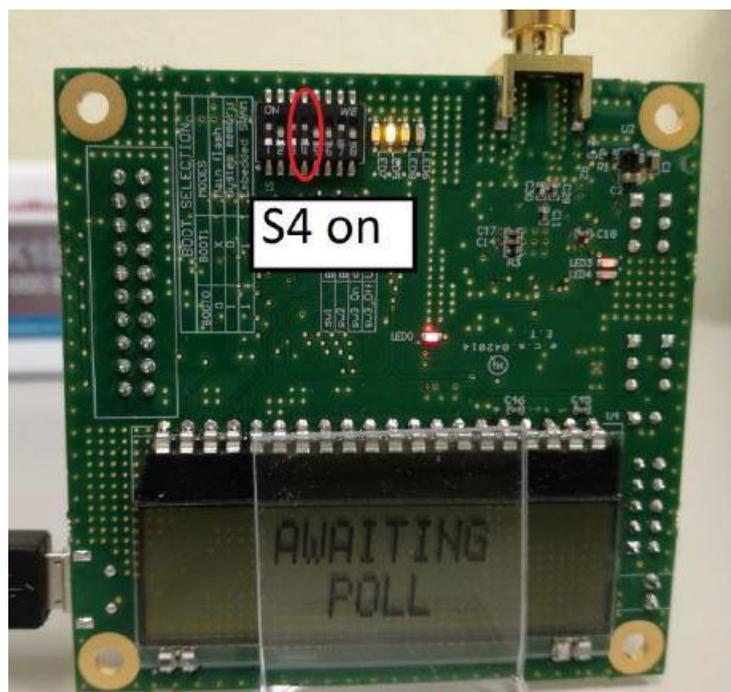


Figura 5-4: Placa con S4 a on [20].

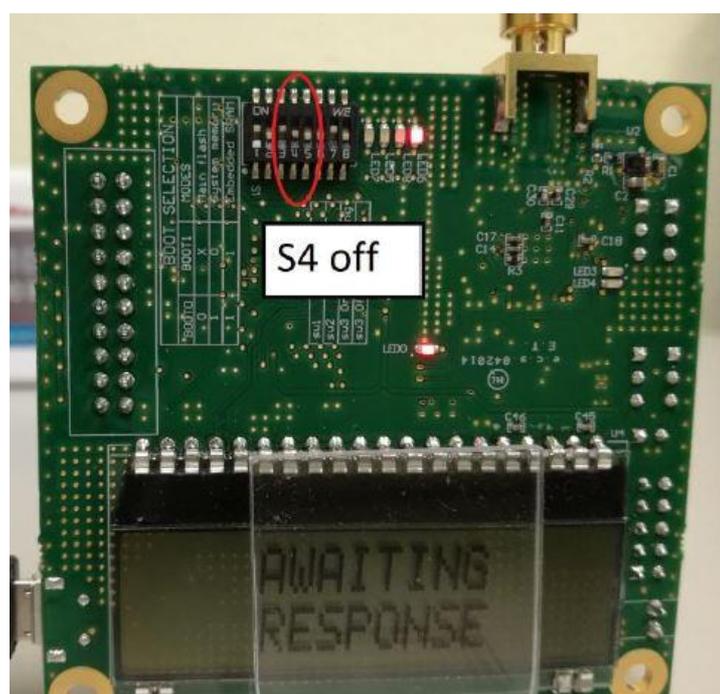


Figura 5-5: Placa con S4 a off [20].

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.

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

Tabla 5-1: Modos de trabajo del EVK1000 y sus características [20].

Al suministrar energía a las placas, estas lo primero que hacen es intentar asociarse. De este modo, al comienzo, el target está constantemente 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 [20].

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.

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.

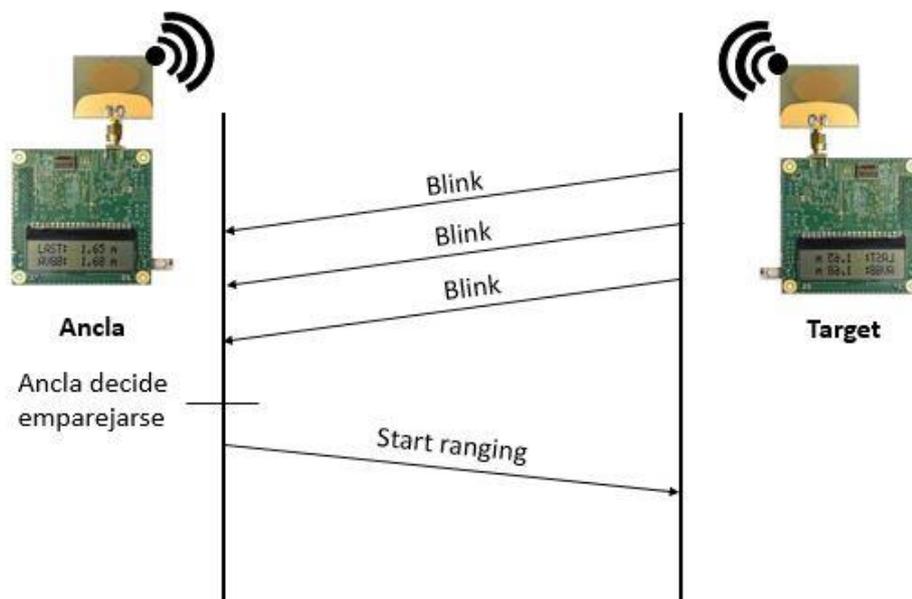


Figura 5-6: Intercambio de mensajes de asociación entre ancla y objetivo.

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.

5.2.2 Intercambio de datos

Una vez 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.

Una vez el ancla recibe el mensaje 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.

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

Donde c es la velocidad de la luz.

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

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.

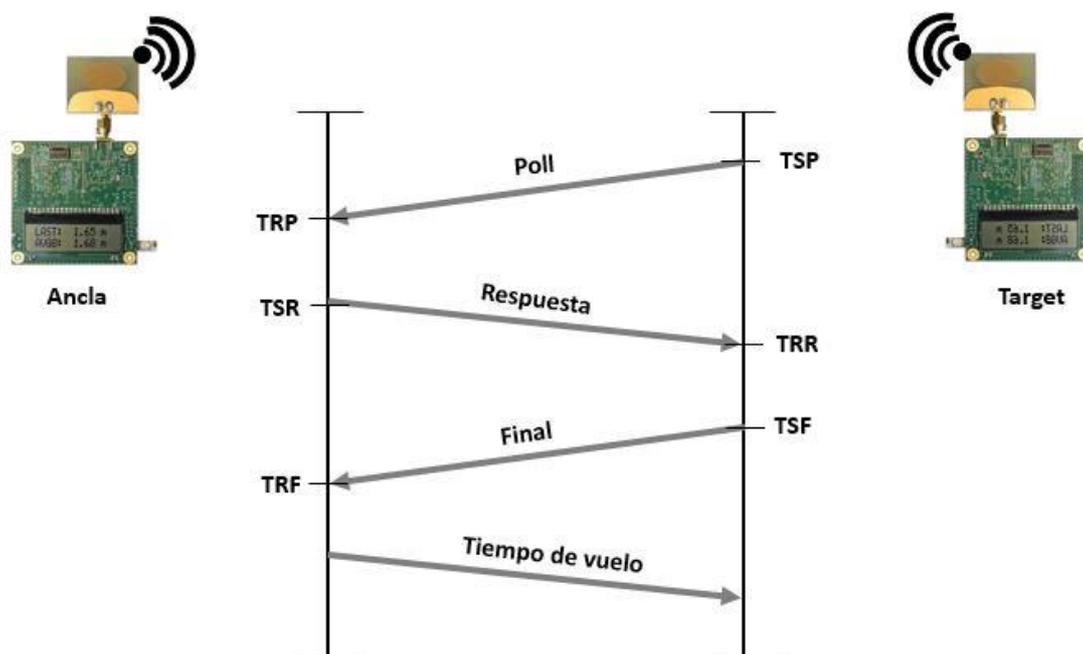


Figura 5-7: Diagrama de mensajes del two-way ranging.

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.

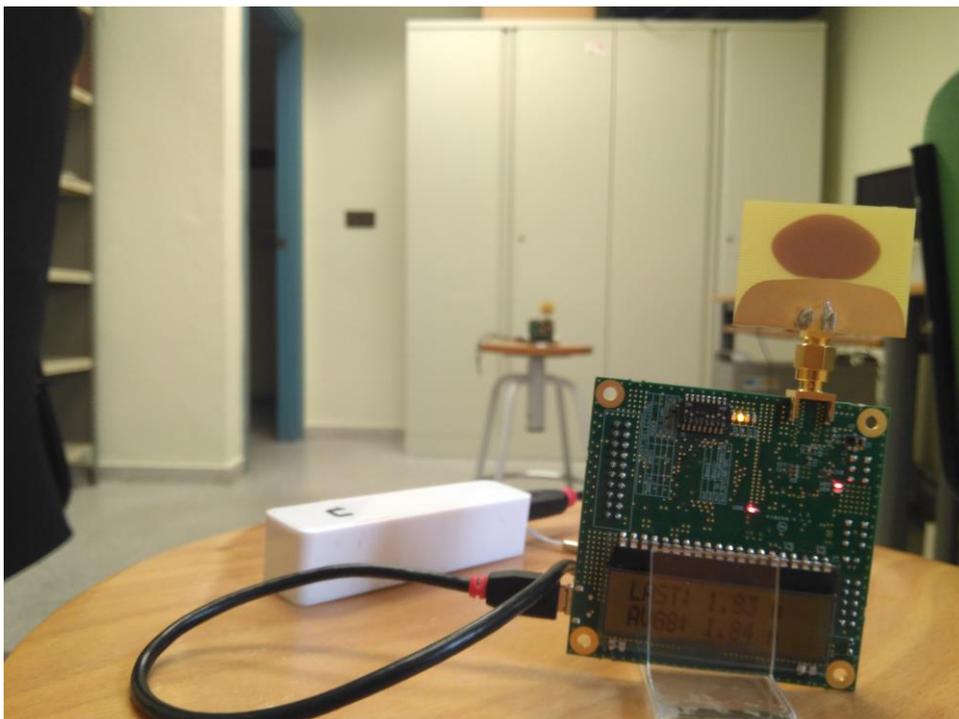


Figura 5-8: Método de toma de medidas con el EVK1000 Evaluation Kit.

6 DESARROLLO PRÁCTICO

Para evaluar de forma práctica la resistencia del método de localización para un sistema UWB sin línea de visión directa, se han tomado diversas medidas con el software EVK1000 en una situación de interior. Concretamente, se ha realizado 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.

De esta forma, se ha hecho el estudio con obstáculos tales como un armario metálico, muros, paredes, mesas de madera, una estantería metálica y el paso esporádico de personas. Así, se han dado las condiciones de los distintos tipos de canal: LOS, NLOS-DDP y NLOS-UDP [17, 18], creando una gran variedad de medidas y configuraciones.

6.1 Entorno de medidas

Para realizar el estudio, se ha construido una cuadrícula siguiendo el dibujo de las propias losetas de la sala y pasillo. Se han definido una serie de puntos en los que se han tomado las medidas, así como la posición de seis anclas, distribuidas para dar el mayor juego posible y enriquecer el proyecto. En la Figura 6-1 podemos ver la distribución y posición exacta de los veinticuatro puntos y seis anclas. El estudio se realizó con la puerta siempre abierta, por lo que el Ancla 6 tiene visión directa con ciertos puntos del interior de la sala.

Por un lado, 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, mientras que el Ancla 2 es clave para el estudio del canal NLOS-UDP ya que su señal debe pasar por un armario metálico para llegar a la sala.

Por otro lado, para los puntos exteriores, del 8 al 13 algunos están influidos por el armario metálico para las anclas 1, 3 y 4. Asimismo, para estas mismas anclas, para las posiciones entre la 14 y 20 y para el punto 23, la señal es influida por una mesa de madera o estantería metálica.

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 a 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 LOS para las posiciones 1 y 2.

El estudio de los canales NLOS es complejo y variado, ya que pueden afectar de diferente forma

distintos obstáculos. En el caso particular que se presenta en este documento, tenemos principalmente tres elementos que generan errores de diferente nivel: las mesas de madera son las que menor error introducen seguidas de los muros, mientras que el corte de la visión directa por la estantería metálica es la que mayor error genera.

Se han realizado múltiples comparaciones y cálculos, de las que se han sacado firmes y distintas conclusiones. A continuación, se va a hacer el análisis del método desde ejemplos concretos a más generales, mostrando para finalizar la conclusión alcanzada tras el estudio.

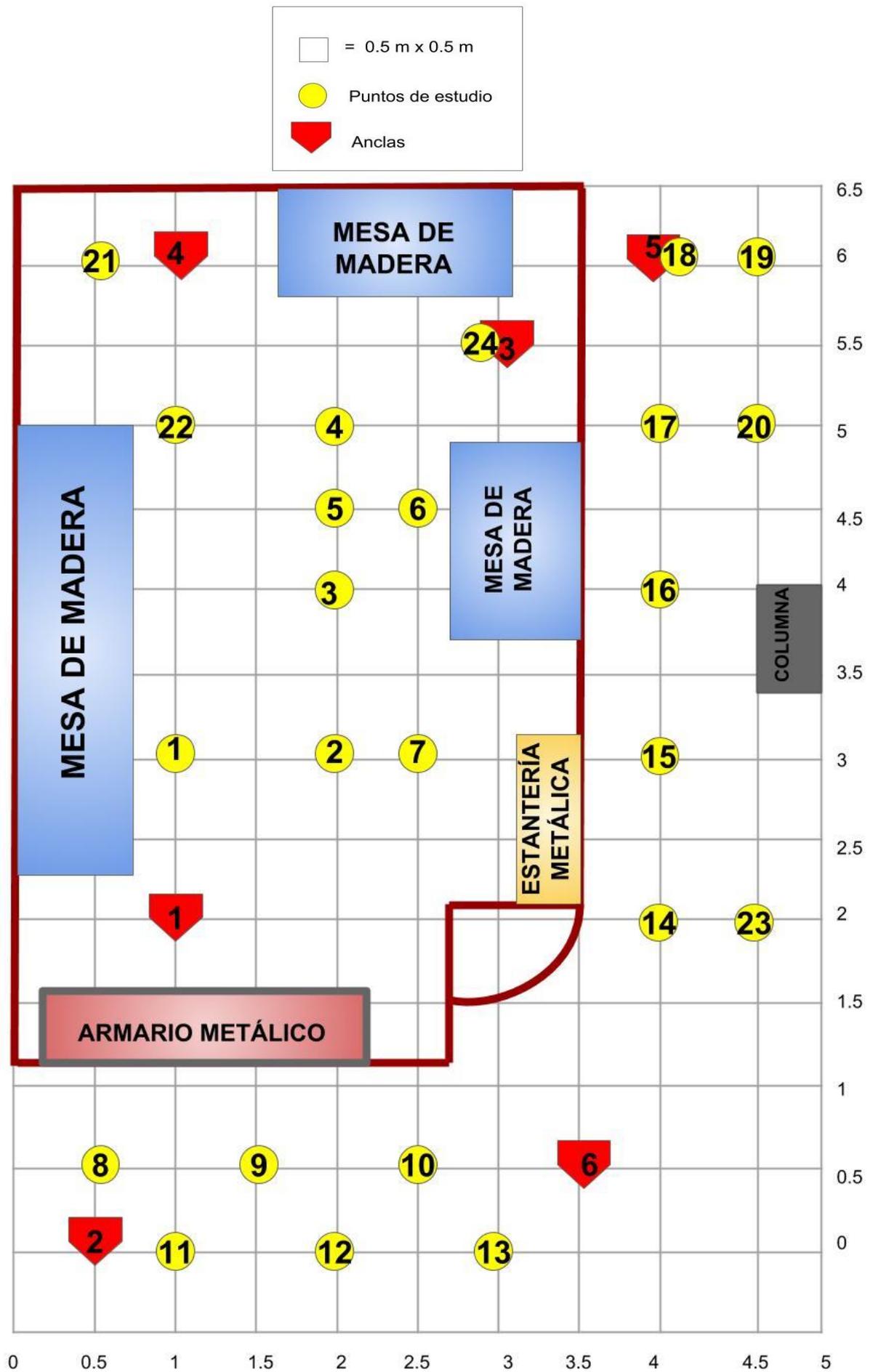


Figura 6-1: Distribución de anclas y puntos en la sala.

6.2 Gráficas de implementación del método

El método single-hop de multilateración se basa en combinar la información de las circunferencias dadas por las diferentes medidas de las anclas. Este cálculo se ha realizado para todas las combinaciones de anclas y puntos, combinando tres, cuatro, cinco y seis anclas. En este apartado se mostrarán algunos de los resultados más ilustrativos, pudiéndose consultar otros ejemplos en el Anexo A de este documento.

Como podemos observar en la Figura 6-2, hay tres circunferencias que se aproximan mucho al punto real, mientras que la circunferencia del Ancla 2 se distancia más. Esto es debido a que el punto de estudio es el 22, y para el Ancla 2 implica un canal NLOS-UDP. Por tanto, para tres anclas con canales LOS y una con canal NLOS-UDP el método ha estimado de forma aceptable la posición del punto. Esto es porque de todos los trayectos por los que la señal con condición NLOS-UDP se ha transmitido, el más corto tiene una longitud no mucho mayor que el trayecto directo que es bloqueado. Concretamente, el error en este caso es de 0.64 metros. En esta gráfica en particular, el error indica la longitud del vector que une el punto Posición Estimada y el punto Posición Real.

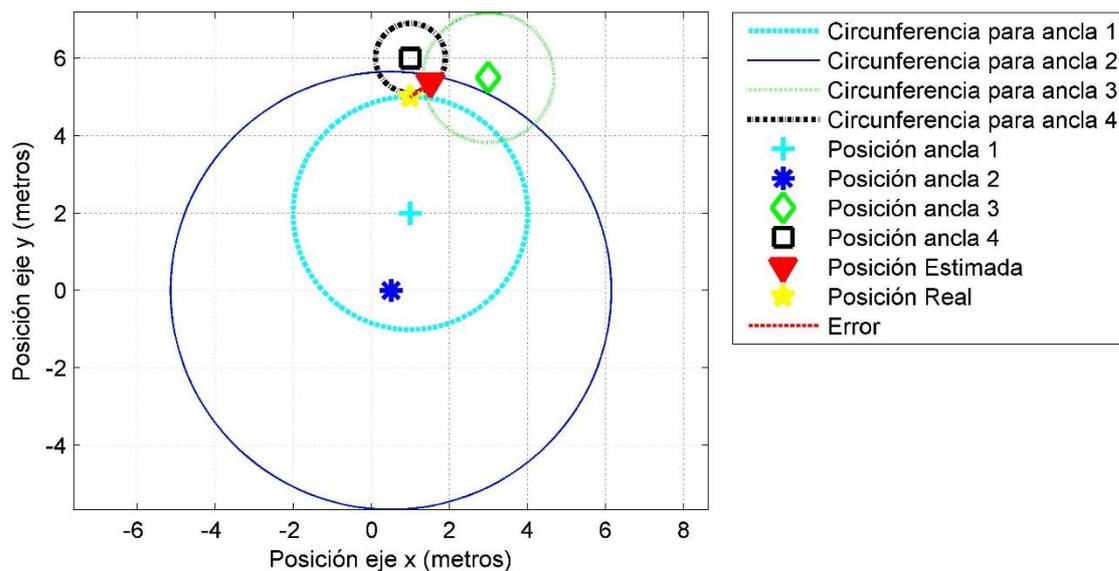


Figura 6-2: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 2, 3 y 4 para el punto 22.

Sin embargo, si se compara esta gráfica con la Figura 6-3, que sería el equivalente en el mismo punto, pero estimando únicamente con las tres anclas LOS 1, 3 y 4, observamos que las tres circunferencias están muy cercanas al punto real. De hecho, en este caso, el error es de 0.32 metros, aproximadamente la mitad del error que al incluirle un ancla NLOS-UDP.

