

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería de Telecomunicación

Análisis del efecto de los obstáculos en un sistema Ultra Wideband de localización en interiores

Autor: Antonio Padilla Esquivel

Tutora: Eva María Arias de Reyna Domínguez

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

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Análisis del efecto de los obstáculos en un sistema Ultra Wideband de localización en interiores

Autor:
Antonio Padilla Esquivel

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, 2019

Fin de Máster: Análisis del efecto de los obstáculos en un sistema Ultra Wideband de localización en interiores

Autor: Antonio Padilla Esquivel

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, 2019

El Secretario del Tribunal

A los que no se esperan

A los que saben esperar

Resumen

La localización en interiores es una tecnología en expansión que empieza a introducirse en el mercado civil, dejando de ser exclusiva de fines militares.

Ya sea para localizar objetos en los almacenes de diversos comercios o monitorizar pacientes con necesidades especiales en los hospitales, es necesaria una tecnología precisa que permita ubicar al elemento deseado sin errores independientemente de las circunstancias que lo rodeen (obstáculos, cambios en el canal, etc.).

Es por ello que se propone el uso de la tecnología Ultra Wide Band (UWB) con este fin debido a su gran resolución temporal e inmunidad al multitrayecto, propio de entornos interiores.

Con esta tecnología de localización es palpable la influencia de los obstáculos dispuestos entre el elemento cuya posición se pretende estimar y cada uno de los sensores que toman medidas para lograr la estimación de posición.

Por ello, en este trabajo se tiene como objetivo, mediante el uso del equipo incluido en un kit de evaluación de transmisores UWB disponible en el mercado, realizar medidas para determinar de manera empírica el comportamiento del error en las estimaciones de distancia en relación con las características del trayecto entre emisor y receptor (casos con visión directa LOS “Line Of Sight” o sin visión directa NLOS “Non-Line Of Sight”). Además según la literatura estudiada se puede hacer una distinción en los casos sin visión directa, dependiendo de si se detecta o no el rayo directo (NLOS-DDP o NLOS-UDP). Determinados autores afirman que la presencia o ausencia de este rayo directo es la que realmente determina un aumento significativo en el error a la hora de estimar distancias.

Una vez realizadas las medidas se estudiará la distribución estadística del error para los casos comentados, relacionándolos con la literatura.

Abstract

Indoor ranging is an expanding technology that begins to enter the civil market, ceasing to be exclusively for military purposes.

Either to locate objects in the stores of various shops or to monitor patients with special needs in hospitals, a precise technology is needed to locate the desired item without errors, regardless of the circumstances that surround it (obstacles, changes in the channel, etc...).

That is why the use of Ultra Wide Band (UWB) technology is proposed for this purpose due to its high temporal resolution and immunity to multipath, typical of indoor environments.

With this ranging technology, the influence of the obstacles placed between the element whose position is intended to estimate and each of the sensors that take measurements to achieve the position estimation is palpable.

Therefore, in this work we aim, through the use of the equipment included in a UWB transmitter evaluation kit available in the market, to take measurements to empirically determine the error behaviour in the ranging estimation in relation to the characteristics of the path between transmitter and receiver (cases with “line of sight”, LOS; or with obstacles, NLOS "Non-Line Of Sight"). Furthermore, according to the studied literature, a distinction can be made in cases without line of sight, depending on whether the direct path is detected or not (NLOS-DDP or NLOS-UDP). Some authors affirm that the presence or absence of this direct path is what really determines a significant increase in the error when estimating distances.

Once the measurements are made, the statistical distribution of the error will be studied for the mentioned cases, relating them to the literature.

Índice

Resumen	9
Abstract	11
Índice	12
Índice de Tablas	14
Índice de Figuras	15
1 Introducción	19
1.1 <i>Objetivo</i>	19
1.2 <i>Secciones</i>	19
2 Conceptos teóricos	21
2.1 <i>UWB</i>	21
2.1.1 UWB según la ITU-R [3]	22
2.1.2 Historia	23
2.1.3 Ventajas y desventajas de UWB	23
2.2 <i>Estimación de magnitudes para la localización</i>	24
2.2.1 Received signal strength (RSS) [7]	24
2.2.2 Angle of Arrival (AOA) [7]	24
2.2.3 Time of Arrival (TOA) [7]	25
3 Equipo	29
3.1 <i>Kit EVK1000 [9] [10]</i>	29
3.1.1 Componentes del Kit	29
3.1.2 Modos de funcionamiento	32
3.1.3 Roles	33
3.1.4 Modo de procesamiento	33
3.1.5 Antenna Delay	34
3.1.6 Cálculo de la distancia	35
4 Modelo Teórico	37
4.1 <i>Modelo de estimación de la distancia [12]</i>	37
4.1.1 Caso de visión directa (LOS)	38
4.1.2 Caso sin visión directa y rayo directo detectado (NLOS DDP)	38
4.1.3 Caso sin visión directa y sin rayo directo detectado (NLOS UDP)	39
4.2 <i>Modelado del error en la estimación de la distancia</i>	40
4.2.1 Función densidad de probabilidad del error para situaciones LOS	40
4.2.2 Función densidad de probabilidad del error para situaciones NLOS-DDP	41
4.2.3 Función densidad de probabilidad del error para situaciones NLOS-UDP	42
5 Mediciones	45
5.1 <i>Entorno del experimento</i>	45
5.2 <i>Resultados</i>	46