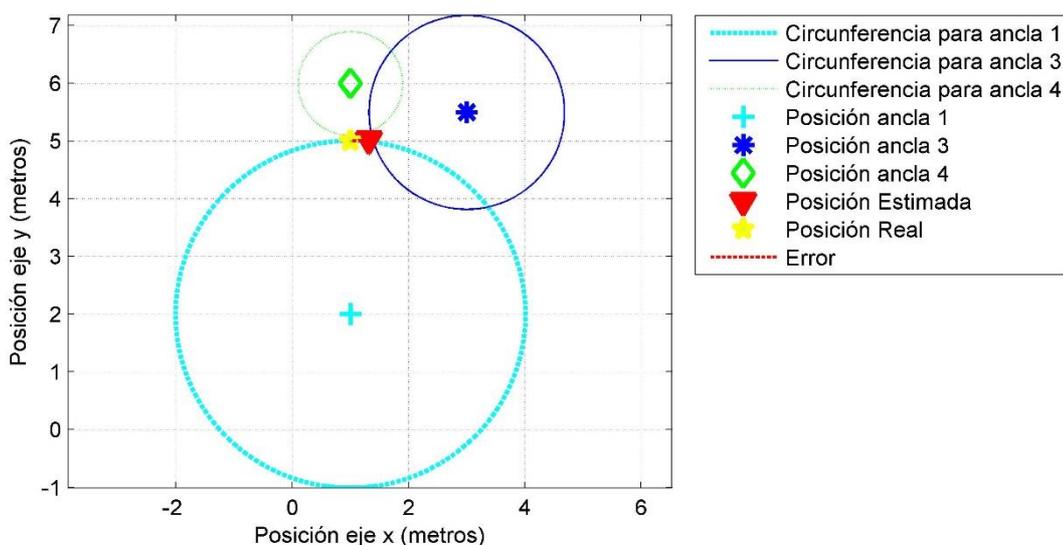


Figura 6-3: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3 y 4 para el punto 22.

En contraste con el gran aumento del error al añadir un ancla NLOS-UDP a una estimación con tres anclas LOS, se encuentra el estudio de ese mismo punto, pero añadiéndole un ancla DDP en vez de UDP. Este caso quedaría representado por la Figura 6-4, donde para calcular la posición estimada del punto 22 se han usado las tres anclas con canal LOS 1, 3 y 4, y el ancla con canal NLOS-DDP número 5. Con esta nueva configuración, el error alcanzaría los 0.38 metros, siendo levemente superior al de las tres anclas LOS, pero considerablemente inferior al valor del error en ese punto para tres anclas LOS y una NLOS-UDP.

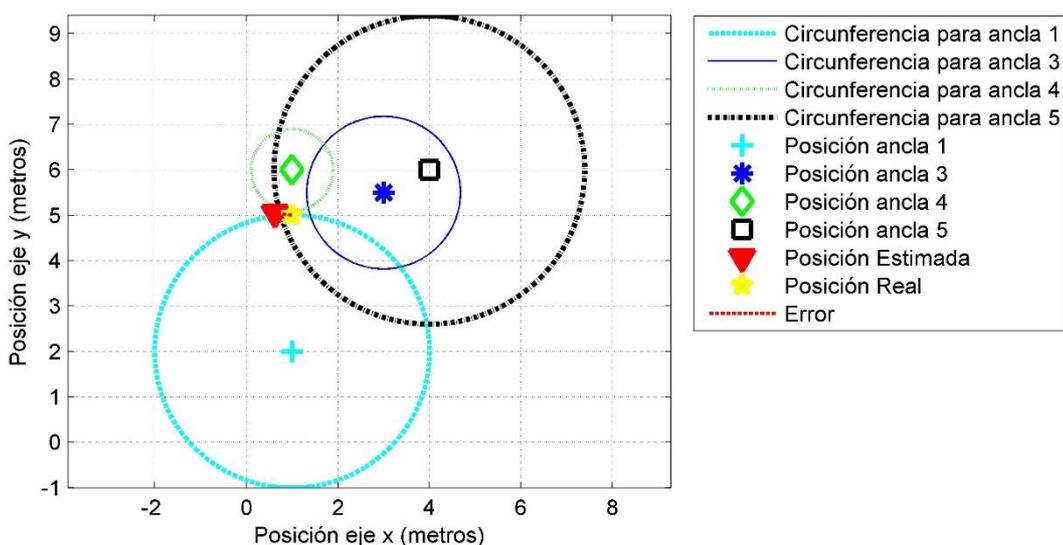


Figura 6-4: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3, 4 y 5 para el punto 22.

Apoyando el ejemplo anterior, se realiza el mismo estudio, pero para el punto 4. Se puede percibir el comportamiento anterior de forma gráfica observando las diferencias entre la Figura

6-5 y la Figura 6-6, donde aun teniendo las medidas de tres anclas con visión directa, al incluir un ancla NLOS-UDP aumenta el error de forma notable. Así, en la Figura 6-5, estudiando el punto 4 con las anclas 1, 3 y 4 el error es de 0.08 metros, mientras que si añadimos a la estimación el ancla 2 (Figura 4-6), el error sube a 0.97 metros, aumentando de forma importante, llegando a casi dos losetas de la sala de error. En este caso el error al añadirle el ancla NLOS-UDP es mayor.

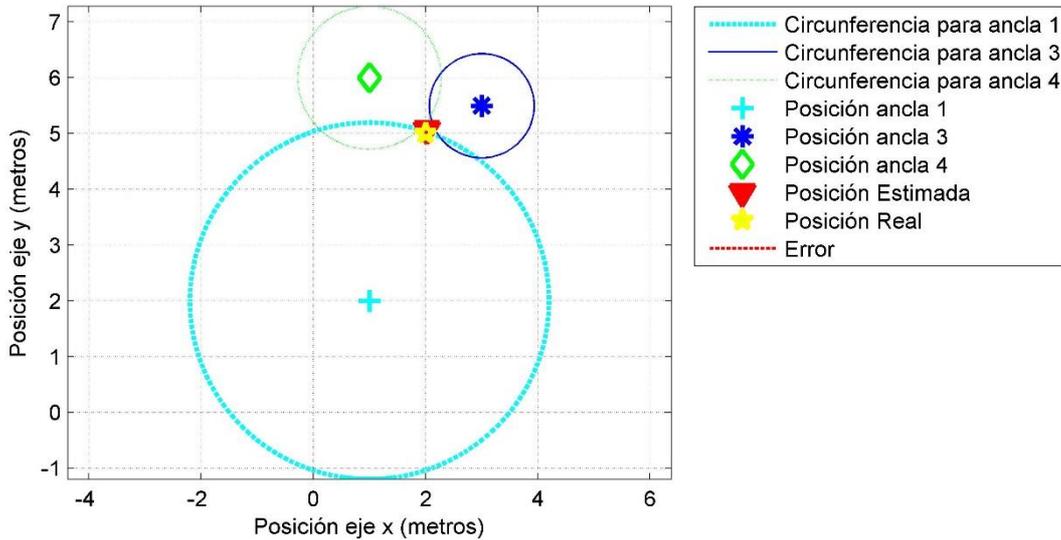


Figura 6-5: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3 y 4 para el punto 4.

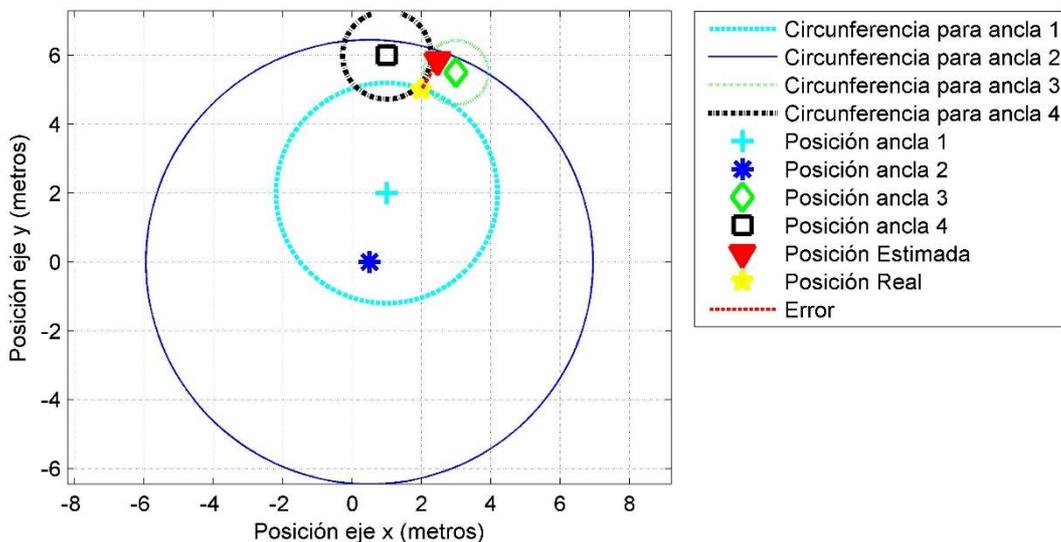


Figura 6-6: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 2, 3 y 4 para el punto 4.

Cambiando la orientación del estudio hacia los puntos fuera de la sala, observamos que con dos anclas LOS y una NLOS-DDP el error cometido es muy pequeño. Concretamente, en la Figura 6-7 se ve con claridad que para las anclas LOS 5 y 6, y el ancla 3 (situada en el interior de la sala) para el punto 15, los puntos real y estimado están muy cerca. De hecho, el error en este caso es

de 0.16 metros. En la Figura 6-8 se puede ver el resultado al añadir una nueva ancla NLOS-DDP. En este nuevo caso, se han mantenido las anclas anteriores y se ha añadido el Ancla 1, generando un error de posición de 0.14 metros. El error es muy similar, por lo que este no se ha visto muy influido por la inclusión de una nueva ancla NLOS-DDP.

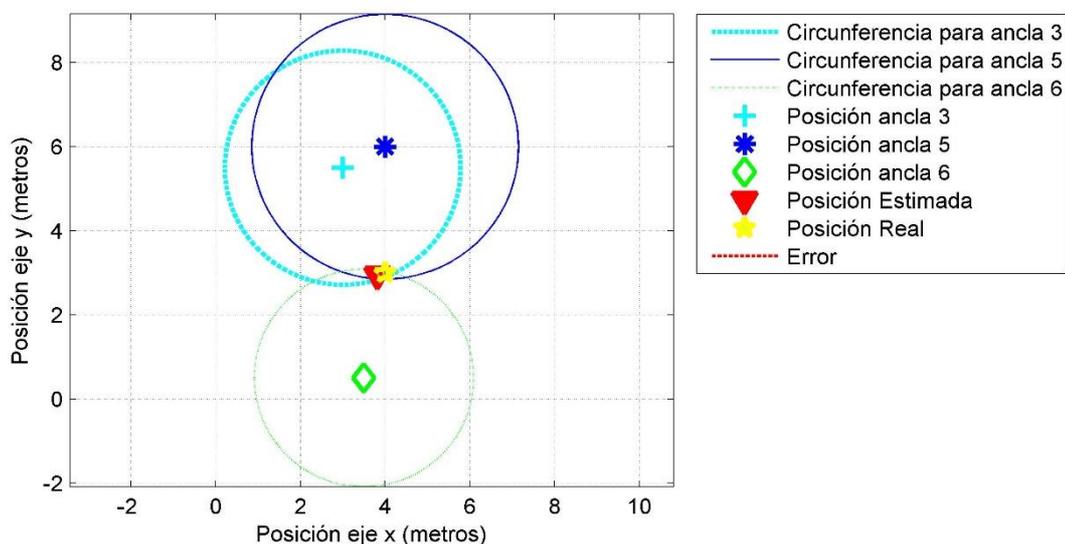


Figura 6-7: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 3, 5 y 6 para el punto 15.

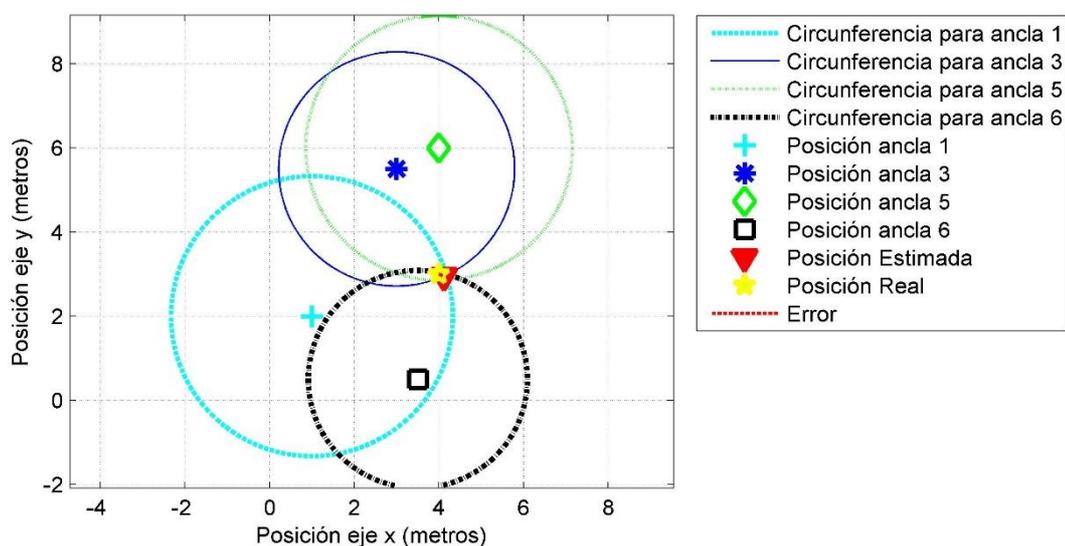


Figura 6-8: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3, 5 y 6 para el punto 15.

Si en vez de tener dos anclas LOS como base, únicamente hacemos el estudio con una, como se ilustra en la Figura 6-9, el error aumenta. En números, para las anclas 1, 3 y 5 el error de estimación del punto 15 es de 0.44 metros. Si además se le añade una nueva ancla NLOS-DDP al algoritmo, como se muestra en la Figura 6-10, el error vuelve a crecer. Es decir, estudiando el punto 15 con las anclas 1, 3, 4 y 5 el error de posición es de 0.58 metros.

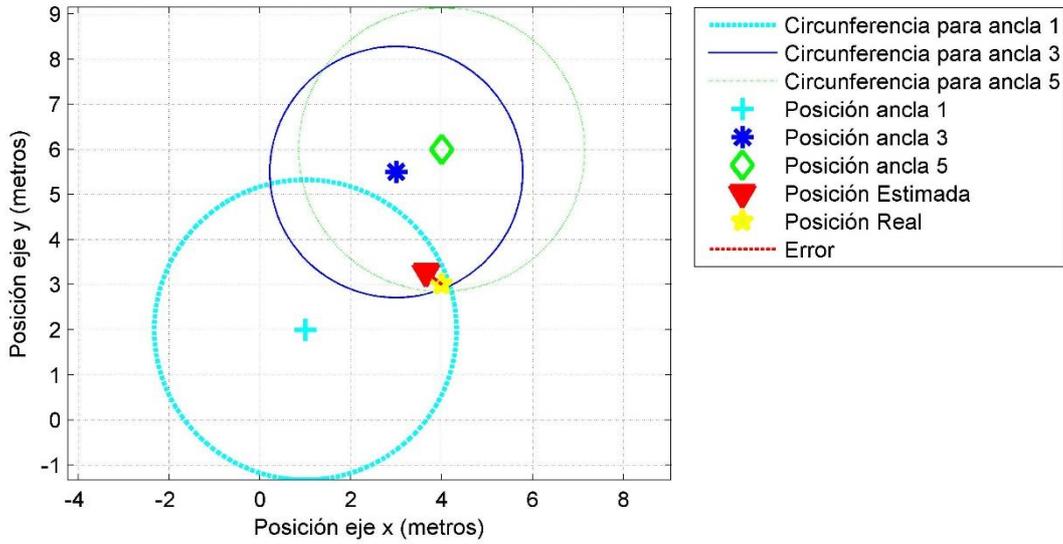


Figura 6-9: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3 y 5 para el punto 15.

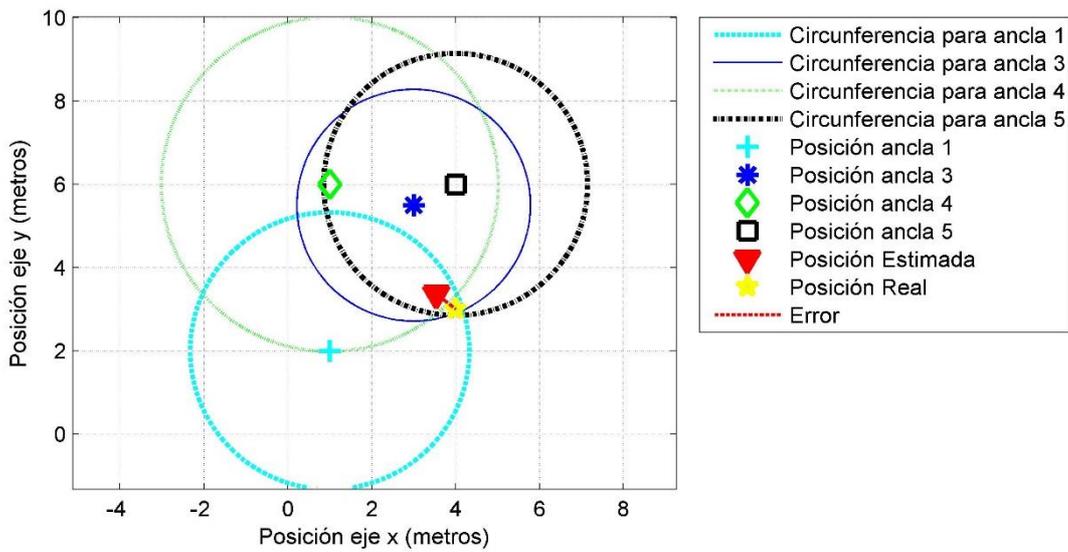


Figura 6-10: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3, 4 y 5 para el punto 15.

Por último, en la Figura 6-11 se observa la respuesta del algoritmo para estimar la posición de un punto con tres medidas con canal NLOS-DDP, sin ancla con visión de rayo directo. En este caso, la estimación de la posición del punto 15 por las anclas con canal NLOS-DDP 1, 3 y 4 genera un error de 0.62 metros. Tal y como se estipulaba, este error es superior al de la Figura 6-9 y Figura 6-10, donde el estudio se realiza con un ancla LOS. Aun así, un error de 0.62 metros podría ser aceptable o asumible para según qué uso, funcionalidad o aplicación.

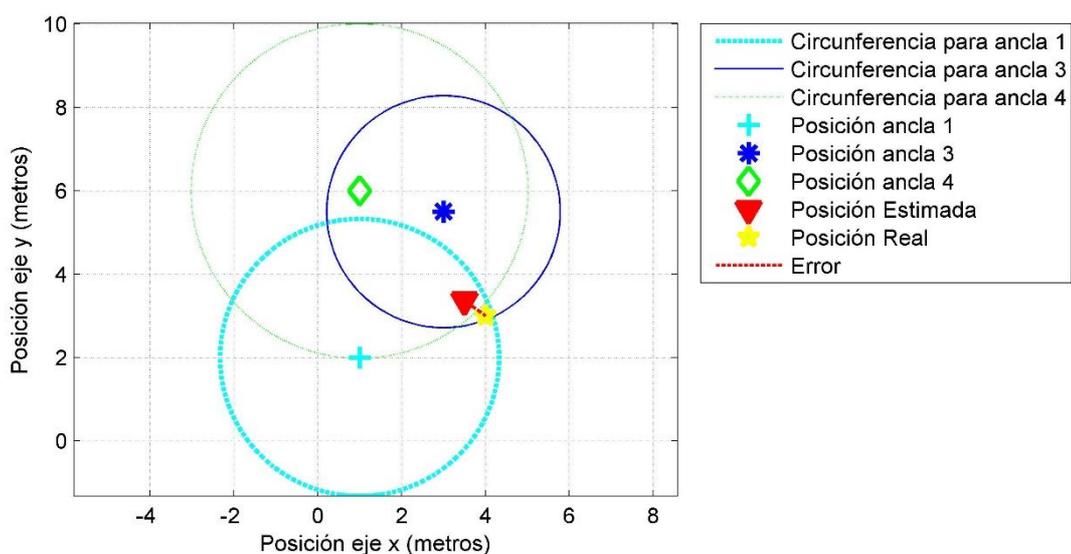


Figura 6-11: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3 y 4 para el punto 15.

De esta forma, y a modo resumen de las diferentes configuraciones analizadas para el punto 15, en la Figura 6-12 se aprecia el aumento de error a medida que se van usando más anclas NLOS-DDP y menos medidas LOS.

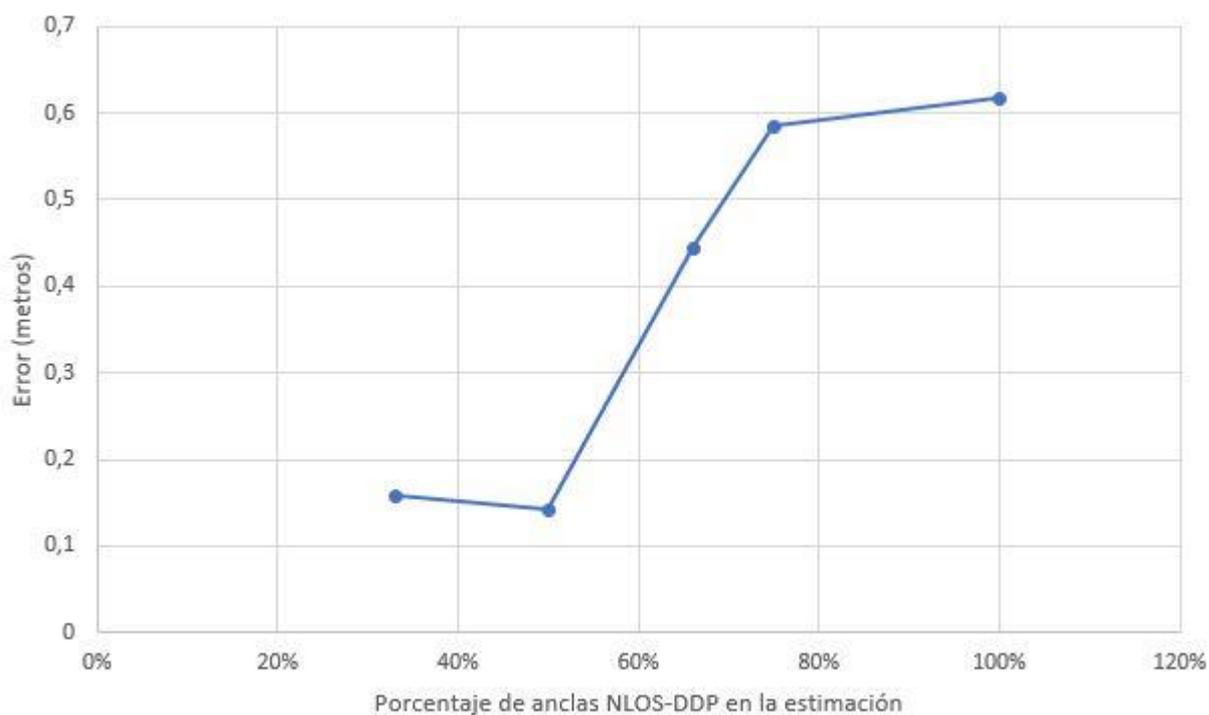


Figura 6-12: Representación gráfica del error según porcentaje de medidas NLOS-DDP para el punto de estudio 15.

En concreto, los porcentajes de la Figura 6-10 hacen referencia a la siguiente configuración de anclas, indicada en la Tabla 6-1:

Configuración	Porcentaje
2 LOS y 1 NLOS-DDP	33%
2 LOS y 2 NLOS-DDP	50%
1 LOS y 2 NLOS-DDP	66%
1 LOS y 3 NLOS-DDP	75%
3 NLOS-DDP	100%

Tabla 6-1: Relación entre las distintas configuraciones y el porcentaje de anclas NLOS-DDP.

Como conclusión, se podría afirmar que el error obtenido es bastante aceptable a pesar de las medidas NLOS-DDP, resaltando que depende también de la función con la que se implante, ya que un error de decenas de centímetros es abordable para ciertas aplicaciones. Cabe resaltar que esta conclusión es aún prematura, ya que el nivel de estudio es de gráficas de puntos concretos, no de un conjunto de errores.

6.3 Gráficas del conjunto de puntos.

Una vez que se han analizado posiciones por separado, pasamos a ilustrar el efecto de los diferentes canales para todos los puntos y un conjunto de anclas concretas. Es decir, cada punto tendrá un conjunto de condiciones de visión LOS/NLOS concreto para un grupo de anclas, por lo que en una misma gráfica se podrán observar los diferentes tipos de canal y sus errores.

En la Figura 6-13 se ha realizado el estudio de todas las posiciones para las anclas 1, 4 y 6. En esta gráfica se muestra la unión de la Posición Estimada y Posición Real mediante un segmento, indicando el formato de este el tipo de configuración de anclas que afecta al punto. De este modo, la línea continua indica que la posición ha sido estimada por tres anclas LOS, la línea discontinua con particiones únicamente estrechas hace referencia a una estimación con dos anclas LOS y una NLOS-DDP, la línea discontinua en la que se alternan particiones anchas y estrechas, muestra una estimación de posición por un ancla LOS y dos anclas NLOS-DDP, mientras que el segmento con particiones únicamente anchas indica que la estimación de la posición se ha realizado con un ancla LOS y dos anclas NLOS-UDP.

Se observa en la Figura 6-13 cómo los casos en los que los puntos presentan un ancla LOS y dos anclas NLOS-UDP los errores son mayores. Además, se advierte que las posiciones estimadas principalmente afectadas son las que se sitúan en la parte inferior de la gráfica, correspondientes a los puntos del 8 al 13, ya que el rayo tanto para el Ancla 4 como para la 1 pasa, para la mayoría de los casos, a través del armario metálico, produciéndose así el aumento del error de estimación. En concreto, para estas posiciones la longitud media del vector error entre los puntos Posición Real y Posición Estimada es de 2.742 metros. Además, cabe resaltar que la tecnología usada puede tener errores sensibles cuando se intenta calcular la distancia a una posición muy cercana.

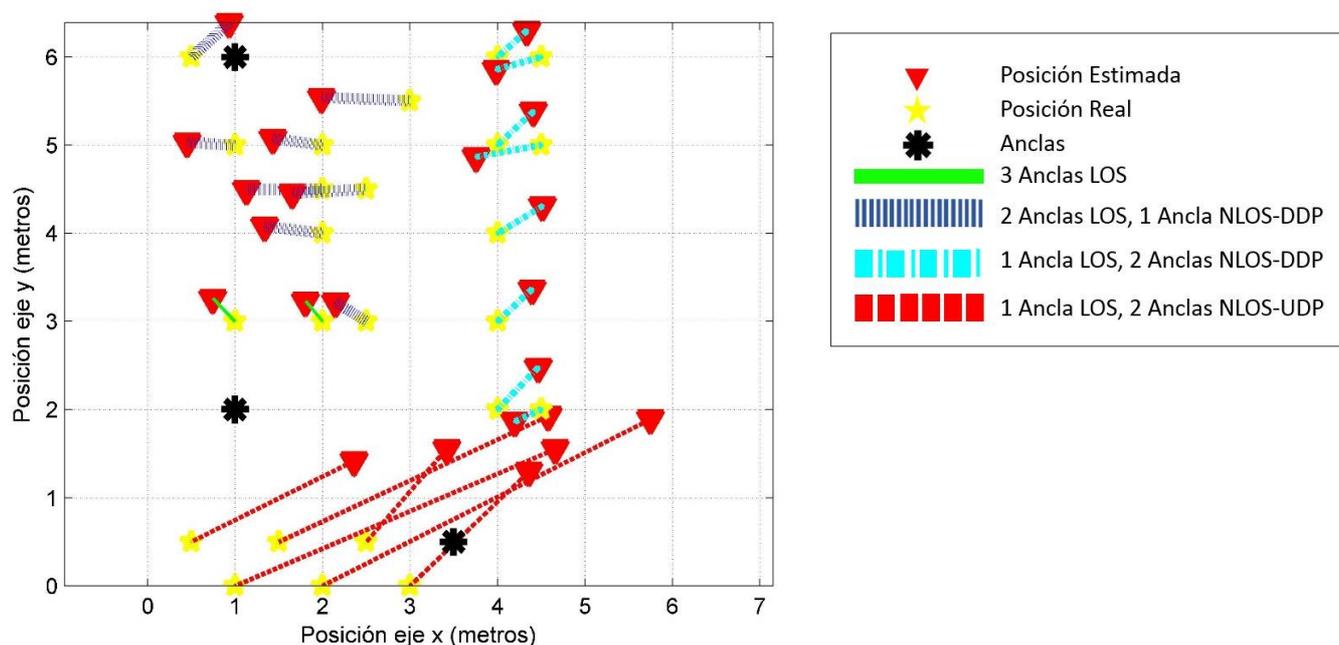


Figura 6-13: Representación del error de todas las posiciones para las anclas 1, 4 y 6 según el tipo de canal.

Por otro lado, para los puntos 1 y 2, en los que su estudio corresponde al de tres anclas LOS, sus errores son significativamente más pequeños que los demás, teniendo una longitud del vector error de 0.37 metros en el caso del primero, y de 0.30 metros para el segundo. Cabe destacar que estos valores son muy inferiores a los del caso de un ancla LOS y dos anclas NLOS-UDP, llegando la longitud del vector error a ser, en su media, más de ocho veces superior. Por tanto, las diferencias de longitud del vector error entre los casos LOS y NLOS-UDP son muy notables.

Observando las posiciones con un ancla LOS y dos anclas NLOS-DDP, que son las situadas en la parte derecha de la gráfica, se notan diferencias con respecto a las posiciones determinadas por un ancla LOS y dos anclas NLOS-UDP. El vector error de mayor longitud para este caso concreto corresponde con el punto 20, siendo su medida de 0.76 metros. Aún siendo el mayor, su valor es muy inferior a la longitud media del vector error para el caso de un ancla LOS y dos anclas NLOS-UDP, y relativamente cercano al valor medio del vector error de tres anclas LOS (0.33 metros). Matizar que los puntos 14 y 23 han sido clasificados como NLOS-DDP respecto al ancla 1, ya que aún abriendo la puerta completamente, esta hacía de obstáculo de la línea de visión directa entre las posiciones y el ancla mencionados.

Si comparamos los errores de los puntos con un ancla LOS y dos anclas NLOS-DDP con los puntos con dos anclas LOS y un ancla NLOS-DDP, los valores son ciertamente cercanos. En el primer caso, la longitud media del vector error es de 0.58 metros, mientras que para el segundo caso el mismo cálculo da un valor de 0.61 metros. Las medias obtenidas son muy próximas, destacando el valor del vector error del punto 24 para dos anclas LOS y un ancla NLOS-DDP, de 1.01 metros, ya que el rayo del Ancla 6 debe pasar hasta tres obstáculos diferentes para llegar, de ahí el gran valor de su error. Sorprende el hecho de que con dos anclas LOS el error medio sea mayor que con un ancla LOS. Esto puede ser debido a las condiciones puntuales de la medida. Sin embargo, sí se podría confirmar que,

en este estudio concreto, las medidas NLOS-DDP generan unos errores muy aceptables.

En la Tabla 6-2 se muestran los errores medio, mínimo y máximo organizados según el tipo de canal que representa.

TIPO DE CASO	Valor máximo (metros)	Valor mínimo (metros)	Media (metros)
3 Anclas LOS	0.37	0.30	0.33
2 Anclas LOS, 1 Ancla NLOS-DDP	1.01	0.40	0.61
1 Ancla LOS, 2 Anclas NLOS-DDP	0.76	0.35	0.58
1 Ancla LOS, 2 Anclas NLOS-UDP	4.21	1.89	2.74

Tabla 6-2: Representación de los valores máximo, mínimo y media de la longitud del vector error entre las posiciones real y estimada según tipo de canal.

El valor mínimo del caso con un ancla LOS y dos anclas NLOS-DDP es muy bajo, ya que corresponde al punto 23, que está situado justo detrás de la puerta. Para este punto y para el 14, como destacué anteriormente, cabía la posibilidad de variaciones de error según la posición exacta de la puerta en el momento de la medida. Por ello, el valor del error en este punto se asemeja mucho a los valores de los errores para el caso de tres anclas LOS.

Si representamos los resultados de la Tabla 6-2, obtenemos una línea creciente según el tipo de ancla, siendo, de forma general, las peores medidas las NLOS-UDP seguidas de las NLOS-DDP, donde las LOS suelen ser las más precisas. Por tanto, ordenando los casos según número y tipo de anclas de menos favorables a más, obtenemos la Figura 6-14. De este modo, la primera barra horizontal comenzando por arriba corresponde al caso de 1 Ancla LOS, 2 Anclas NLOS-UDP, la segunda a 1 Ancla LOS, 2 Anclas NLOS-DDP, la tercera a 2 Anclas LOS, 1 Ancla NLOS-DDP y la última se corresponde con el caso 3 Anclas LOS.

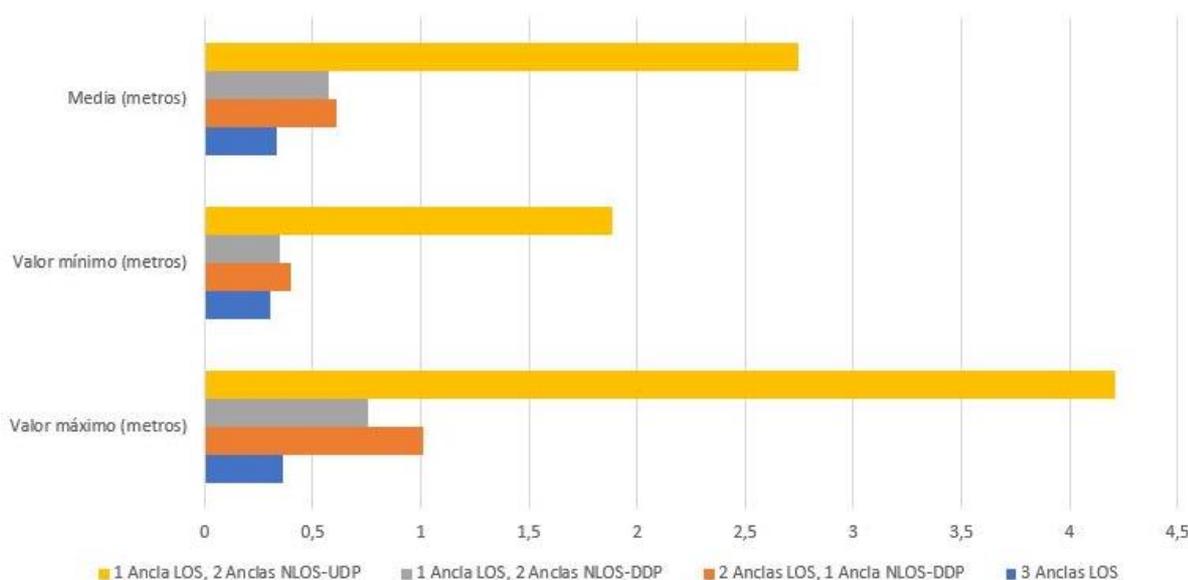


Figura 6-14: Representación gráfica en barras del error donde se comparan los distintos tipos de casos.

En la Figura 6-14 se observa cómo los distintos valores de los casos 1 Ancla LOS, 2 Anclas NLOS-DDP y 2 Anclas LOS, 1 Ancla NLOS-DDP son bastante cercanos, mientras que destaca el gran valor de la longitud del vector error para el caso 1 Ancla LOS, 2 Anclas NLOS-UDP, y el pequeño valor para el caso 3 Anclas LOS.

Si comparamos los valores máximos, mínimos y media por separado, observamos un comportamiento generalizado en el que el error va aumentando del caso más favorable al menos. Esto podemos observarlo en la Figura 6-15, Figura 6-16 y Figura 6-17, donde se representa el valor máximo, el valor mínimo y la media, respectivamente.

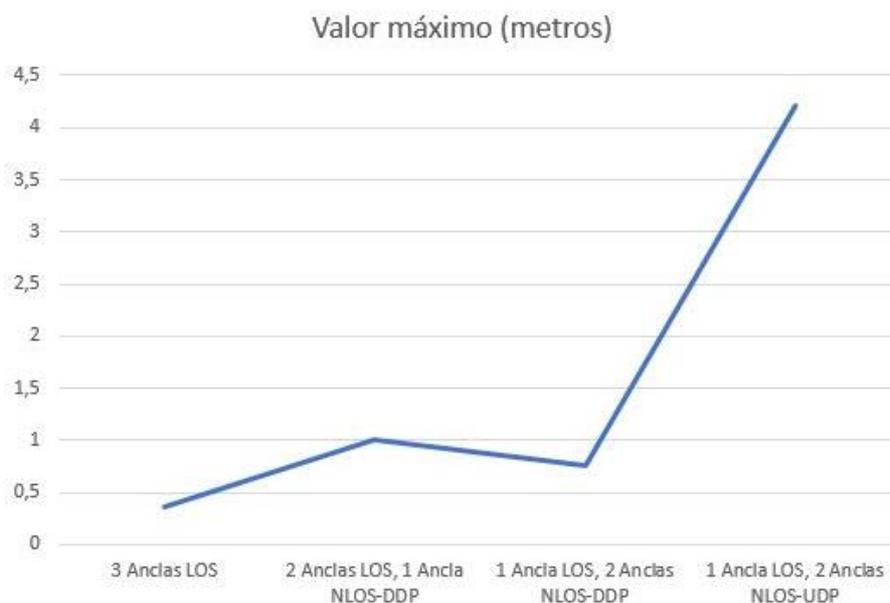


Figura 6-15: Representación de la longitud máxima del vector error de la Tabla 6-2.

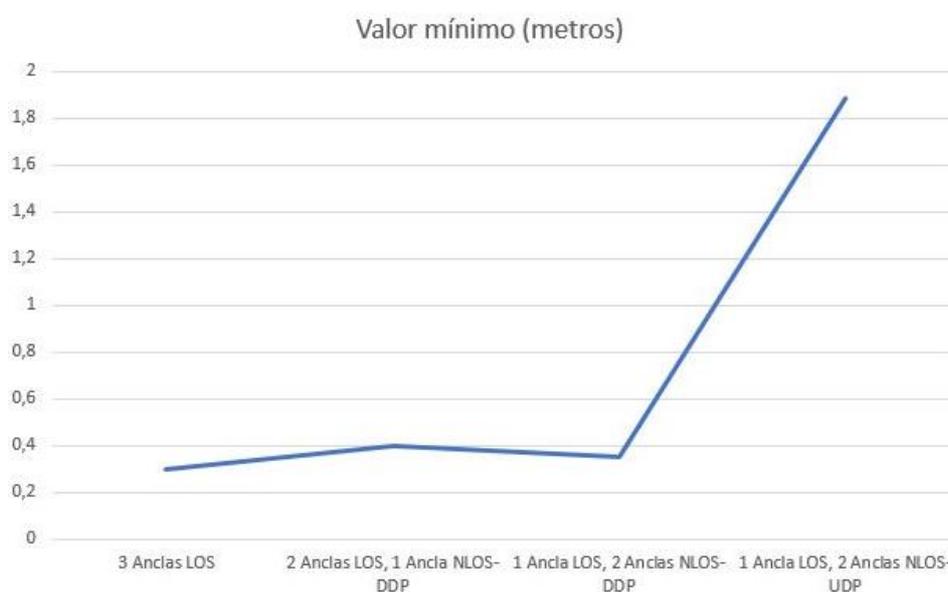


Figura 6-16: Representación de la longitud mínima del vector error de la Tabla 6-2.