5.2.1	Normalización del error en función de la distancia	46
5.2.2	Estudio Medidas	47
6	Mapa	64
6.1	<i>Condiciones base</i>	64
6.1.1	Mapa de Medias	65
6.1.2	Mapa de Varianzas	66
7	Conclusiones	69
Anexo A. Batería de Medidas Capítulo 5		71
Anexo B. Batería de Medidas Capítulo 6		75
Anexo C. Códigos Matlab		79
	<i>ModeloLOS.m</i>	79
	<i>ModeloNLOSDDP.m</i>	80
	<i>ModeloNLOSUDP.m</i>	82
	<i>ModeloNLOS.m</i>	83
	<i>DistanciaAncla.m</i>	85
	<i>Mapa.m</i>	85
	<i>DistribucionError.m</i>	87
Referencias		89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Modos de operación	32
Tabla 3-2. Roles de EVB1000	33
Tabla 5-1. Parámetros distribución Normal con medidas LOS	51
Tabla 5-2. Parámetros distribución Lognormal con medidas NLOS-DDP	56
Tabla 5-3. Parámetros distribución Lognormal con medidas NLOS-UDP	59
Tabla 5-4. Parámetros distribución Lognormal con medidas NLOS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. UWB en el dominio del tiempo vs UWB en el dominio de la frecuencia	21
Figura 2-2. Comparativa UWB y otras tecnologías	22
Figura 2-3. Esquema RSS	24
Figura 2-4. Esquema AOA	25
Figura 2-5. Diagrama TWR	26
Figura 2-6. Diagrama OWR	26
Figura 3-1. Kit EVK1000	30
Figura 3-2. Cara frontal de EVB1000	31
Figura 3-3. Cara posterior de EVB1000	32
Figura 3-4. Esquema del montaje para las mediciones	33
Figura 3-5. Switch S1	34
Figura 3-6. Modificar valor de Antenna Delay	35
Figura 3-7. Diagrama del proceso de estimación de distancia Ancla-Tag	36
Figura 4-1. Esquema caso LOS	38
Figura 4-2. Esquema caso NLOS-DDP	38
Figura 4-3. Esquema caso NLOS-UDP	39
Figura 4-4. Función densidad de probabilidad de una distribución Normal	41
Figura 4-5. Función densidad de probabilidad de una distribución Normal	42
Figura 4-6. Función densidad de probabilidad de una distribución Lognormal	43
Figura 5-1. Plano de domicilio	46
Figura 5-2. Media del error de estimación en función de la distancia Ancla-Tag	47
Figura 5-3. Histograma del Error – Caso LOS	48
Figura 5-4. Ajuste Distribución del error a Distribución Normal – Caso LOS	49

Figura 5-5. CDF Medidas LOS vs CDF Distribución Normal	50
Figura 5-6. Ajuste Distribución del error a Distribución Lognormal – Caso LOS	51
Figura 5-7. Histograma del Error – Caso NLOS-DDP	52
Figura 5-8. Ajuste Distribución del error a Distribución Normal – Caso NLOS-DDP	53
Figura 5-9. CDF Medidas NLOS-DDP vs CDF Distribución Normal	54
Figura 5-10. Ajuste Distribución del error a Distribución Lognormal – Caso NLOS-DDP	55
Figura 5-11. CDF Medidas NLOS-DDP vs CDF Distribución Lognormal	56
Figura 5-12. Histograma del Error – Caso NLOS-UDP	57
Figura 5-13. Ajuste Distribución del error a Distribución Lognormal – Caso NLOS-UDP	58
Figura 5-14. CDF Medidas NLOS-UDP vs CDF Distribución Lognormal	59
Figura 5-15. Histograma del Error – Caso NLOS	60
Figura 5-16. Ajuste Distribución del error a Distribución Lognormal – Caso NLOS	61
Figura 5-17. CDF Medidas NLOS vs CDF Distribución Lognormal	62
Figura 6-1. Plano de casa y posiciones de Ancla y Tag	65
Figura 6-2. Distribución de media del error sobre plano de casa	66
Figura 6-3. Distribución de varianza del error sobre plano de casa	67

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas Ultra Wideband (UWB¹) permiten medidas de distancia muy precisas que pueden utilizarse para localización en interiores, sin embargo la presencia de obstáculos puede afectar de manera importante a la precisión obtenida. Por ello resulta crucial el estudio de la influencia de estos obstáculos a la hora de estimar distancias.

En el departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones se lleva tiempo trabajando con el kit de evaluación EVK1000 de la empresa Decawave en la estimación de distancias. Es por ello que resulta interesante conocer de manera empírica el comportamiento que presenta el error en la estimación en función de la presencia de obstáculos y presentar, de ser posible un modelo matemático del comportamiento de este error para, en trabajos futuros poder realizar simulaciones realistas que abarquen multitud de situaciones sin necesidad de datos reales. De este modo no es necesario realizar medidas de todos los casos que se deseen simular.

1.1 Objetivo

Se realizarán mediciones en un entorno doméstico en diversas posiciones cubriendo los diferentes casos descritos en la literatura: con y sin visión directa (LOS ²frente a NLOS³) y, en los casos sin visión directa, detectando o no el rayo directo (NLOS-DDP⁴ y NLOS-UDP⁵). Una vez se tenga la batería de medidas se propondrá un modelo matemático para cada uno de los casos y se observará si efectivamente se ajusta a los datos empíricos para poder simular medidas con error gracias a este modelo.

1.2 Secciones

En el Capítulo 2 se profundizará en los conceptos teóricos de la tecnología UWB (en qué se basa, cómo se define, un breve repaso por su historia, etc) así como de la estimación de distancia.

En el Capítulo 3 se analiza los equipos del kit EVK1000 con el que se realizarán las medidas, los ajustes necesarios antes de empezar a trabajar, y su funcionamiento a la hora de estimar distancias.

En el Capítulo 4 se detalla el modelo teórico del error para en capítulos posteriores compararlo con los resultados reales.

En el Capítulo 5 se describe el entorno donde se realizarán las mediciones y un posterior análisis de los resultados obtenidos en comparación con el modelo teórico propuesto.

¹ Ultra Wide Band

² Line Of Sight

³ Non Line OF Sight

⁴ Non Line Of Sight – Detected Direct Path

⁵ Non Line Of Sight – Undetected Direct Path

En el Capítulo 6 se muestra el mapa de medias y varianzas del error en la estimación de distancia manteniendo uno de los sensores en un punto fijo del domicilio.

En el Capítulo 7 se finaliza con las conclusiones.

2 CONCEPTOS TEÓRICOS

El equipo empleado durante el desarrollo de este trabajo se basa en la tecnología UWB para la estimación de la distancia, concretamente mediante la medida del tiempo de llegada (UWB TOA⁶).

Para poder comprender enteramente este trabajo es necesario primero introducir la tecnología UWB y sus diversas aplicaciones, así como profundizar en los métodos de estimación de distancia basados en ésta tecnología, así como otros posibles métodos de localización existentes.

2.1 UWB

Ultra Wide Band (UWB), o en español, Banda Ultra Ancha, es una tecnología para la transmisión de datos usando técnicas que causan la expansión de la energía de la señal a lo largo de un gran ancho de banda, manteniendo una muy baja densidad espectral de potencia, lo cual limita las interferencias con otros sistemas convencionales de radiofrecuencia. [1] La transmisión de pulsos electromagnéticos muy estrechos (duración menor de un nanosegundo) es lo que consigue un ancho de banda tan grande.

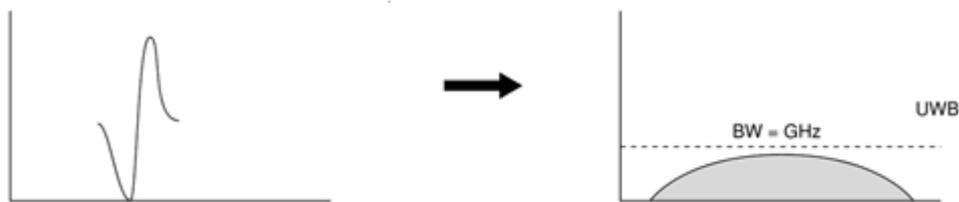


Figura 2-1. UWB en el dominio del tiempo vs UWB en el dominio de la frecuencia

El elevado ancho de banda de UWB tiene el potencial para alcanzar grandes tasas de envío de datos para sistemas de comunicación (empleando tasas de repetición de pulsos de entre 1 y 2 Gpulsos/s) o precisiones elevadas en sistemas de localización (empleando tasas de entre 1 y 100 Mpulsos/s). [2]

Su baja densidad espectral hace al Sistema UWB virtualmente indetectable del ruido de fondo para los receptores radio ordinarios, por lo que pueden coexistir con otras comunicaciones inalámbricas sin necesidad de usar bandas de frecuencia exclusivas. Se puede apreciar este comportamiento en la Figura 2-2.