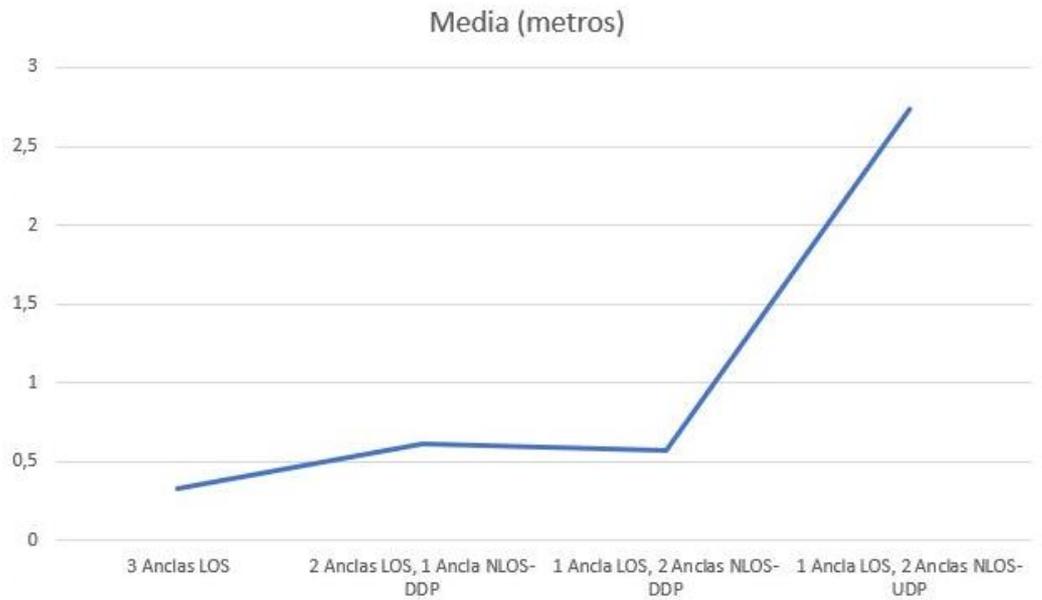


Figura 6-17: Representación de la longitud media del vector error de la Tabla 6-2.

Agrupando las tres gráficas anteriores en una, se observa cómo el comportamiento se mantiene. Otra forma de ver el desarrollo del error es en la Figura 6-18, donde para el mismo caso al de la Figura 6-14 se aplica otro modelo y formato de gráfica, en el que se vislumbra de nuevo como el error va aumentando según se va avanzando a casos más desfavorables, siendo destacable la gran pendiente de la recta entre los dos últimos casos.

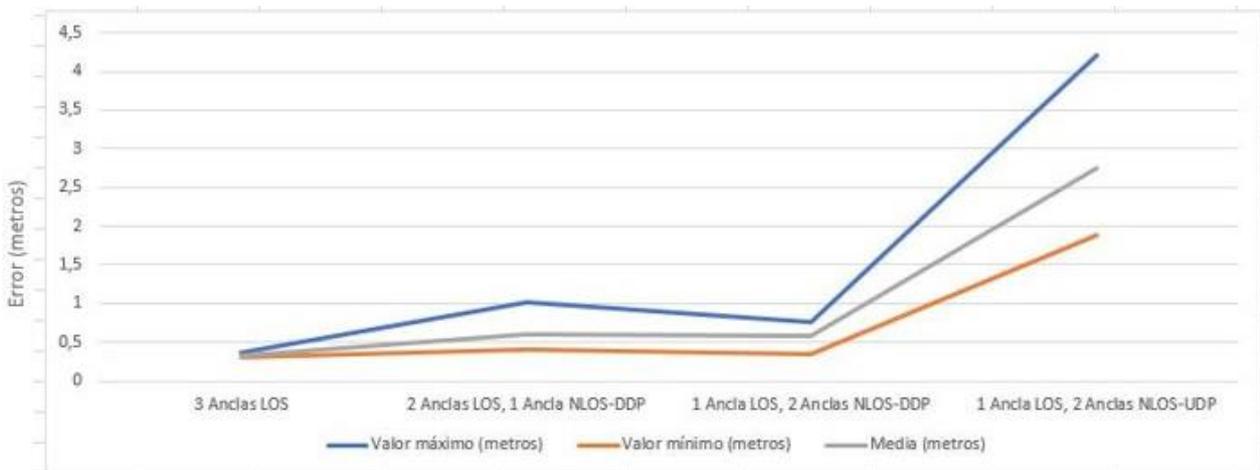


Figura 6-18: Representación conjunta de la longitud máxima, mínima y media del error de la Tabla 6-2.

Por tanto, en esta gráfica se puede confirmar que el error introducido por medidas NLOS-DDP es sostenible, difiriendo mucho, a su vez, de las medidas con anclas NLOS-UDP.

6.4 Gráficas de puntos concretos añadiendo medidas NLOS

Otra forma de enfocar el estudio de la resistencia del método es viendo el comportamiento para cada posición en concreto. Al comienzo del desarrollo práctico se han mostrado las circunferencias que generan el punto estimado por el método y su error. Seguidamente, se ha estudiado el error de todos los puntos para un conjunto fijo de anclas. A continuación, se completa el estudio mostrando, para cada punto concreto, cómo afectan al error los diferentes tipos de medidas. De este modo, en la Figura 6-19 podemos observar las diferencias de error de estimación según se añadan medidas NLOS-DDP o NLOS-UDP. En esta gráfica se muestran diferentes errores para el punto de estudio según los tipos de anclas. Se parte de la posición real y se calculan las posiciones estimadas de los tres casos, para después generar el vector error que los une con el punto original.

El error con tres medidas LOS corresponde al análisis con las anclas 1, 3 y 4. La medida NLOS-DDP que se añade después pertenece al ancla 5, mientras que para la posición estimada en la que se suma un ancla NLOS-UDP se ha añadido el Ancla 2 a las tres medidas LOS. De forma general, en todas las gráficas que siguen este formato, destaca la gran diferencia entre el último y penúltimo caso, siendo la medida únicamente con anclas LOS la que presenta menor error.

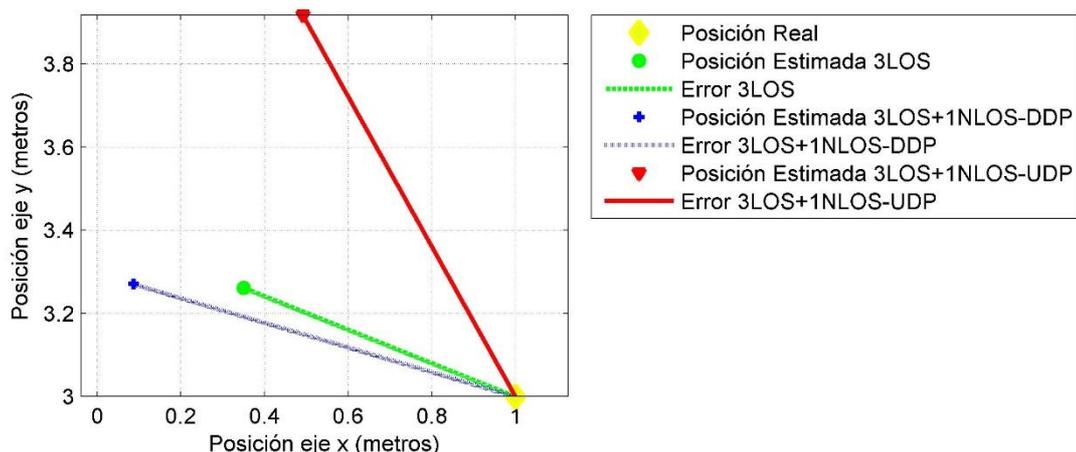


Figura 6-19: Comparación del error añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para el punto 1 de estudio.

Para el caso de la Figura 6-19, la longitud del vector error para el caso de tres medidas LOS, es de 0.70 metros. Asimismo, al añadir la medida NLOS-DDP se produce un error de 0.82 metros, siendo cercana al error de la medida LOS, y distante de la del caso de añadir una medida NLOS-UDP, donde el vector error mide 1.09 metros.

Analizando otros puntos, observamos que las proporciones de los errores cambian. De este modo, en la Figura 6-20 es considerable la diferencia de error entre la estimación con todas las medidas LOS y las otras dos. De hecho, en la medida con tres anclas LOS y una NLOS-DDP la longitud del vector es levemente superior a 6 veces la del caso de tres anclas LOS. Por tanto, en el caso del punto 3, la medida NLOS-DDP introduce un error relevante respecto al caso de la estimación con las tres medidas LOS.

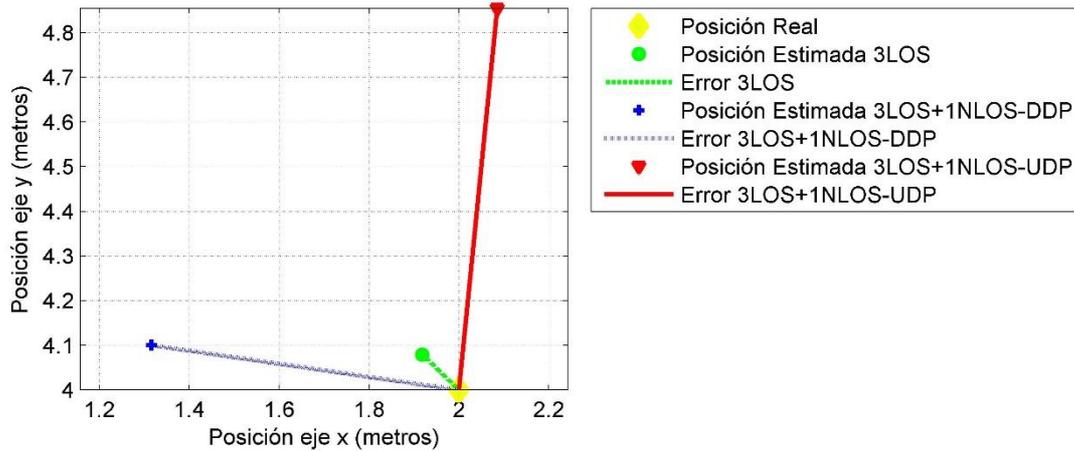


Figura 6-20: Comparación del error añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para el punto 3 de estudio.

Sin embargo, si realizamos el mismo estudio sobre el punto 4, se observa en la Figura 6-21 cómo el error introducido por el ancla NLOS-DDP, de 0.34 metros, es totalmente admisible. En este caso, la estimación con tres anclas LOS es muy precisa, con un error de tan solo 0.11 metros, y la longitud del vector introduciendo un ancla NLOS-UDP se dispara hasta 1.37 metros.

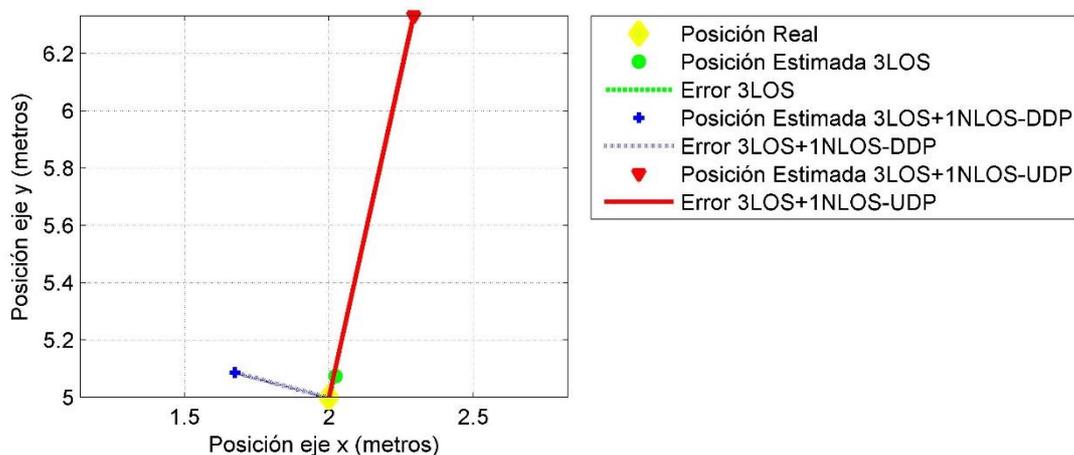


Figura 6-21: Comparación del error añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para el punto 4 de estudio.

Este comportamiento, donde el caso de visión directa tiene una posición estimada muy cercana a la real y las medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP introducen errores de distinta magnitud y de reseñable diferencia respecto a las medidas LOS, se mantiene para la mayoría de los puntos, tal y como se detalla en la Figura 6-22 y Figura 6-23, correspondiendo con los puntos bajo estudio 5 y 6, respectivamente.

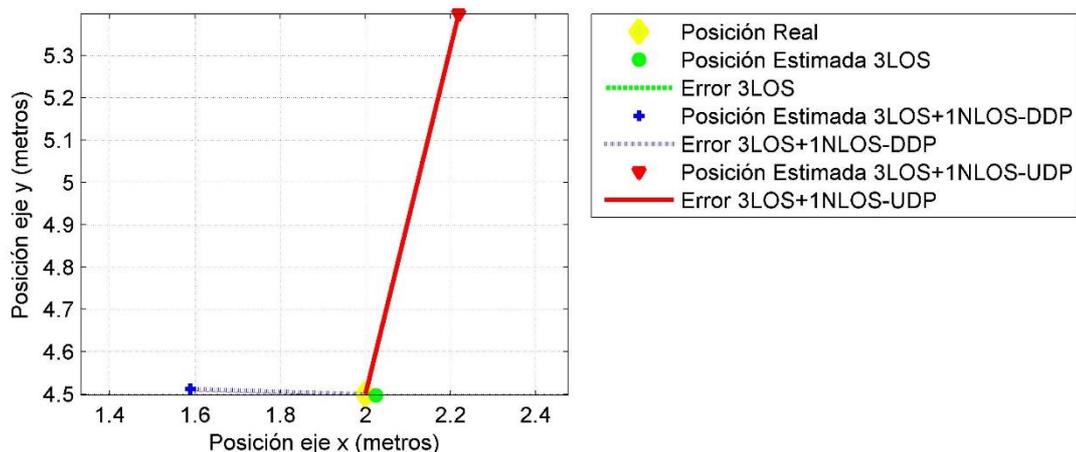


Figura 6-22: Comparación del error añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para el punto 5 de estudio.

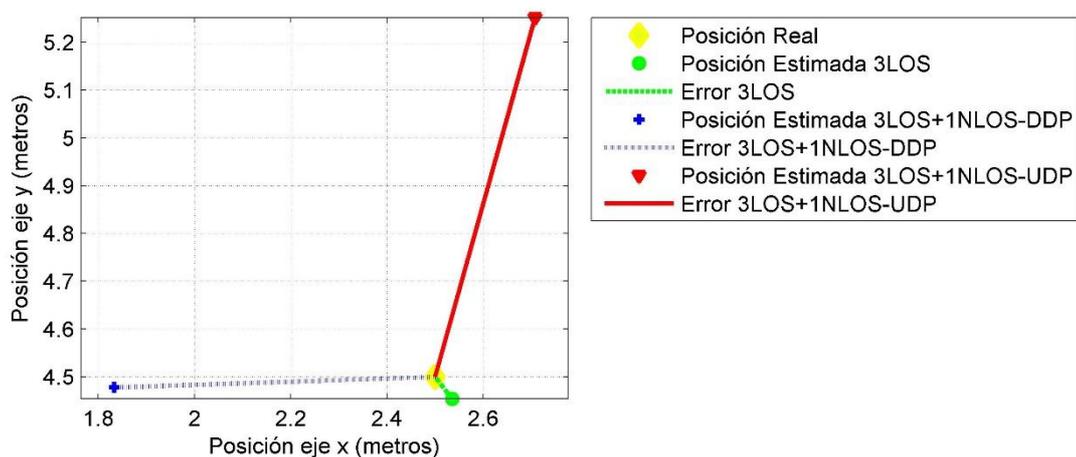


Figura 6-23: Comparación del error añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para el punto 6 de estudio.

Para obtener una conclusión de los distintos ejemplos de este formato de gráfica, agrupamos los diferentes errores según las anclas, tal y como podemos observar en la Figura 6-24. De esta forma, la parte de la izquierda hace referencia al error de tres anclas LOS, la del medio indica el error de tres medidas LOS y una NLOS-DDP, y la última de tres anclas LOS y una NLOS-UDP.

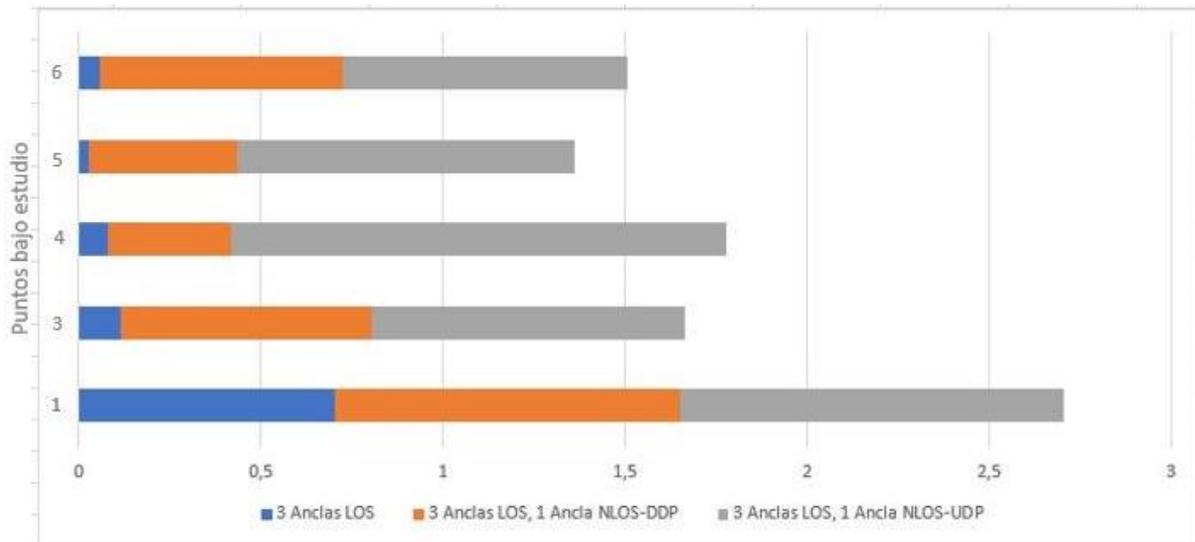


Figura 6-24: Comparación del error de tres anclas LOS añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP para cinco puntos diferentes.

En la Figura 6-24 se observa que, para ciertos puntos, el error de las medidas NLOS-DDP se distancia mucho del de los puntos con anclas NLOS-UDP (casos 3 y 4), mientras que para otros no tanto (casos 1, 2 y 5). Por tanto, se podría afirmar que, según estas gráficas, la validez o no de medidas NLOS-DDP con el método usado depende de las condiciones en las que se toman las muestras, manteniéndose de forma generalizada una diferencia notable con las medidas LOS.

Del mismo modo, si mostramos la media de los errores en una gráfica, se mantiene el comportamiento, tal como se expone en la Figura 6-25. La tendencia sigue siendo ascendente hacia los casos más desfavorecidos, pasando el error medio, en este ejemplo, de 0,08 metros en el caso de tres anclas LOS, a 0,67 metros añadiendo un ancla NLOS-DDP y finalizando en un error medio de 0,93 metros para el caso NLOS-UDP.