⁶ Time Of Arrival

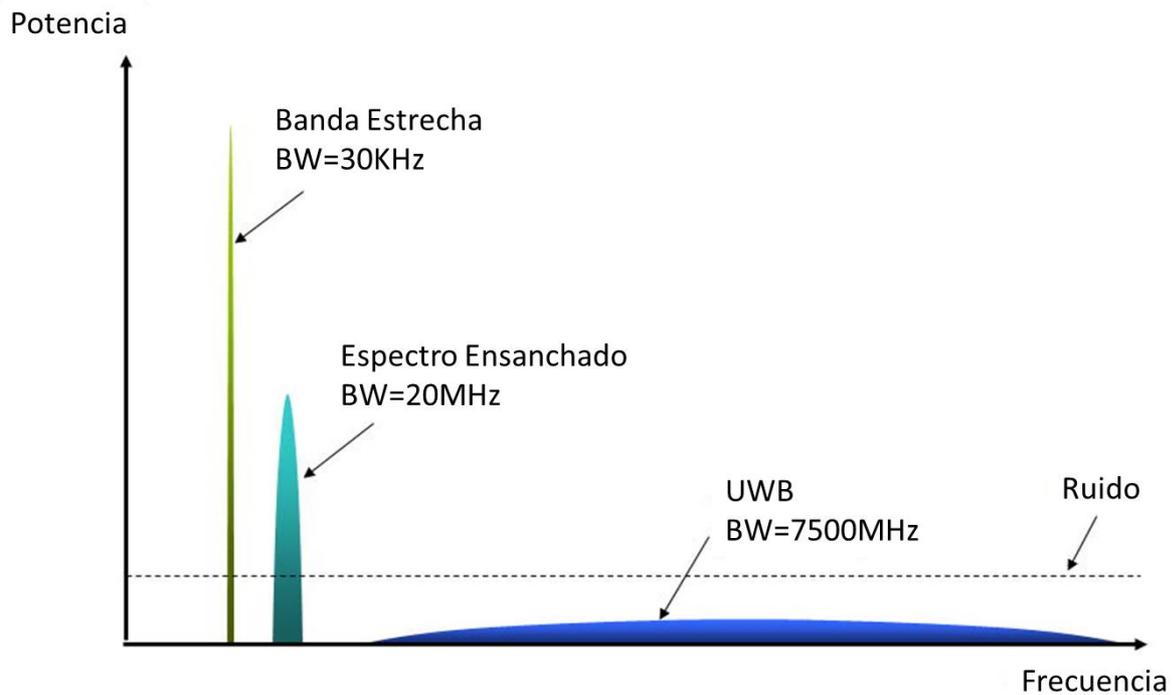


Figura 2-2. Comparativa UWB y otras tecnologías

2.1.1 UWB según la ITU-R [3]

Según la ITU-R⁷ para que un sistema se considere UWB el ancho de banda de la señal emitida debe cumplir una de las siguientes condiciones:

- El ancho de banda de la señal debe ser superior a 500 MHz

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

siendo f_U la frecuencia superior del ancho de banda y f_L la frecuencia inferior.

- El ancho de banda de la señal es al menos un 20% de la frecuencia central

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

definiéndose la frecuencia central f_c como:

$$f_c = \frac{f_U + f_L}{2}$$

⁷ International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector

2.1.2 Historia

El origen de la tecnología UWB podría darse alrededor de la década de 1960 con la invención por parte de Tektronix y Hewlett-Packard del osciloscopio de muestreo. Dichos circuitos no solo proporcionaban un método para mostrar e integrar las señales UWB, sino también circuitos simples con los que realizar la generación de pulsos en banda base con una duración de nanosegundos. [4]

La invención de un receptor de pulsos en Banda base por Robbins en 1972, reemplazando al osciloscopio, dio lugar al primer diseño patentado de un sistema de comunicaciones UWB por Ross en la compañía Sperry Rand. [4]

En los años 70 el diseño inicial de los sistemas de comunicación y radares UWB sufrió un avance debido a los progresos en la tecnología de componentes electrónicos. Esto dio como resultado en 1974 la comercialización del primer radar de penetración de tierra por Morey para la compañía Geophysical Survey Systems. [4]

Alrededor de 1989, el Departamento de Defensa de Estados Unidos creaba la nomenclatura UWB para estos sistemas de transmisión de pulsos ultracortos, patrocinando numerosos estudios sobre el tema para finalidades militares. [4]

En 2003 se estandariza UWB bajo el nombre de IEEE 802.15.3 alcanzándose tasas de transferencia de datos de hasta 55 Mbps [2]

En 2006 el grupo de trabajo 802.15.3a intentó revisar dicho estándar para mejorar las tasas mediante dos enfoques diferentes

- UWB de secuencia directa (DS-UWB)
- Enfoque multibanda de UWB, basado en OFDM (MB-OFDM)

No se llegó a ningún acuerdo y se disolvió el grupo [2]

En mayo de 2006 se publica una enmienda del estándar, llamada IEEE 802.15.3b que mejora la implementación e interoperabilidad, manteniendo la compatibilidad hacia atrás. [2]

En septiembre de 2009 se publicó una nueva versión IEEE 802.15.3c, que consiste en una alternativa basada en ondas milimétricas para la capa física de los sistemas 802.15.3, presentando tasas de datos de hasta 5 Gbps. [2]

En 2007 se publica el estándar IEEE 802.15.4a para redes WPAN⁹ de baja tasa binaria (precisión de 1m para localización); revisándose posteriormente y aunándolo con el estándar de 2006, ya retirado, para finalmente dar lugar al IEEE 802.15.4-2011. Este último es el estándar que siguen los equipos con los que se realizará el trabajo de capítulos siguientes. [2]

En la actualidad la empresa Verizon trabaja para implementar redes 5g mediante la tecnología UWB. [5]

También en 2019 la empresa NXP ha anunciado que implantará la tecnología UWB para mejorar sus sistemas de seguridad mediante la localización. [6]

2.1.3 Ventajas y desventajas de UWB

2.1.3.1 Ventajas

- Muy baja densidad espectral y por tanto baja probabilidad de crear interferencia a otros sistemas.
- Alta inmunidad a interferencias de otros sistemas.
- Baja probabilidad de interceptación o detección por sistemas no deseados.
- Alta inmunidad al multitrayecto.
- Muchos canales UWB pueden operar simultáneamente.

⁸ Institute of Electrical and Electronics Engineers

⁹ Wireless Personal Area Network

- Capacidad de alta resolución en rango.
- Construcción de bajo coste.

2.1.3.2 Desventajas

- Distancia de transmisión corta.

2.2 Estimación de magnitudes para la localización

Existen diversos métodos para, a través de la recepción de la señal de un sensor, determinar la posición de este respecto a un punto fijo.

2.2.1 Received signal strength (RSS) [7]

Para estimar la distancia al objeto, este método se basa en la potencia recibida, a mayor potencia más cerca estará el objeto. Como principal desventaja, son bastante vulnerables al fading por multitrayecto, al ruido y presentan una baja precisión.

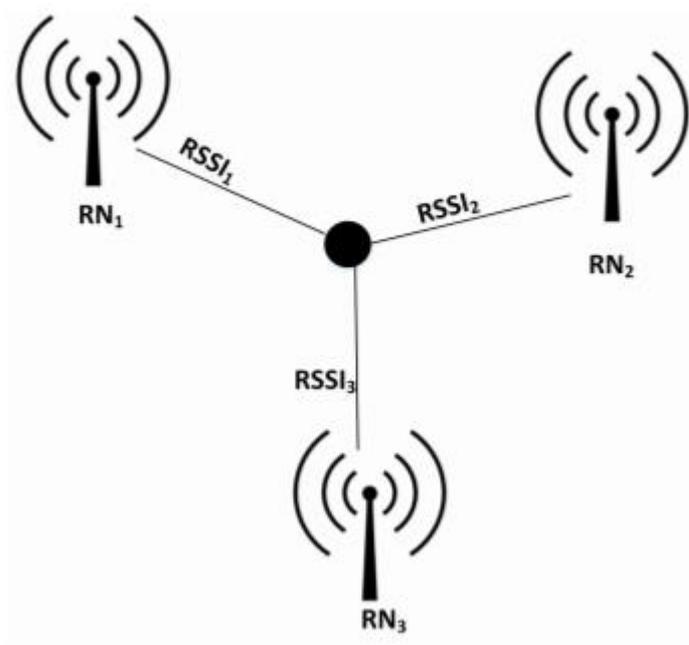


Figura 2-3. Esquema RSS

2.2.2 Angle of Arrival (AOA) [7]

Para determinar la posición del objeto este método se basa en el ángulo de incidencia de la señal emitida por el objeto en la antena receptora. Son necesarios al menos dos receptores para localizar el objeto en 2D.

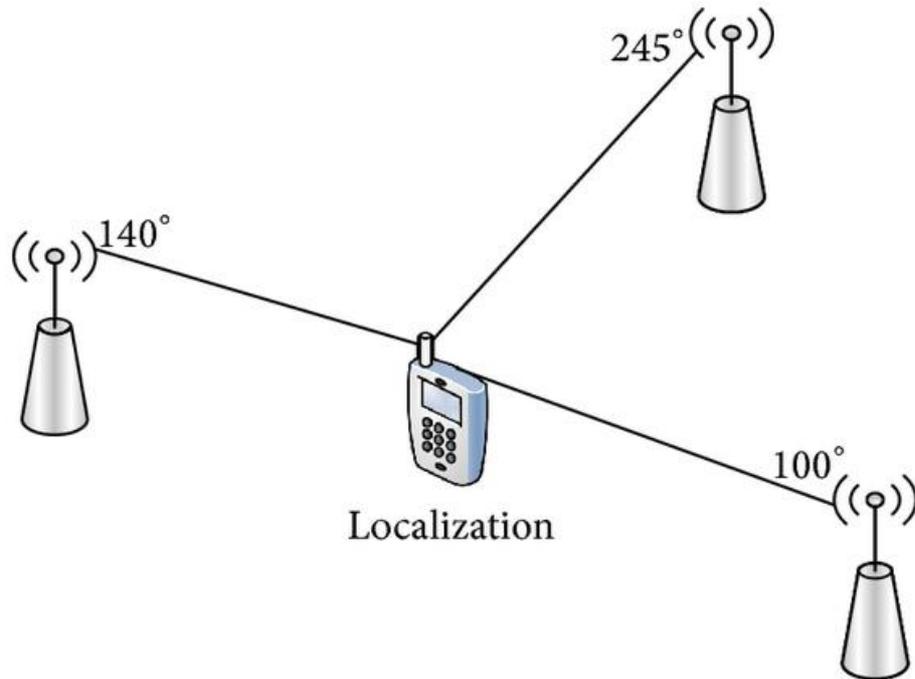


Figura 2-4. Esquema AOA

2.2.3 Time of Arrival (TOA) [7]

Se basa en que conociendo el tiempo de llegada de la señal del emisor al receptor es posible estimar la distancia a partir de la velocidad de propagación de la señal. Tiene diversas variantes.