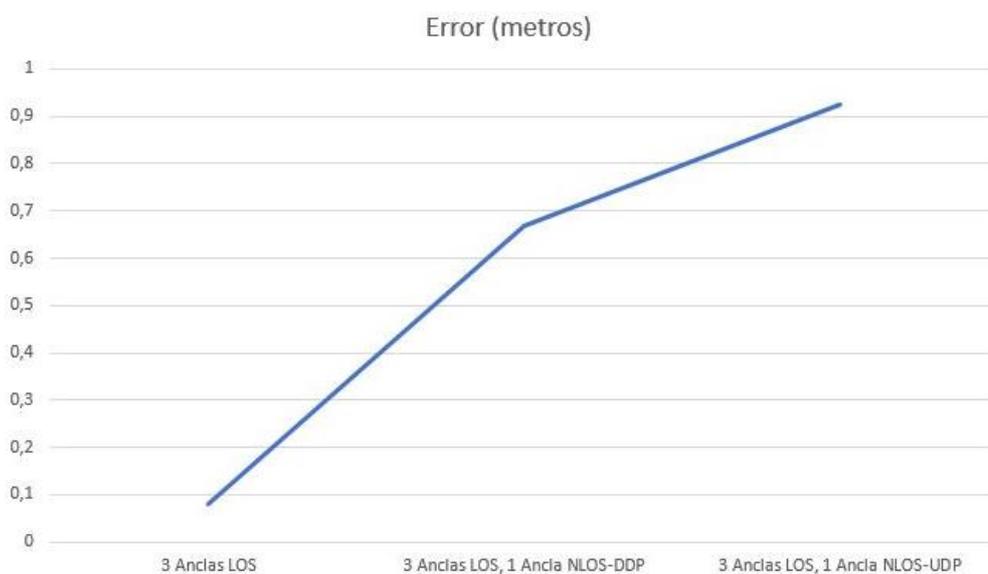


Figura 6-25: Comparación del error medio de tres anclas LOS añadiendo medidas NLOS-DDP y NLOS-UDP.

Una vez desglosados y estudiados los casos más concretos, pasamos a mostrar los resultados del análisis de forma más generalizada y contrastada.

6.5 Gráficas RMSE

A medida que se ha ido avanzando en el desarrollo del estudio práctico, se han ido dando ejemplos y comparaciones desde una configuración más individual, a una más general, mostrando el efecto de las diferentes medidas NLOS.

Una vez llegados a este punto, se ha conseguido alcanzar una serie de conclusiones analizando los diferentes casos y gráficas expuestas. Para entender realmente el impacto de las medidas NLOS 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 NLOS, es analizando el RMSE resultante. Para ello, se emplea la Ecuación 6-1:

$$RMSE \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{d}_i - d_i)^2} \quad (6-1)$$

donde d_i y \hat{d}_i son, respectivamente, la distancia real y la distancia estimada entre ancla y punto bajo estudio, y N el número de puntos.

Respecto a 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, la Ecuación 6-1 proporciona una aproximación al RMSE, ya que no se incluye la esperanza del error cuadrático, sino la media muestral del error cuadrático.

Para poder entender el impacto de los tipos de medidas NLOS, se han generado gráficas con distintas perspectivas. Para ello, primeramente, se han clasificado las medidas según sean LOS, NLOS-DDP o NLOS-UDP, para después agruparlas según el enfoque que se quiera presentar.

El método por el cual estimamos 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 unirlas. Tal y como podemos ver en la Figura 6-26, donde se muestra el RMSE resultante al añadir anclas NLOS-DDP a dos medidas LOS, si estimamos una posición con dos medidas LOS y una NLOS-DDP, el RMSE resultante es grande, exactamente de 1.87 metros. Se podría pensar que si seguimos añadiendo medidas NLOS-DDP el error aumentaría. Sin embargo, al ser esta primera estimación bastante distante de la posición real, al seguir añadiendo medidas NLOS-DDP el error cuadrático medio baja. De esta forma, una medida con dos anclas de visión directa al punto y otras dos NLOS-DDP dan un RMSE de 1.22 metros. El decremento es considerable al añadir una nueva ancla. Sin embargo, si se añade otra

mueva medida NLOS-DDP, el error cuadrático medio sigue bajando, pero con menos brusquedad, llegando a un valor de 1.09 metros. 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.

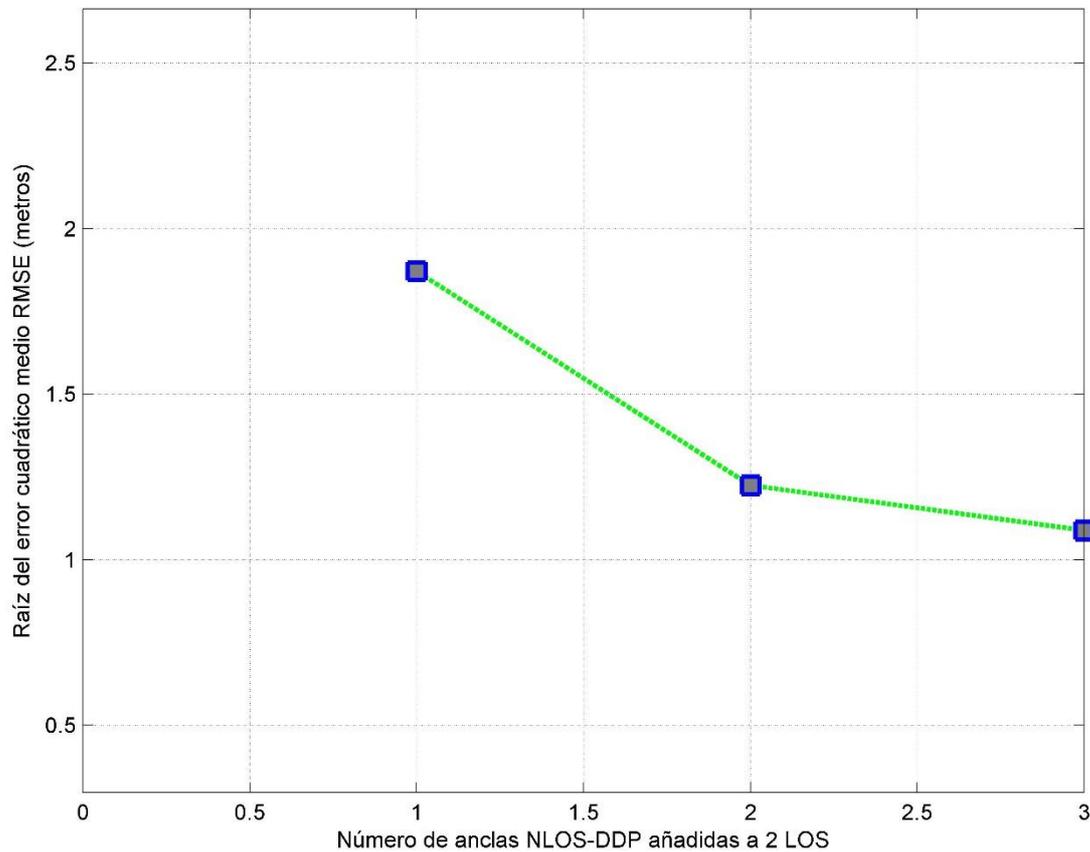


Figura 6-26: Gráfica donde se muestra el RMSE de dos anclas LOS a las que se van añadiendo anclas NLOS-DDP.

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. En la Figura 6-27, donde se muestra el RMSE de tres anclas LOS a las que se van añadiendo anclas NLOS-DDP, se observa que cuantas más anclas NLOS-DDP se le añada a la estimación de la posición, mayor es el error. Esta conducta era esperada, ya que con tres anclas de visión directa al objetivo la posición estimada es bastante precisa. Concretamente, el valor del RMSE en este caso es de 0.363 metros. Una vez que introducimos la medida estimada de una nueva ancla sin visión directa DDP, el error aumenta a 0.95 metros. Si seguimos añadiendo anclas de este tipo, el RMSE vuelve a subir a 1.31 metros. Estos datos indican las notables diferencias que presencian las estimaciones de medidas de visión directa frente a las de no visión directa DDP para el método single-hop de multilateración.

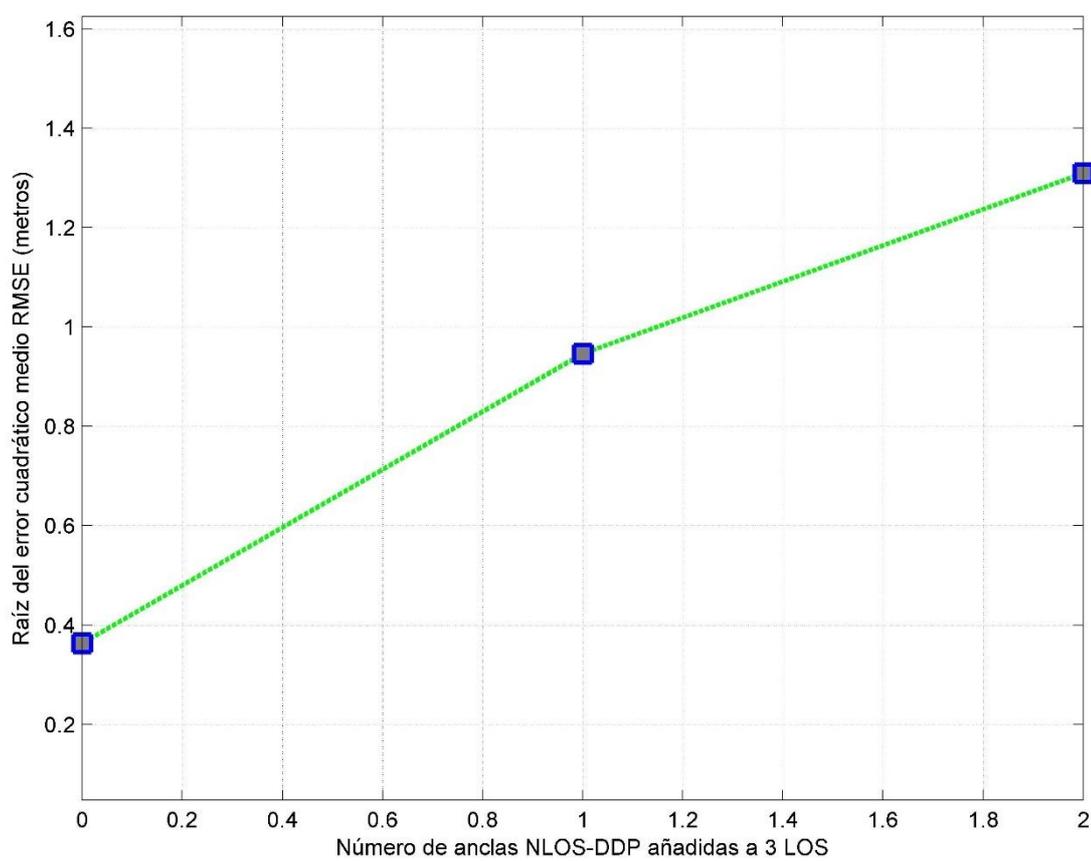


Figura 6-27: Gráfica donde se muestra el RMSE de tres anclas LOS a las que se van añadiendo anclas NLOS-DDP.

La línea de esta gráfica traza un camino casi lineal, creciendo el RMSE a medida que se aumentan las muestras NLOS-DDP. Este comportamiento es inverso al de la Figura 6-26, aunque ambos tienden a valores de error cercanos.

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.

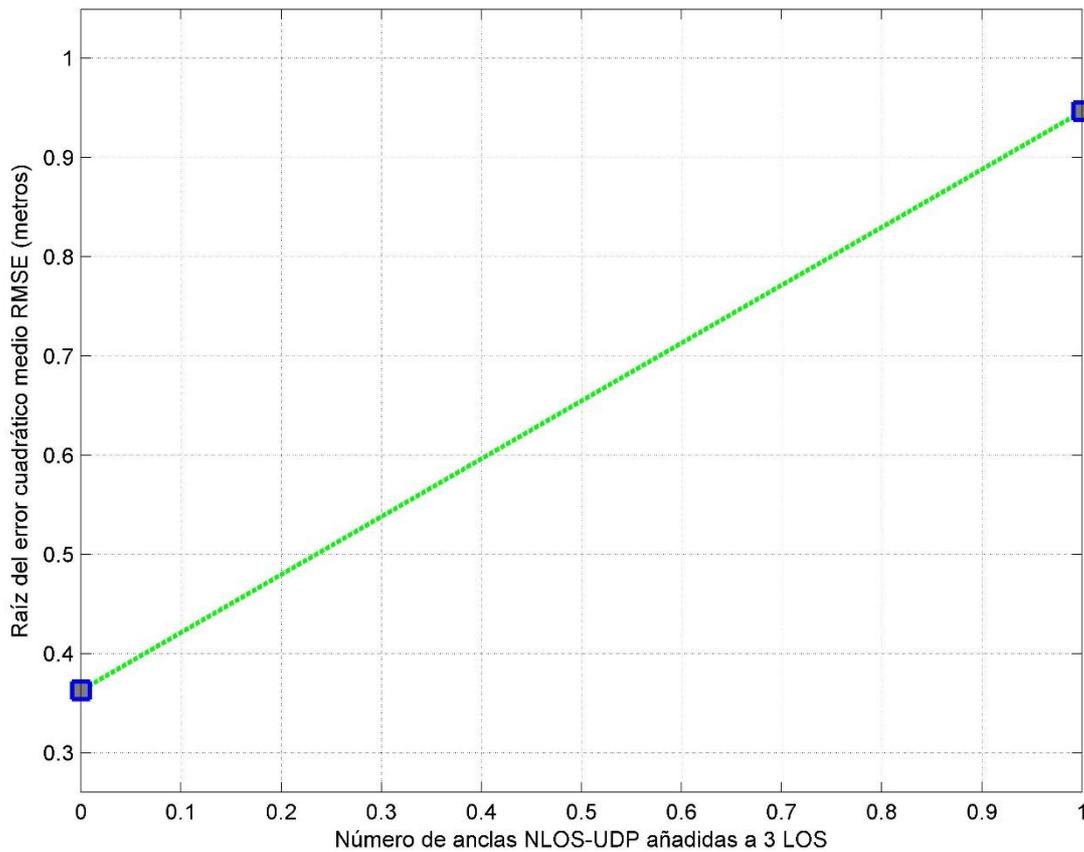


Figura 6-28: RMSE en función de tres anclas LOS a las que se añade un ancla NLOS-UDP.

En la Figura 6-28, 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. Concretamente, pasa de 0.37 metros a 0.95 metros de RMSE al añadirle la medida sin visión directa y sin canal de trayecto directo. A priori se podría pensar que, al realizar este mismo cálculo, pero partiendo de tres anclas con medidas NLOS-DDP, el error debería ser mucho mayor. Sin embargo, se comprueba en la Figura 6-29 que, partiendo de tres medidas sin línea de visión directa y canal de trayectoria directa, al añadirle la medida NLOS-UDP el error cuadrático medio crece con un factor cercano al del caso de las tres anclas LOS. Es más, la pendiente de la Figura 4-28 es de 0.57 metros/Nº Anclas NLOS-UDP añadidas, mientras que en la Figura 6-29 es de 0.62 metros/Nº Anclas NLOS-UDP añadidas. 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.

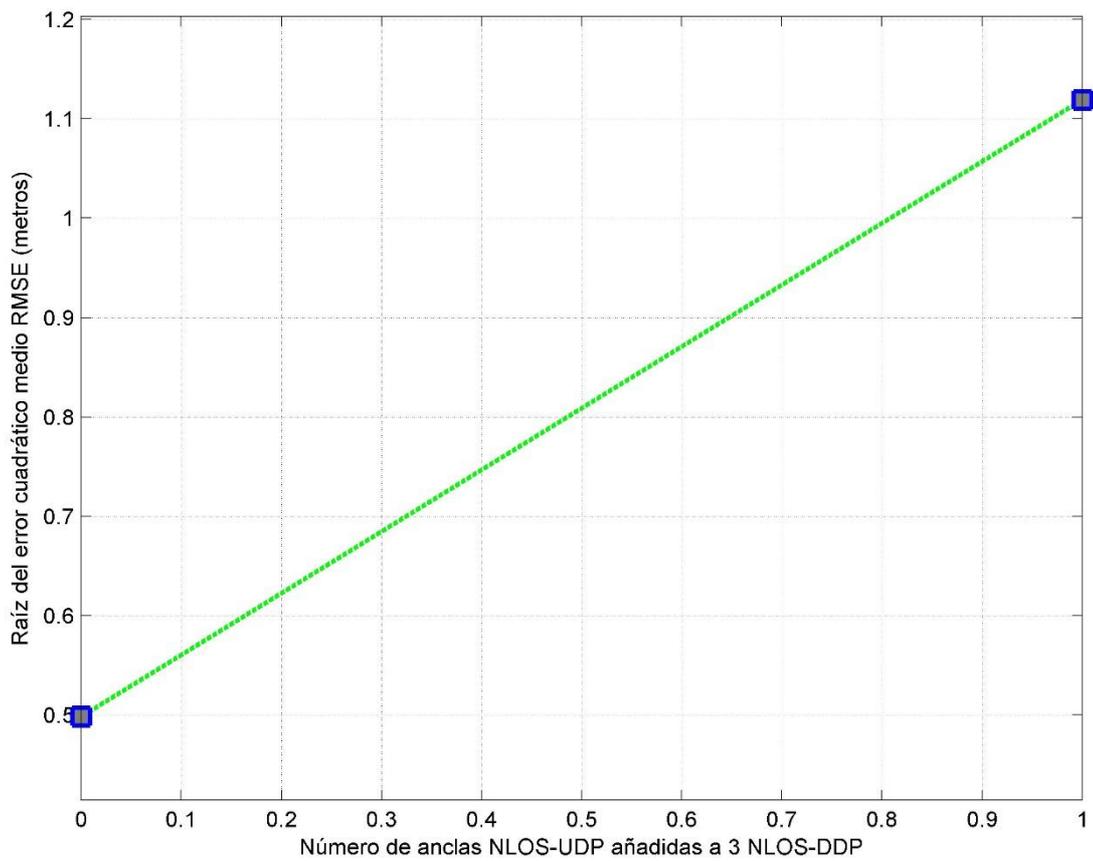


Figura 6-29: RMSE en función de tres anclas NLOS-DDP a las que se añade un ancla NLOS-UDP.

Por tanto, siendo los valores de las pendientes cercanas, se podría confirmar que estas medidas NLOS-DDP tienen una respuesta satisfactoria.

7 CONCLUSIÓN

*Tell me and I forget, teach me and I remeber, involve
me and I learn.*

*Dime y lo olvido, enséñame y lo recuerdo, involúcrame
y lo aprendo.*

- Benjamin Franklin -

El uso de medidas UWB para redes de sensores es, sin duda, uno de los campos que más éxito tiene en el ámbito de localización en interiores y en el que aún queda por investigar y avanzar.

Una vez se han analizado todos los casos posibles y se han representado de forma clara los resultados, se llegan a conclusiones sobre la validez o no de las medidas NLOS.

El propósito final del proyecto es 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.

Para completar la información dada en los puntos anteriores, se disponen una serie de gráficas, así como los códigos usados para generarlas. Este material busca servir de complemento y apoyo al contenido del proyecto.

8.1 Anexo A

En este apartado se presentan una serie de gráficas de apoyo al contenido del proyecto.

En la Figura 9-1, se observa el funcionamiento de cálculo del algoritmo para las anclas 1, 3 y 6 y el punto 16. En este caso, la medida se obtiene con un ancla LOS y dos NLOS-DDP.