2.2.3.1 TWR (Two Way Ranging)

Emplea el envío de dos mensajes para la localización.

El sistema A emite una señal (mensaje 1) que llega al sistema B.

El sistema B procesa esta señal y emite su propio mensaje (mensaje 2) al sistema A.

El sistema A a partir del tiempo de recepción del mensaje 2, del tiempo de emisión del mensaje 1 y del tiempo de procesamiento por parte de B es capaz de determinar la distancia entre ambos sistemas.

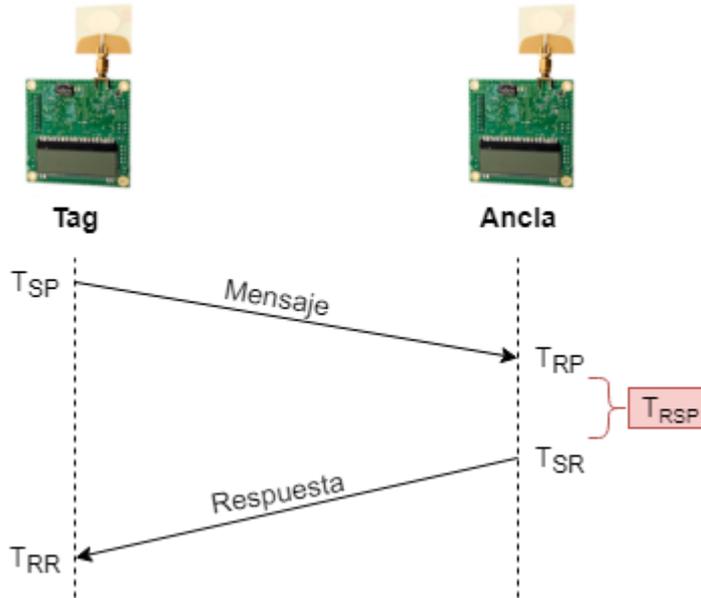


Figura 2-5. Diagrama TWR

La distancia se calcula del siguiente modo:

$$T_{OF} = \frac{T_{RR} - T_{SP} - T_{RSP}}{2}$$

$$distancia = T_{OF} * c$$

donde c es la velocidad de la luz en el aire.

2.2.3.2 OWR (One Way Ranging)

Se emplea cuando ambos terminales están sincronizados a un reloj común. De ser así solo es necesario un único mensaje ya que el sistema B conoce cuando se ha emitido el mensaje desde A y cuando lo ha recibido, por lo que puede determinar la distancia entre ellos.

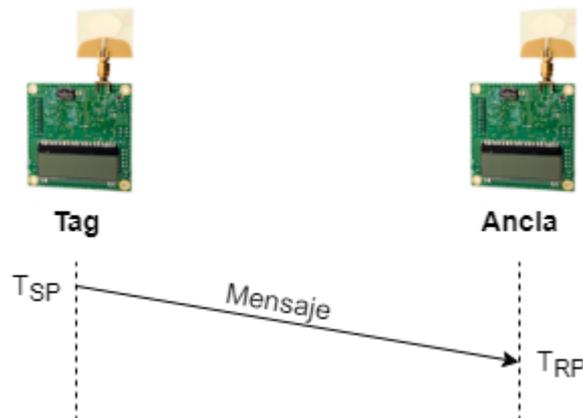


Figura 2-6. Diagrama OWR

La distancia se calcula del siguiente modo:

$$T_{OF} = T_{RP} - T_{SP}$$

$$distancia = T_{OF} * c$$

2.2.3.3 Asymmetrical double-sided two-way ranging [8]

Es realmente una variante del método Two Way Ranging clásico concebida para minimizar los errores en la estimación debidos a asincronías de reloj entre Ancla y Tag .

Su principal diferencia es que se emplean tres mensajes entre Tag y Ancla, en lugar de los dos mensajes del Two Way Ranging tradicional. Con ello se realizan dos estimaciones de distancia que se promedian entre sí.

Es el protocolo que sigue el equipo EVB1000 empleado en este trabajo, por lo que se explicará en profundidad en apartados posteriores. (Ver Capítulo 3.1.6)

3 EQUIPO

Para poder realizar todas las mediciones necesarias en este trabajo y un posterior estudio de las mismas con el que establecer un modelo para la distribución del error en la estimación de la distancia es necesario el equipo adecuado, concretamente el kit Decawave EVK1000. El objetivo de este apartado es el de proporcionar toda la información relativa a dicho equipo, sus características, configuración y cómo realizar las medidas.

3.1 Kit EVK1000 [9] [10]

3.1.1 Componentes del Kit

El equipo empleado para la realización de las medidas y en definitiva de este trabajo es el incluido en el kit EVK1000 de la empresa Decawave.

Dicho kit está compuesto por:

- 2 x placas EVB1000
- 2 x antenas
- 2 x cables USB 2.0
- 2 x soportes para las placas
- 1 x Manual de inicio rápido



Figura 3-1. Kit EVK1000

La placa EVB1000 presenta unas medidas de 7 cm x 7 cm.