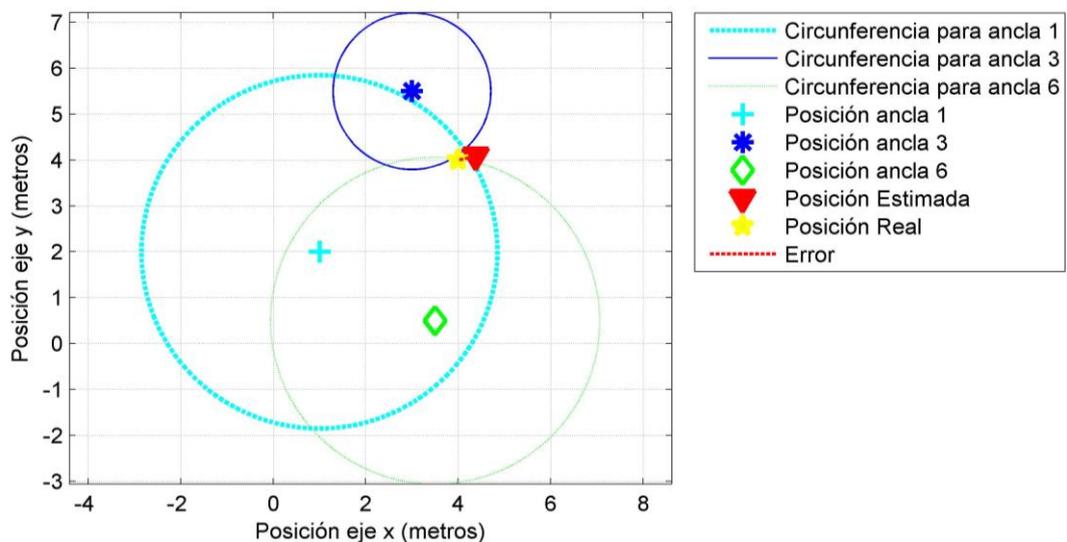


Figura 9-1: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 3 y 6 para el punto 16.

A continuación, se exponen, a forma de ejemplo, otras figuras de representación del algoritmo con tres anclas.

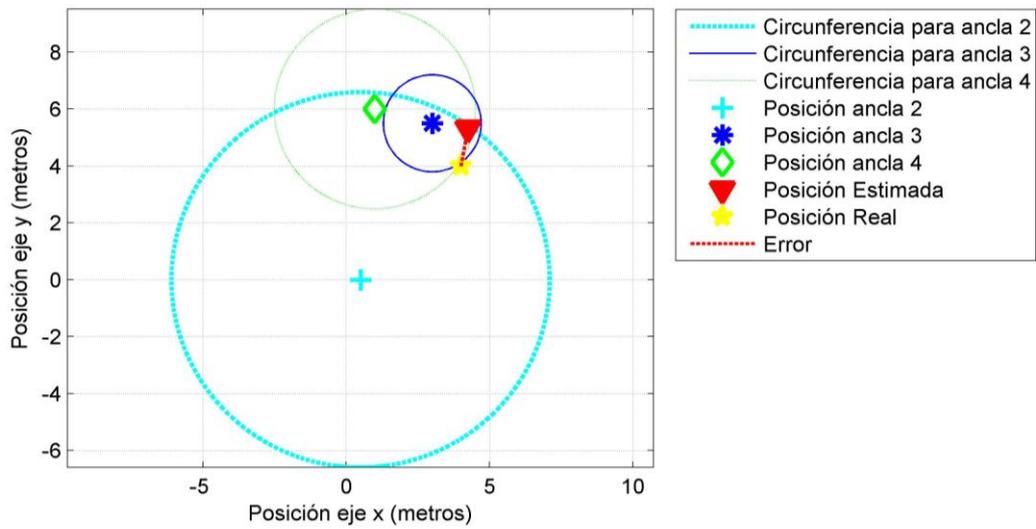


Figura 9-2: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 2, 3 y 4 para el punto 16.

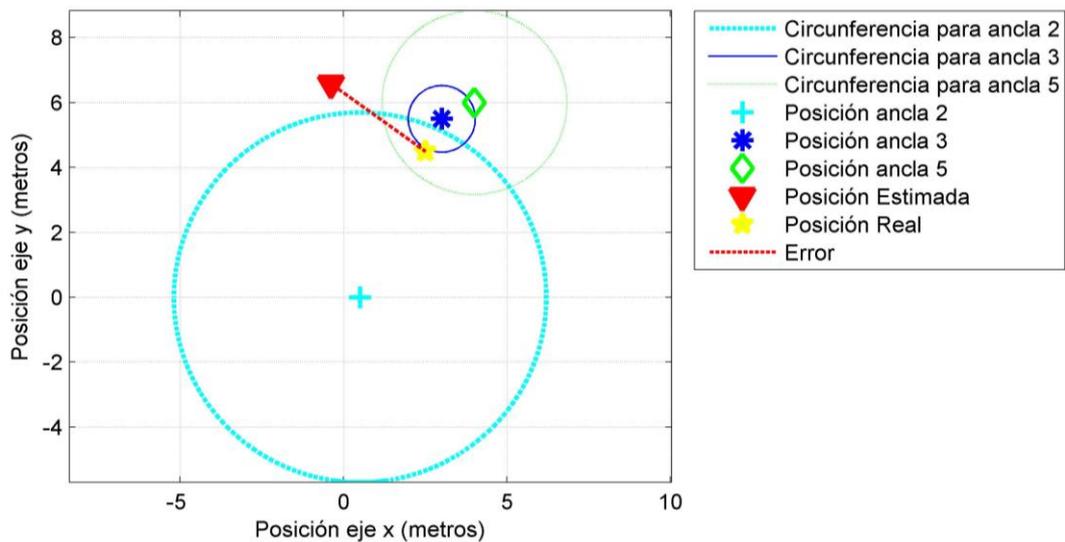


Figura 9-3: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 2, 3 y 5 para el punto 6.

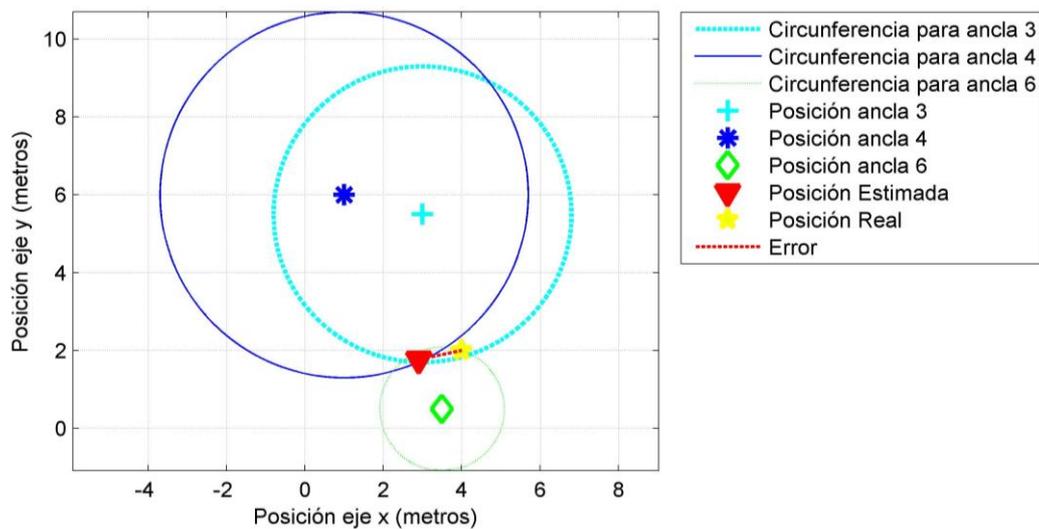


Figura 9-4: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 3, 4 y 6 para el punto 14.

A continuación, se amplía la muestra a combinaciones de cuatro anclas.

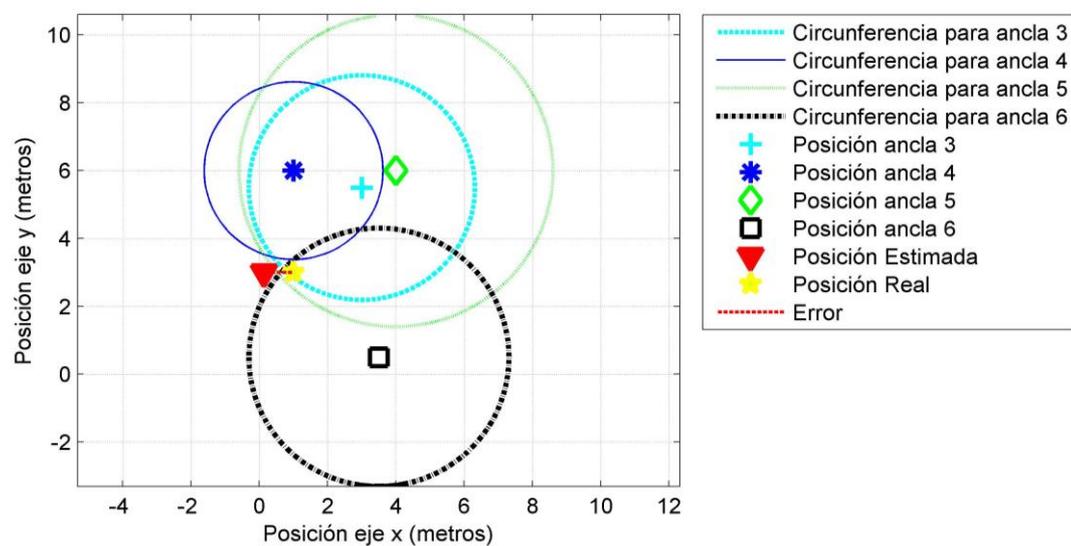


Figura 9-5: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 3, 4, 5 y 6 para el punto 1.

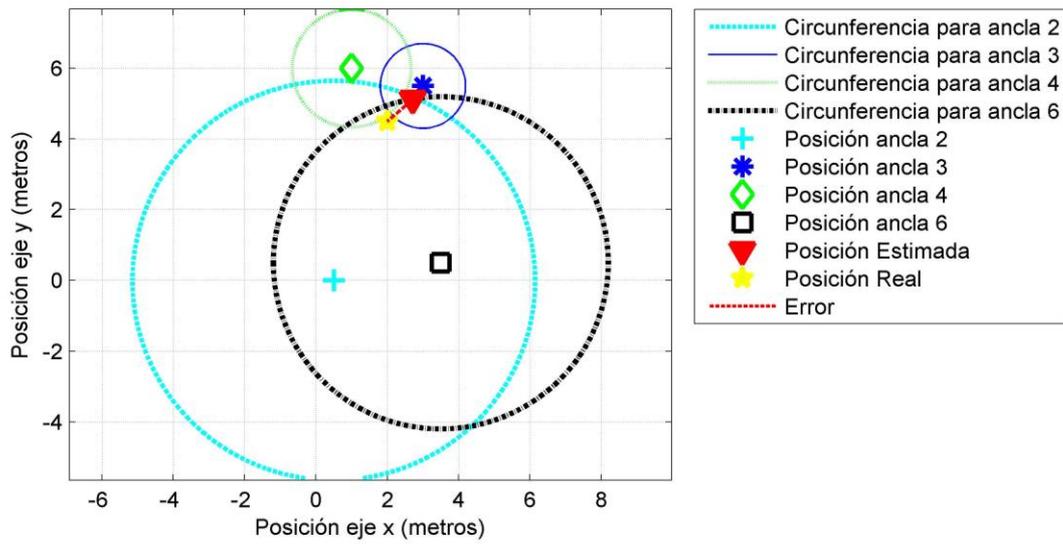


Figura 9-6: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 2, 3, 4 y 6 para el punto 5.

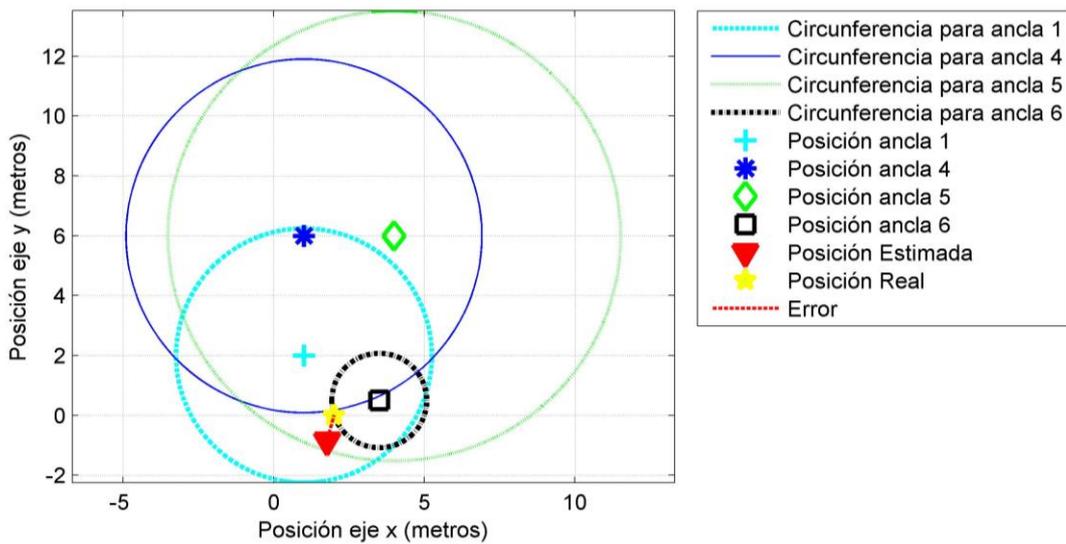


Figura 9-7: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 4, 5 y 6 para el punto 12.

Seguidamente, se finaliza mostrando ejemplos para cinco anclas.

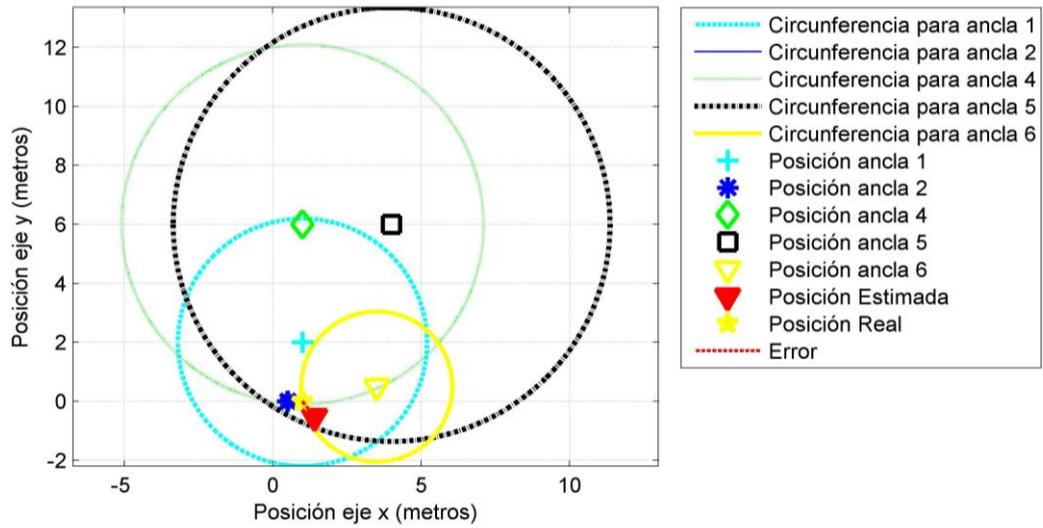


Figura 9-8: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 2, 4, 5 y 6 para el punto 8.

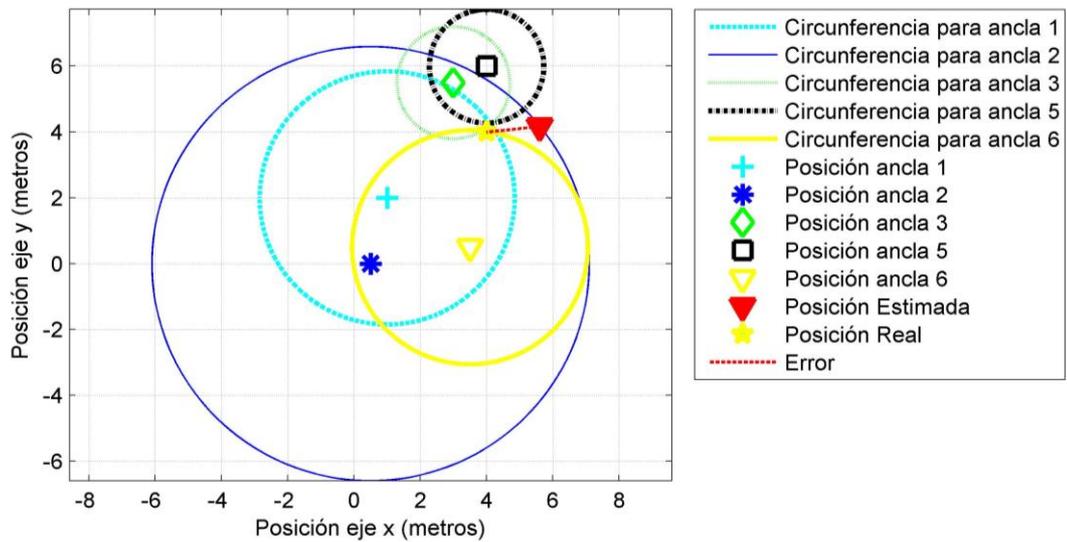


Figura 9-9: Representación gráfica del algoritmo de multilateración single-hop de las anclas 1, 2, 4, 5 y 6 para el punto 16.

8.2 Anexo B

En este apartado se muestran los códigos usados para generar las gráficas del proyecto.