En la cara frontal de la placa se incluye una pantalla LCD ¹⁰ empleada para mostrar información de las medidas realizadas y los modos en los que la placa está operando, el DIP ¹¹ Switch (S1) mediante el cual se puede fijar el modo de operación del equipo.

¹⁰ Liquid Crystal Display

¹¹ Dual In-line Package

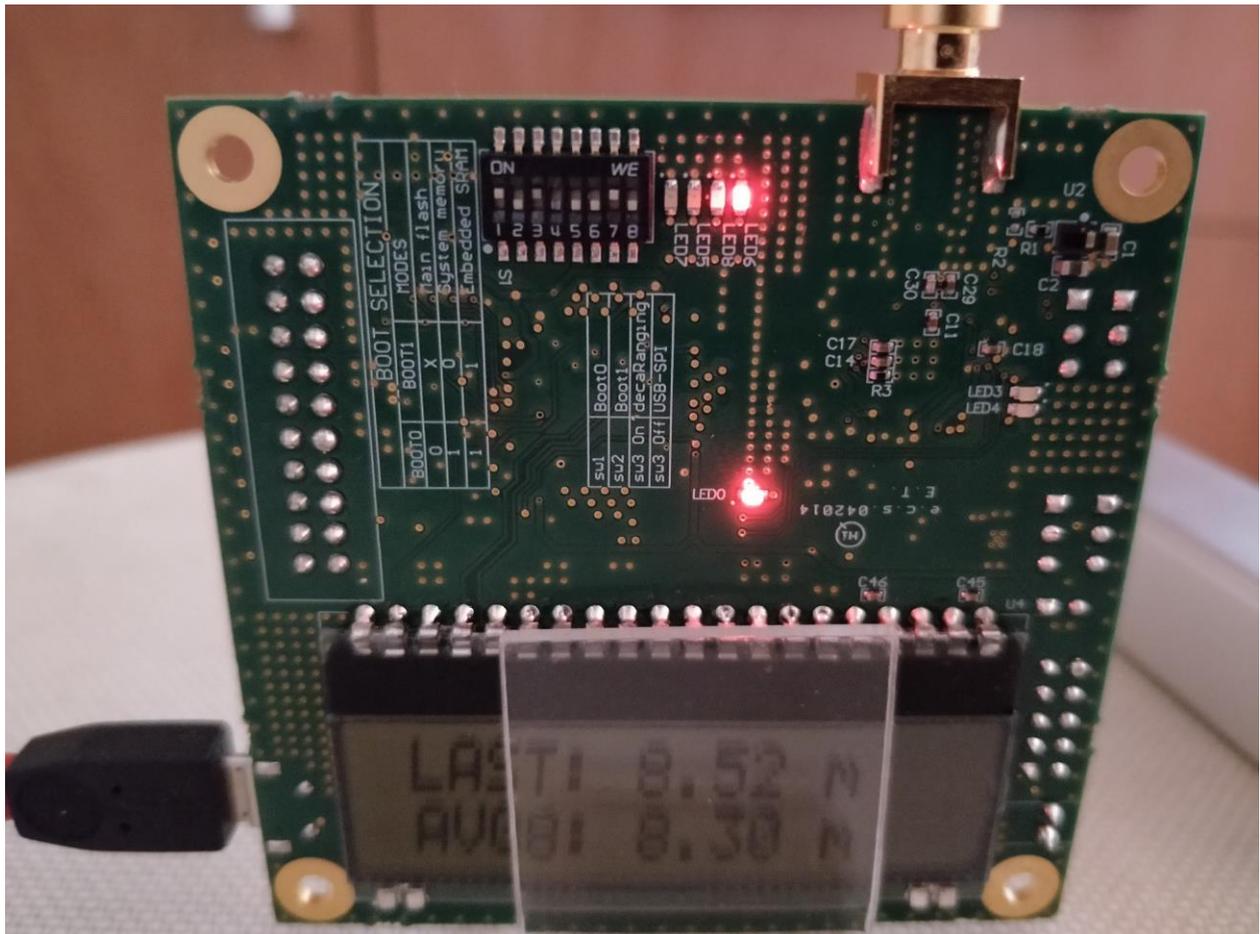


Figura 3-2. Cara frontal de EVB1000

En la cara posterior de la placa aparece el circuito integrado DW10000, el circuito integrado ARM, el botón de reset del circuito ARM, dos DIP switches (S2 y S3), el conector JTAG, el conector SPI¹², y varios jumpers y conectores para configurar los modos de alimentación.