- Fichero: GraficaCircunferencias_3Anclas.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: GraficaCircunferencias_3Anclas
%%% Fecha: 12/07/2018
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para generar
%%%                gráficamente la posición estimada de unos puntos dada
%%%                por 3 anclas, haciendo uso del algoritmo de localización
%%%                single-hop de multilateración.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all

%Extracción de datos tomados
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');

%Variable para crear matriz de errores
numeroError=0;

%Bucle para crear combinaciones de 5 Posiciones_Anclas
for i=1:4 %Ancla1

for j=i+1:5 %Ancla2

for k=j+1:6 %Ancla3

%Variable índice para generar una tabla con el conjunto de errores
numeroError=numeroError+1;

%Bucle para analizar todos los puntos
for p=1:25
switch i
case 1
d11=Ancla1(p,1)
case 2
d11=Ancla2(p,1)
case 3
d11=Ancla3(p,1)
case 4
d11=Ancla4(p,1)
end
switch j
case 2

```

```

        d22=Ancla2(p,1)
    case 3
        d22=Ancla3(p,1)
    case 4
        d22=Ancla4(p,1)
    case 5
        d22=Ancla5(p,1)
end
switch k
    case 3
        d33=Ancla3(p,1)
    case 4
        d33=Ancla4(p,1)
    case 5
        d33=Ancla5(p,1)
    case 6
        d33=Ancla6(p,1)
end

%Definición de las posiciones de cada ancla
y1=Posiciones_Anclas(i,1);
x1=Posiciones_Anclas(i,2);
y2=Posiciones_Anclas(j,1);
x2=Posiciones_Anclas(j,2);
y3=Posiciones_Anclas(k,1);
x3=Posiciones_Anclas(k,2);

%Algoritmo multilateración single-hop
A=[ 2*(x1-x3) 2*(y1-y3); 2*(x2-x3) 2*(y2-y3)];
b=[ x1^(2)-x3^(2)+y1^(2)-y3^(2)+d33^(2)-d11^(2);
    x2^(2)-x3^(2)+y2^(2)-y3^(2)+d33^(2)-d22^(2)];

%Posición estimada tras aplicar el algoritmo
Resultado=inv(A)*b;

%Agrupo las distancias y posiciones para
%poder dibujar los círculos de diámetro estimado
distancias_estimadas=[d11,d22,d33];
x_estimado=[x1,x2,x3];
y_estimado=[y1,y2,y3];

%Bucle para dibujar las diferentes
%circunferencias con estilos diferentes

for h=1:3
    y=y_estimado(h);
    x=x_estimado(h);
    d=distancias_estimadas(h);
    rango=-pi:0.001:pi;
    x_circunferencia=d*cos(rango)+x;
    y_circunferencia=d*sin(rango)+y;
    if h==1
        estilo='c--';
        linea=2;
    elseif h==2
        estilo='b-';
        linea=0.75;
    elseif h==3
        estilo='g:';
    end
end

```

```

    cir=plot(x_circunferencia,y_circunferencia,estilo,'LineWidth',linea),grid
on,axis equal, hold on
end

%Posiciones de las anclas
for g=1:length(x_estimado)
    if g==1
        estilo='c+';
        color='c';
    elseif g==2
        estilo='b*';
        color='b';
    elseif g==3
        estilo='gd';
        color='g';
    end

    plot(y_estimado(g),x_estimado(g),estilo,...
        'LineWidth',2,...
        'MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor',color)

end

%Dibujo del resultado estimado
plot(Resultado(2),Resultado(1),'rv',...
    'LineWidth',2,...
    'MarkerSize',10,...
    'MarkerEdgeColor','r',...
    'MarkerFaceColor',[1,0,0])

%Dibujo correcto del punto
plot(Posiciones_Puntos(p,1),Posiciones_Puntos(p,2),'yp',...
    'LineWidth',2,...
    'MarkerSize',10,...
    'MarkerEdgeColor','y',...
    'MarkerFaceColor',[0.9,1,0.1])

%Trazo de la línea de error
plot([Resultado(2) Posiciones_Puntos(p,1)],...
    [Resultado(1) Posiciones_Puntos(p,2)],'--red','LineWidth',1.5)

%Títulos de la gráfica y ejes
titulo=['Posiciones_Anclas ',num2str(i),' - ',num2str(j),...
    ' - ',num2str(k),' ', 'Punto ',num2str(p)];
ylabel('Posición eje y (metros)');
xlabel('Posición eje x (metros)');

%Descripción de la leyenda
leyenda1=['Circunferencia para ancla ',num2str(i)];
leyenda2=['Circunferencia para ancla ',num2str(j)];
leyenda3=['Circunferencia para ancla ',num2str(k)];

leyenda6=['Posición ancla ',num2str(i)];
leyenda7=['Posición ancla ',num2str(j)];
leyenda8=['Posición ancla ',num2str(k)];

```

```

legend(leyenda1,leyenda2,leyenda3,...
      leyenda6,leyenda7,leyenda8,...
      'Posición Estimada','Posición Real',...
      'Error','Location','NorthEastOutside');

%Generación del archivo imagen
print(gcf,'-djpeg','-r400',titulo)

%Tabla donde se almacenan los errores
error= sqrt((Posiciones_Puntos(p,1)-Resultado(2))^2+(Posiciones_Puntos(p,2)-
Resultado(1))^2);
TablaError(numeroError,p)=error;

hold off

end
    end
        end
            end

```

- Fichero: GraficaCircunferencias_4Anclas.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Nombre del archivo: GraficaCircunferencias_4Anclas
%% Fecha: 12/07/2018
%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%% Descripción: En este documento se dispone el código para generar
%%               gráficamente la posición estimada de unos puntos dada
%%               por 4 anclas, haciendo uso del algoritmo de localización
%%               single-hop de multilateración.
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
clear all
```

```

%Extracción de datos tomados
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');

%Variable para crear matriz de errores
numeroError=0;

%Bucle para crear combinaciones de 5 Posiciones_Anclas

for i=1:3 %Ancla1

```

```

for j=i+1:4 %Ancla2

for k=j+1:5 %Ancla3

for l=k+1:6 %Ancla4

%Variable índice para generar una tabla con el conjunto de errores
numeroError=numeroError+1;

%Bucle para analizar todos los puntos
for p=1:25
switch i
case 1
d11=Ancla1(p,1)
case 2
d11=Ancla2(p,1)
case 3
d11=Ancla3(p,1)
end
switch j
case 2
d22=Ancla2(p,1)
case 3
d22=Ancla3(p,1)
case 4
d22=Ancla4(p,1)
end
switch k
case 3
d33=Ancla3(p,1)
case 4
d33=Ancla4(p,1)
case 5
d33=Ancla5(p,1)
end
switch l
case 4
d44=Ancla4(p,1)
case 5
d44=Ancla5(p,1)
case 6
d44=Ancla6(p,1)
end

%Definición de las posiciones de cada ancla
y1=Posiciones_Anclas(i,1);
x1=Posiciones_Anclas(i,2);
y2=Posiciones_Anclas(j,1);
x2=Posiciones_Anclas(j,2);
y3=Posiciones_Anclas(k,1);
x3=Posiciones_Anclas(k,2);
y4=Posiciones_Anclas(l,1);
x4=Posiciones_Anclas(l,2);

%Algoritmo multilateración single-hop
A=[ 2*(x1-x4) 2*(y1-y4); 2*(x2-x4) 2*(y2-y4); 2*(x3-x4) 2*(y3-y4)];
b=[ x1^2-x4^2+y1^2-y4^2+d44^2-d11^2; ...
x2^2-x4^2+y2^2-y4^2+d44^2-d22^2; ...
x3^2-x4^2+y3^2-y4^2+d44^2-d33^2];

```

```

%Posición estimada tras aplicar el algoritmo
Resultado=inv(A'*A)*A'*b;

%Agrupo las distancias y posiciones para
%poder dibujar los círculos de diámetro estimado
distancias_estimadas=[d11,d22,d33,d44];
x_estimado=[x1,x2,x3,x4];
y_estimado=[y1,y2,y3,y4];

%Bucle para dibujar las diferentes
%circunferencias con estilos diferentes

for h=1:4
    y=y_estimado(h);
    x=x_estimado(h);
    d=distancias_estimadas(h);
    rango=-pi:0.001:pi;
    x_circunferencia=d*cos(rango)+y;
    y_circunferencia=d*sin(rango)+x;
    if h==1
        estilo='c--';
        linea=2;
    elseif h==2
        estilo='b-';
        linea=0.75;
    elseif h==3
        estilo='g:';
        linea=1.5;
    elseif h==4
        estilo='k-.';
        linea=2.5;
    end
end

cir=plot(x_circunferencia,y_circunferencia,estilo,'LineWidth',linea),grid
on,axis equal, hold on
end

%Posiciones_Puntosposición de las Posiciones_Anclas
for g=1:length(x_estimado)
    if g==1
        estilo='c+';
        color='c';
    elseif g==2
        estilo='b*';
        color='b';
    elseif g==3
        estilo='gd';
        color='g';
    elseif g==4
        estilo='ks';
        color='k';
    end
    plot(y_estimado(g),x_estimado(g),estilo,...
        'LineWidth',2,...
        'MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor',color)
end
End

```


- Archivo: GraficaCircunferencias_5Anclas.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: GraficaCircunferencias_5Anclas
%%% Fecha: 12/07/2018
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para generar
%%%                gráficamente la posición estimada de unos puntos dada
%%%                por 5 anclas, haciendo uso del algoritmo de localización
%%%                single-hop de multilateración.
%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
clear all
```

```

%Extracción de datos tomados
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');

%Bucle para crear combinaciones de 5 Posiciones_Anclas

for i=1:2 %Ancla1

for j=i+1:3 %Ancla2

for k=j+1:4 %Ancla3

for l=k+1:5 %Ancla4

    for m=l+1:6 %Ancla5

        %Bucle para analizar todos los puntos
        for p=1:25
            switch i
                case 1
                    d11=Ancla1(p,1)
                case 2
                    d11=Ancla2(p,1)
            end
            switch j
                case 2
                    d22=Ancla2(p,1)
                case 3
                    d22=Ancla3(p,1)
            end
            switch k
                case 3
                    d33=Ancla3(p,1)
                case 4
                    d33=Ancla4(p,1)
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

```

switch l
    case 4
        d44=Ancla4(p,1)
    case 5
        d44=Ancla5(p,1)
end
switch m
    case 5
        d55=Ancla5(p,1)
    case 6
        d55=Ancla6(p,1)
end

%Definición de las posiciones de cada ancla
y1=Posiciones_Anclas(i,1);
x1=Posiciones_Anclas(i,2);
y2=Posiciones_Anclas(j,1);
x2=Posiciones_Anclas(j,2);
y3=Posiciones_Anclas(k,1);
x3=Posiciones_Anclas(k,2);
y4=Posiciones_Anclas(l,1);
x4=Posiciones_Anclas(l,2);
y5=Posiciones_Anclas(m,1);
x5=Posiciones_Anclas(m,2);

%Algoritmo multilateración single-hop
A=[ 2*(x1-x5) 2*(y1-y5); 2*(x2-x5) 2*(y2-y5);
    2*(x3-x5) 2*(y3-y5); 2*(x4-x5) 2*(y4-y5)];

b=[ x1^(2)-x5^(2)+y1^(2)-y5^(2)+d55^(2)-d11^(2);
    x2^(2)-x5^(2)+y2^(2)-y5^(2)+d55^(2)-d22^(2);
    x3^(2)-x5^(2)+y3^(2)-y5^(2)+d55^(2)-d33^(2);
    x4^(2)-x5^(2)+y4^(2)-y5^(2)+d55^(2)-d44^(2)];

%Posición estimada tras aplicar el algoritmo
Resultado=inv(A'*A)*A'*b;

%Agrupo las distancias y posiciones para
%poder dibujar los círculos de diámetro estimado
distancias_estimadas=[d11,d22,d33,d44,d55];
x_estimado=[x1,x2,x3,x4,x5];
y_estimado=[y1,y2,y3,y4,y5];

%Bucle para dibujar las diferentes
%circunferencias con estilos diferentes
for h=1:5
    y=y_estimado(h);
    x=x_estimado(h);
    d=distancias_estimadas(h);
    rango=-pi:0.001:pi;
    x_circunferencia=d*cos(rango)+y;
    y_circunferencia=d*sin(rango)+x;
    if h==1
        estilo='c--';
        linea=2;
    elseif h==2
        estilo='b-';
        linea=0.75;
    elseif h==3
        estilo='g:';
    end
end

```

```

linea=1.5;
elseif h==4
estilo='k-.';
linea=2.5;
elseif h==5
estilo='y-';
linea=2;
end

cir=plot(x_circunferencia,y_circunferencia,estilo,'LineWidth',linea),grid,axis
equal, hold on
end

%Posiciones_Puntosición de las Posiciones_Anclas
for g=1:length(x_estimado)
if g==1
estilo='c+';
color='c';
elseif g==2
estilo='b*';
color='b';
elseif g==3
estilo='gd';
color='g';
elseif g==4
estilo='ks';
color='k';
elseif g==5
estilo='yv';
color='y';
end
plot(y_estimado(g),x_estimado(g),estilo,...
'LineWidth',2,...
'MarkerSize',10,...
'MarkerEdgeColor',color)

end

%Dibujo del resultado estimado
plot(Resultado(2),Resultado(1),'rv',...
'LineWidth',2,...
'MarkerSize',10,...
'MarkerEdgeColor','r',...
'MarkerFaceColor',[1,0,0])

%Dibujo correcto del punto
plot(Posiciones_Puntos(p,1),Posiciones_Puntos(p,2),'yp',...
'LineWidth',2,...
'MarkerSize',10,...
'MarkerEdgeColor','y',...
'MarkerFaceColor',[0.9,1,0.1])

%Trazo de la línea de error
plot([Resultado(2) Posiciones_Puntos(p,1)],...
[Resultado(1) Posiciones_Puntos(p,2)],'--red','LineWidth',1.5)

%Títulos de la gráfica y de los ejes
titulo=['Posiciones_Anclas ',num2str(i),' - ',num2str(j),...
' - ',num2str(k),' - ',num2str(l),' - ',num2str(m),' ', 'Punto
',num2str(p)];

```



```

Posiciones_Anclas=xlsread('A','ANCLAS');
Posiciones_Puntos=xlsread('A','POSICIONES');

%Bucle donde se genera la gráfica comparativa para un conjunto de puntos
for p=1:7

    %Anclas
    i=1;
    j=3;
    k=4;

    %Distancias al punto
    d11=A1(p,1);
    d22=A3(p,1);
    d33=A4(p,1);

    %Posiciones de las anclas
    y1=Posiciones_Anclas(i,1);
    x1=Posiciones_Anclas(i,2);
    y2=Posiciones_Anclas(j,1);
    x2=Posiciones_Anclas(j,2);
    y3=Posiciones_Anclas(k,1);
    x3=Posiciones_Anclas(k,2);

    %Cálculo del punto estimado mediante el algoritmo
    A=[ 2*(x1-x3) 2*(y1-y3); 2*(x2-x3) 2*(y2-y3)];
    b=[ x1^2-x3^2+y1^2-y3^2+d33^2-d11^2 ; x2^2-x3^2+y2^2-y3^2+d33^2-d22^2];

    Resultado=inv(A)*b;

%Dibujo de la posición del punto real
plot(Posiciones_Puntos(p,1),Posiciones_Puntos(p,2),'yd',...
'LineWidth',2,...
'MarkerSize',8,...
'MarkerEdgeColor','y',...
'MarkerFaceColor',[0.9,1,0.1]),hold on,grid on ,axis equal

%Dibujo de la posición del punto estimado con 3 anclas LOS
plot(Resultado(2),Resultado(1),'go',...
'LineWidth',2,...
'MarkerSize',5,...
'MarkerEdgeColor','g',...
'MarkerFaceColor',[0.1,1,0.1]),axis equal

%Dibujo del error de las 3 anclas LOS
P1=[Posiciones_Puntos(p,1) Posiciones_Puntos(p,2)];
P2=[Resultado(2) Resultado(1)];
plot([P1(1) P2(1)],[P1(2) P2(2)],'g--','LineWidth',2) ,axis equal

TablaErrores(p,1)=sqrt((P1(1)-P2(1))^2+(P1(2)-P2(2))^2);

%Inclusión de ancla LOS-DDP
l=5;
d44=A5(p,1);
y4=Posiciones_Anclas(l,1);
x4=Posiciones_Anclas(l,2);
%Nuevo error calculado mediante el algoritmo
A=[ 2*(x1-x4) 2*(y1-y4); 2*(x2-x4) 2*(y2-y4);2*(x3-x4) 2*(y3-y4) ];

```

```

b=[ x1^(2)-x4^(2)+y1^(2)-y4^(2)+d44^(2)-d11^(2) ; x2^(2)-x4^(2)+y2^(2)-
y4^(2)+d44^(2)-d22^(2);x3^(2)-x4^(2)+y3^(2)-y4^(2)+d44^(2)-d33^(2) ];
Resultado=inv(A'*A)*A'*b;

%Dibujo del nuevo punto estimado
plot(Resultado(2),Resultado(1),'b+',...
'LineWidth',2,...
'MarkerSize',5,...
'MarkerEdgeColor','b',...
'MarkerFaceColor',[0.4,0,1]),axis equal

%Dibujo del error para 3 anclas LOS y una NLOS-DDP
P2=[Resultado(2) Resultado(1)];
plot([P1(1) P2(1)],[P1(2) P2(2)],'b:','LineWidth',2)

TablaErrores(p,2)=sqrt((P1(1)-P2(1))^2+(P1(2)-P2(2))^2);

%Se sustituye el ancla NLOS-DDP por un ancla NLOS-UDP
m=2;
d44=A2(p,1);
y4=Posiciones_Anclas(m,1);
x4=Posiciones_Anclas(m,2);

%Nuevo error calculado por el algoritmo
A=[ 2*(x1-x4) 2*(y1-y4); 2*(x2-x4) 2*(y2-y4);2*(x3-x4) 2*(y3-y4) ];
b=[ x1^(2)-x4^(2)+y1^(2)-y4^(2)+d44^(2)-d11^(2) ; x2^(2)-x4^(2)+y2^(2)-
y4^(2)+d44^(2)-d22^(2);x3^(2)-x4^(2)+y3^(2)-y4^(2)+d44^(2)-d33^(2) ];

%Cálculo del nuevo resultado
Resultado=inv(A'*A)*A'*b;

%Dibujo del nuevo punto estimado
plot(Resultado(2),Resultado(1),'rv',...
'LineWidth',2,...
'MarkerSize',5,...
'MarkerEdgeColor','r',...
'MarkerFaceColor',[1,0,0]),axis equal

%Dibujo del error para 3 anclas LOS y un ancla NLOS-UDP
P2=[Resultado(2) Resultado(1)];
plot([P1(1) P2(1)],[P1(2) P2(2)],'r-','LineWidth',2),axis equal

TablaErrores(p,3)=sqrt((P1(1)-P2(1))^2+(P1(2)-P2(2))^2);

%Definición de características de la gráfica e impresión
ylabel('Posición eje y (metros)');
xlabel('Posición eje x (metros)');
titulo=['Punto ',num2str(p),' Posición 3LOS Comparando DDP y UDP'];
legend('Posición Real','Posición Estimada 3LOS','Error 3LOS','Posición
Estimada 3LOS+1NLOS-DDP','Error 3LOS+1NLOS-DDP','Posición Estimada
3LOS+1NLOS-UDP','Error 3LOS+1NLOS-UDP','Location','NorthEastOutside');
print(gcf,'-djpeg','-r400',titulo)

hold off
end

```

- Fichero: GraficaRMSE_3AnclasNLOSDDP_NLOSUDP.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Nombre del archivo: GraficaRMSE_3AnclasNLOSDDP_NLOSUDP
%% Fecha: 12/07/2018
%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%% Descripción: En este documento se dispone el código para comparar la
%% respuesta del algoritmo cuando tenemos 3 anclas LOS y se van incluyendo
%% anclas NLOS-UDP para calcular la posición.
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all

%Para tener mayor precisión en los cálculos
format long

%Extracción de datos tomados
A1=xlsread('A', 'A1');
A2=xlsread('A', 'A2');
A3=xlsread('A', 'A4');
A4=xlsread('A', 'A5');
A5=xlsread('A', 'A6');
A6=xlsread('A', 'A7');
Posiciones_Anclas=xlsread('A', 'ANCLAS');
Posiciones_Puntos=xlsread('A', 'POSICIONES');

%Bucle donde se calcula RMSE para 3 anclas LOS
for p=1:7
    i=3;
    j=4;
    k=1;
    d11=A3(p,1);
    d22=A4(p,1);
    d33=A1(p,1);
    y1=Posiciones_Anclas(i,1);
    x1=Posiciones_Anclas(i,2);
    y2=Posiciones_Anclas(j,1);
    x2=Posiciones_Anclas(j,2);
    y3=Posiciones_Anclas(k,1);
    x3=Posiciones_Anclas(k,2);
    A=[ 2*(x1-x3) 2*(y1-y3); 2*(x2-x3) 2*(y2-y3)];
    b=[ x1^(2)-x3^(2)+y1^(2)-y3^(2)+d33^(2)-d11^(2) ; x2^(2)-x3^(2)+y2^(2)-
y3^(2)+d33^(2)-d22^(2)];
    Resultado=inv(A)*b;
    e1(p)=(Resultado(2)-Posiciones_Puntos(p,1))^2+(Resultado(1)-
Posiciones_Puntos(p,2))^2;
end

%Bucle donde se calcula RMSE para 3 LOS y 1 NLOS-DDP
for p=1:7
    l=2;
    d44=A2(p,1);
    y4=Posiciones_Anclas(l,1);
    x4=Posiciones_Anclas(l,2);
    A=[ 2*(x1-x4) 2*(y1-y4); 2*(x2-x4) 2*(y2-y4);2*(x3-x4) 2*(y3-y4) ];
    b=[ x1^(2)-x4^(2)+y1^(2)-y4^(2)+d44^(2)-d11^(2) ; x2^(2)-x4^(2)+y2^(2)-
y4^(2)+d44^(2)-d22^(2);x3^(2)-x4^(2)+y3^(2)-y4^(2)+d44^(2)-d33^(2)];

```

```

Resultado=inv(A'*A)*A'*b;
e2(p)=(Resultado(2)-Posiciones_Puntos(p,1))^2+(Resultado(1)-
Posiciones_Puntos(p,2))^2;
end

%Cálculo del RMSE
Error_total(1)=sqrt(1/length(e1)*sum(e1));
Error_total(2)=sqrt(1/length(e2)*sum(e2));

%Número de puntos que se van a representar en la gráfica
npuntos=[0,1];

%Representación de los errores
plot(npuntos,Error_total,'--gs',...
'LineWidth',2,...
'MarkerSize',10,...
'MarkerEdgeColor','b',...
'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5])
grid on, axis equal

%Definición de características de la gráfica e impresión
titulo=['3 Anclas LOS frente Anclas NLOS-UDP'];
ylabel('Raíz del error cuadrático medio RMSE (metros)');
xlabel('Número de anclas NLOS-UDP añadidas a 3 LOS');
print(gcf,'-djpeg','-r400',titulo)

```

- **Fichero: GraficaRMSE_3AnclasNLOSDDP_NLOSUDP.m**

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: GraficaRMSE_3AnclasNLOSDDP_NLOSUDP
%%% Fecha: 12/07/2018
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para comparar la
%%% respuesta del algoritmo cuando tenemos 3 anclas NLOS-DDP y se van
%%% incluyendo
%%% anclas NLOS-UDP para calcular la posición.
%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all

%Para tener mayor precisión en los cálculos
format long

%Extracción de datos tomados
A1=xlsread('A','A1');
A2=xlsread('A','A2');
A3=xlsread('A','A4');
A4=xlsread('A','A5');
A5=xlsread('A','A6');
A6=xlsread('A','A7');
Posiciones_Anclas=xlsread('A','ANCLAS');
Posiciones_Puntos=xlsread('A','POSICIONES');

```

```

%Bucle donde se calcula RMSE para 3 anclas LOS
for p=15:20
    i=3;
    j=4;
    k=1;
    d11=A3(p,1);
    d22=A4(p,1);
    d33=A1(p,1);
    y1=Posiciones_Anclas(i,1);
    x1=Posiciones_Anclas(i,2);
    y2=Posiciones_Anclas(j,1);
    x2=Posiciones_Anclas(j,2);
    y3=Posiciones_Anclas(k,1);
    x3=Posiciones_Anclas(k,2);
    A=[ 2*(x1-x3) 2*(y1-y3); 2*(x2-x3) 2*(y2-y3)];
    b=[ x1^2-x3^2+y1^2-y3^2+d33^2-d11^2 ; x2^2-x3^2+y2^2-y3^2+d33^2-d22^2];
    Resultado=inv(A)*b;
    e1(p-14)=(Resultado(2)-Posiciones_Puntos(p,1))^2+(Resultado(1)-Posiciones_Puntos(p,2))^2;
end

%Bucle donde se calcula RMSE para 3 LOS y 1 NLOS-DDP
for p=15:20
    l=2;
    d44=A2(p,1);
    y4=Posiciones_Anclas(l,1);
    x4=Posiciones_Anclas(l,2);
    A=[ 2*(x1-x4) 2*(y1-y4); 2*(x2-x4) 2*(y2-y4); 2*(x3-x4) 2*(y3-y4) ];
    b=[ x1^2-x4^2+y1^2-y4^2+d44^2-d11^2 ; x2^2-x4^2+y2^2-y4^2+d44^2-d22^2; x3^2-x4^2+y3^2-y4^2+d44^2-d33^2];
    Resultado=inv(A'*A)*A'*b;
    e2(p-14)=(Resultado(2)-Posiciones_Puntos(p,1))^2+(Resultado(1)-Posiciones_Puntos(p,2))^2;
end

%Cálculo del RMSE
Error_total(1)=sqrt(1/length(e1)*sum(e1));
Error_total(2)=sqrt(1/length(e2)*sum(e2));

%Número de puntos que se van a representar en la gráfica
npuntos=[0,1];

%Representación de los errores
plot(npuntos,Error_total,'--gs',...
     'LineWidth',2,...
     'MarkerSize',10,...
     'MarkerEdgeColor','b',...
     'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5])
grid on, axis equal

%Definición de características de la gráfica e impresión
titulo=['3 Anclas NLOS-DDP frente Anclas NLOS-UDP'];
ylabel('Raíz del error cuadrático medio RMSE (metros)');
xlabel('Número de anclas NLOS-UDP añadidas a 3 NLOS-DDP');
print(gcf,'-djpeg','-r400',titulo)

```

- Fichero: GraficaRMSE_2AnclasLOS_NLOSDDP.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: GraficaRMSE_2AnclasLOS_NLOSDDP
%%% Fecha: 12/07/2018
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para comparar la
%%% respuesta del algoritmo cuando tenemos 2 anclas LOS y se van incluyendo
%%% anclas NLOS-DDP para calcular la posición.
%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all

%Para tener mayor precisión en los cálculos
format long

%Extracción de datos tomados
A1=xlsread('A','A1');
A2=xlsread('A','A2');
A3=xlsread('A','A4');
A4=xlsread('A','A5');
A5=xlsread('A','A6');
A6=xlsread('A','A7');
Posiciones_Anclas=xlsread('A','ANCLAS');
Posiciones_Puntos=xlsread('A','POSICIONES');

%Bucle donde se calcula RMSE para 2 anclas LOS
for p=15:20
    i=5;
    j=6;
    d11=A5(p,1);
    d22=A6(p,1);
    y1=Posiciones_Anclas(i,1);
    x1=Posiciones_Anclas(i,2);
    y2=Posiciones_Anclas(j,1);
    x2=Posiciones_Anclas(j,2);
    A=[ 2*(x1-x2) 2*(y1-y2); 2*(x2-x2) 2*(y2-y2)];
    b=[ x1^(2)-x2^(2)+y1^(2)-y2^(2)+d22^(2)-d11^(2) ; x2^(2)-x2^(2)+y2^(2)-
y2^(2)+d22^(2)-d22^(2)];
    Resultado=inv(A)*b;
    e1(p-14)=(Resultado(2)-Posiciones_Puntos(p,1))^2+(Resultado(1)-
Posiciones_Puntos(p,2))^2;
end

%Bucle donde se calcula RMSE para 2 LOS y 1 NLOS-DDP
for p=15:20
    l=3;
    d33=A3(p,1);
    y3=Posiciones_Anclas(l,1);
    x3=Posiciones_Anclas(l,2);
    A=[ 2*(x1-x3) 2*(y1-y3); 2*(x2-x3) 2*(y2-y3)];
    b=[ x1^(2)-x3^(2)+y1^(2)-y3^(2)+d33^(2)-d11^(2) ; x2^(2)-x3^(2)+y2^(2)-
y3^(2)+d33^(2)-d22^(2)];
    Resultado=inv(A)*b;
    e2(p-14)=(Resultado(2)-Posiciones_Puntos(p,1))^2+(Resultado(1)-
Posiciones_Puntos(p,2))^2;
end

```

```

%Bucle donde se calcula RMSE para 2 LOS y 2 NLOS-DDP
for p=15:20
    n=4;
    d44=A4(p,1);
    y4=Posiciones_Anclas(n,1);
    x4=Posiciones_Anclas(n,2);
    A=[ 2*(x1-x4) 2*(y1-y4); 2*(x2-x4) 2*(y2-y4);2*(x3-x4) 2*(y3-y4) ];
    b=[ x1^(2)-x4^(2)+y1^(2)-y4^(2)+d44^(2)-d11^(2) ; x2^(2)-x4^(2)+y2^(2)-
y4^(2)+d44^(2)-d22^(2);x3^(2)-x4^(2)+y3^(2)-y4^(2)+d44^(2)-d33^(2) ];
    Resultado=inv(A'*A)*A'*b;
    e3(p-14)=(Resultado(2)-Posiciones_Puntos(p,1))^2+(Resultado(1)-
Posiciones_Puntos(p,2))^2;
end

%Bucle donde se calcula RMSE para 2 LOS y 3 NLOS-DDP
for p=15:20
    n=1;
    d55=A1(p,1);
    y5=Posiciones_Anclas(n,1);
    x5=Posiciones_Anclas(n,2);
    A=[ 2*(x1-x5) 2*(y1-y5); 2*(x2-x5) 2*(y2-y5);2*(x3-x5) 2*(y3-y5);2*(x4-
x5) 2*(y4-y5) ];
    b=[ x1^(2)-x5^(2)+y1^(2)-y5^(2)+d55^(2)-d11^(2) ; x2^(2)-x5^(2)+y2^(2)-
y5^(2)+d55^(2)-d22^(2);x3^(2)-x5^(2)+y3^(2)-y5^(2)+d55^(2)-d33^(2);x4^(2)-
x5^(2)+y4^(2)-y5^(2)+d55^(2)-d44^(2) ];
    Resultado=inv(A'*A)*A'*b;
    e4(p-14)=(Resultado(2)-Posiciones_Puntos(p,1))^2+(Resultado(1)-
Posiciones_Puntos(p,2))^2;
end

%Cálculo del RMSE
Error_total(1)=sqrt(1/length(e1)*sum(e1));
Error_total(2)=sqrt(1/length(e2)*sum(e2));
Error_total(3)=sqrt(1/length(e3)*sum(e3));
Error_total(4)=sqrt(1/length(e4)*sum(e4));

%Número de puntos que se van a representar en la gráfica
npuntos=[0,1,2,3];

%Representación de los errores
plot(npuntos,Error_total,'--gs',...
    'LineWidth',2,...
    'MarkerSize',10,...
    'MarkerEdgeColor','b',...
    'MarkerFaceColor',[0.5,0.5,0.5])
grid on, axis equal

%Definición de características de la gráfica e impresión
titulo=['2 Anclas LOS frente Anclas NLOS-DDP'];
ylabel('Raíz del error cuadrático medio RMSE (metros)');
xlabel('Número de anclas NLOS-DDP añadidas a 2 LOS');
print(gcf,'-djpeg','-r400',titulo)

```

- Fichero: GraficaRMSE_3AnclasLOS_NLOSDDP.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Nombre del archivo: GraficaRMSE_3AnclasLOS_NLOSDDP
%%% Fecha: 12/07/2018
%%% Autor: Pablo Manuel De Rojas Malpartida
%%% Descripción: En este documento se dispone el código para comparar la
%%% respuesta del algoritmo cuando tenemos 3 anclas LOS y se van incluyendo
%%% anclas NLOS-DDP para calcular la posición.
%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all

%Para tener mayor precisión en los cálculos
format long

%Extracción de datos tomados
A1=xlsread('A','A1');
A2=xlsread('A','A2');
A3=xlsread('A','A4');
A4=xlsread('A','A5');
A5=xlsread('A','A6');
A6=xlsread('A','A7');
Posiciones_Anclas=xlsread('A','ANCLAS');
Posiciones_Puntos=xlsread('A','POSICIONES');

%Bucle donde se calcula RMSE para 3 anclas LOS
for p=1:7
    i=3;
    j=4;
    k=1;
    d11=A3(p,1);
    d22=A4(p,1);
    d33=A1(p,1);
    y1=Posiciones_Anclas(i,1);
    x1=Posiciones_Anclas(i,2);
    y2=Posiciones_Anclas(j,1);
    x2=Posiciones_Anclas(j,2);
    y3=Posiciones_Anclas(k,1);
    x3=Posiciones_Anclas(k,2);
    A=[ 2*(x1-x3) 2*(y1-y3); 2*(x2-x3) 2*(y2-y3) ];
    b=[ x1^2-x3^2+y1^2-y3^2+d33^2-d11^2 ; x2^2-x3^2+y2^2-d22^2-d33^2-d22^2 ];
    Resultado=inv(A)*b;
    e1(p)=(Resultado(2)-Posiciones_Puntos(p,1))^2+(Resultado(1)-
Posiciones_Puntos(p,2))^2;
end

%Bucle donde se calcula RMSE para 3 LOS y 1 NLOS-DDP
for p=1:7
    l=2;
    d44=A2(p,1);
    y4=Posiciones_Anclas(l,1);
    x4=Posiciones_Anclas(l,2);
    A=[ 2*(x1-x4) 2*(y1-y4); 2*(x2-x4) 2*(y2-y4); 2*(x3-x4) 2*(y3-y4) ];
    b=[ x1^2-x4^2+y1^2-y4^2+d44^2-d11^2 ; x2^2-x4^2+y2^2-d22^2-d44^2-d22^2-d33^2 ];
    y4^2+d44^2-d22^2;x3^2-x4^2+y3^2-y4^2+d44^2-d33^2 ];
end

```



```

%Extracción de datos tomados
A1=xlsread('A','A1');
A2=xlsread('A','A2');
A3=xlsread('A','A4');
A4=xlsread('A','A5');
A5=xlsread('A','A6');
A6=xlsread('A','A7');
Posiciones_Anclas=xlsread('A','ANCLAS');
Posiciones_Puntos=xlsread('A','POSICIONES');

%Bucle para ilustrar el error
i=1; %Ancla1
j=4; %Ancla2
k=6; %Ancla3

%Bucle donde se analizan todos los puntos
for p=1:24

    %Distancia a los puntos
    d11=A1(p,1);
    d33=A6(p,1);    d22=A4(p,1);

    %Posición de las anclas
    y1=Posiciones_Anclas(i,1);
    x1=Posiciones_Anclas(i,2);
    y2=Posiciones_Anclas(j,1);
    x2=Posiciones_Anclas(j,2);
    y3=Posiciones_Anclas(k,1);
    x3=Posiciones_Anclas(k,2);

    %Cálculo del punto estimado mediante el algoritmo
    A=[ 2*(x1-x3) 2*(y1-y3); 2*(x2-x3) 2*(y2-y3) ] ;
    b=[ x1^(2)-x3^(2)+y1^(2)-y3^(2)+d33^(2)-d11^(2) ;
        x2^(2)-x3^(2)+y2^(2)-y3^(2)+d33^(2)-d22^(2) ];

    Resultado=inv(A)*b;

    %Dibujo de la posición estimada y real de los puntos
    plot(Resultado(2),Resultado(1),'rv',...
        'LineWidth',2,...
        'MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor','r',...
        'MarkerFaceColor',[1,0,0])

    hold on, grid on, axis equal

    plot(Posiciones_Puntos(p,1),Posiciones_Puntos(p,2),'yp',...
        'LineWidth',2,...
        'MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor','y',...
        'MarkerFaceColor',[0.9,1,0.1])

    %Creación de los estilos para los diferentes casos

    %Puntos 3 NLOS
    if (p==1) || (p==2)

```

```

        plot([Resultado(2) Posiciones_Puntos(p,1)], [Resultado(1)
Posiciones_Puntos(p,2)], 'green-', 'LineWidth', 1.5)

        %Puntos 2 LOS 1 NLOS-DDP
        elseif (p==3) || (p==4) || (p==5) || (p==6) || (p==7) || (p==21) || (p==22) ||
(p==24)
            plot([Resultado(2) Posiciones_Puntos(p,1)], [Resultado(1)
Posiciones_Puntos(p,2)], 'blue:', 'LineWidth', 5)

        %Puntos 1 LOS 2 NLOS-DDP
        elseif (p==14) || (p==23) || (p==15) || (p==16) || (p==17) || (p==18) ||
(p==19) || (p==20)
            plot([Resultado(2) Posiciones_Puntos(p,1)], [Resultado(1)
Posiciones_Puntos(p,2)], 'c-.' , 'LineWidth', 3)

        %Puntos 1 LOS 2 NLOS-UDP
        else
            plot([Resultado(2) Posiciones_Puntos(p,1)], [Resultado(1)
Posiciones_Puntos(p,2)], 'red--', 'LineWidth', 2)

        end

        %Agrupación de distancias y posiciones
        distancias_estimadas=[d11,d22,d33];
        x_estimado=[x1,x2,x3];
        y_estimado=[y1,y2,y3];

        %Posiciones de las Anclas
        for g=1:length(x_estimado)
            estilo='k*';
            plot(y_estimado(g), x_estimado(g), estilo, ...
'LineWidth', 3, ...
'MarkerSize', 12, ...
'MarkerEdgeColor', 'black')
        end

    end

    %Definición de características de la gráfica
    legend('Posición Estimada', 'Posición Real', '3 anclas
LOS', 'Anclas', 'Location', 'NorthEastOutside');
    ylabel('Posición eje y (metros)');
    xlabel('Posición eje x (metros)');

    %Impresión de la gráfica
    print(gcf, '-djpeg', '-r400', 'GráficaPalitos_estilos'), grid on, axis equal,
hold off

```


REFERENCIAS

- [1] *WAN - Ultra Narrow Band (UNB)* [consulta: 15 agosto 2018]. Disponible en: <https://www.m2comm.co/front-page/technology/wan-ultra-narrow-band-unb/>
- [2] *UWB: la revolución de las redes personales*. En: Comunicaciones World nº 200, IDG Communications S.A, 2005 [consulta: 16 agosto 2018]. Disponible en: <https://www.ramonmillan.com/tutoriales/uwb.php>
- [3] Jordi Diaz. *Tecnología Ultra-WideBand (UWB) La revolución a corto alcance*. Center for Communications and Signal Processing Research, New Jersey Institute of Technology. [consulta: 16 agosto 2018] BURAN nº19 abril 2003. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/9890/Article010.pdf>
- [4] Garcia-Pardo, Concepcion & Cano, Maria Victoria & Molina-Garcia-Pardo, Jose-Maria & Victor Rodríguez, José & Pascual García, Juan & Juan-Llacer, Leandro. (2010). *Sistema de comunicaciones UWB*.
- [5] Temas Avanzados en comunicaciones TAC (2007-08), Univ. Autónoma de Madrid. [consulta: 20 agosto 2018] Disponible en: http://arantxa.ii.uam.es/~tac/Documentacion/Tema_IV_Introduccion_UWB_ver0.pdf
- [6] 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*.
- [7] Daniela Ximena González Caamaño. Estudio comparativo del estandar UltraWide Band (UWB) frente a bluetooth y zigbee. Profesor patrocinante: Sr. Néstor Fierro Morineaud. 2011. [consulta: 17 agosto 2018] Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/bmficg643e/doc/bmficg643e.pdf>
- [8] 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: 6 agosto 2018] Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2014-83038>
- [9] The European Commission's Decision on Ultra-Wideband Technologies: Frequently Asked Questions. European Commission, Press Release Database. [consulta: 7 agosto 2018] Disponible en: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-07-72_en.htm?locale=en
- [10] 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 agosto 2018] Disponible en:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302000_302099/30206501/02.01.01_60/en_30206501v020101p.pdf

- [11] Andrés Martínez García. Director de proyecto: Sebastián Blanch Boris. Proyecto Final de Carrera. Estudio de canal para sistemas Ultra Wide Band. [consulta: 19 agosto 2018] Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13288/PFC.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [12] Homayoun Nikookar, Ramjee Prasad. Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications. Springer Science & Business Media. 2008.
- [13] Eva M. García Polo. Técnicas de Localización en Redes Inalámbricas de Sensores. 2008. Universidad de Castilla-La Mancha. [consulta: 12 agosto 2018] Disponible en: <http://www.dsi.uclm.es/personal/EvaMariaGarcia/docs/2008-Curso%20Verano.pdf>
- [14] Decawave SceneSor DWM1000 Module. Decawave. [consulta: 15 agosto 2018] Disponible en: <http://www.decawave.com/products/dwm1000-module>
- [15] Normas UNE-ISO 690:2013. [consulta: 19 agosto 2018] Disponible en: <http://guiasbus.us.es/bibliografiaycitas/estilouneiso>
- [16] Sinan Gezici, member IEEE, and H. Vincent Poor, fellow IEEE. *Position Estimation by Ultra-Wide-Band Signals*. Vol. 97, No. 2, 2009.
- [17] Kaveh Pahlavan. *Indoor Geolocation In Absence Of Direct Path*. IEEE Wireless Communication, December, 2006.
- [18] Roberto Verdone. *Wireless sensor and actuator networks: technologies, analysis and design*. Elsevier, 2008.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] LifeWire. Bradley Mitchell. *What does UWB mean?* Julio 2018. Disponible en: <https://www.lifewire.com/ultra-wide-band-817953>