¹² Serial Peripheral Interface

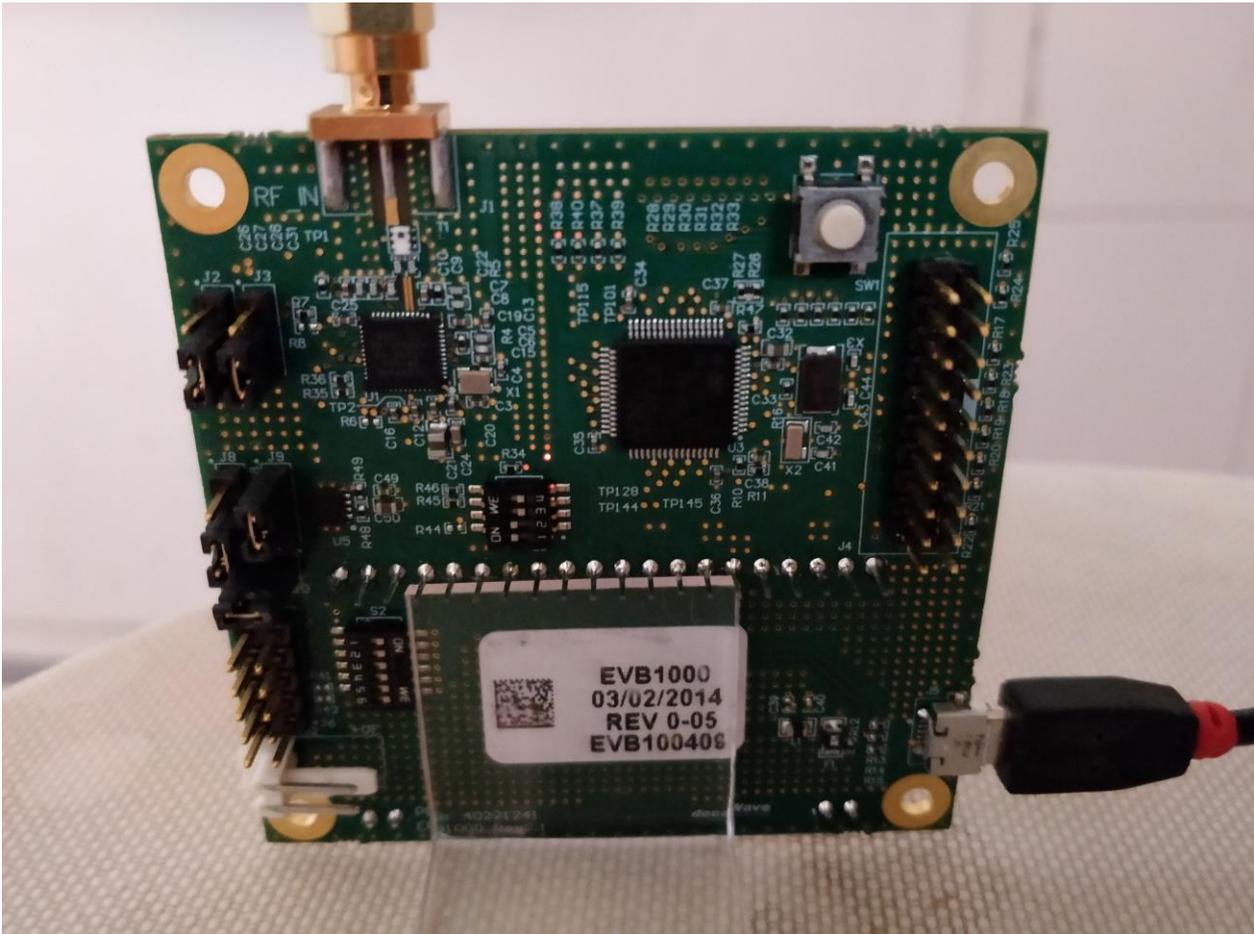


Figura 3-3. Cara posterior de EVB1000

3.1.2 Modos de funcionamiento

La placa EVB1000 cuenta con numerosos modos de operación preprogramados que se pueden seleccionar mediante el DIP switch S1.

Por defecto el sistema viene calibrado y configurado en el modo 5:

Tabla 3-1. Modos de operación

Modo	Canal	Tasa	PRF	Preámbulo	Código Preámbulo	S1-5	S1-6	S1-7
1	2	110 kbps	16	1024	3	OFF	OFF	OFF
2	2	6,8 Mbps	16	128	3	ON	OFF	OFF
3	2	110 kbps	64	1024	9	OFF	ON	OFF
4	2	6,8 Mbps	64	128	9	ON	ON	OFF
5	5	110kbps	16	1024	3	OFF	OFF	ON
6	5	6,8 Mbps	16	128	3	ON	OFF	ON
7	5	110 kbps	64	1024	9	OFF	ON	ON

8	5	6,8 Mbps	64	128	9	ON	ON	ON
---	---	----------	----	-----	---	----	----	----

Éste será el modo empleado durante todas las pruebas de este documento.

3.1.3 Roles

La aplicación DecaRanging requiere que una de las placas se configure como “Ancla” y la otra como “Tag”.

Estas configuraciones se determinan mediante el switch S1-4:

Tabla 3-2. Roles de EVB1000

S1-4	Rol
ON	Ancla
OFF	Tag

- El Ancla es el dispositivo de referencia y se encuentra en una posición conocida.
- El Tag es el elemento que se desea localizar, cuya posición se pretende determinar.

3.1.4 Modo de procesamiento

El EVB1000 puede funcionar de manera independiente mediante el procesador incluido en la placa o mediante la conexión a un PC.

Para el desarrollo de este documento el Ancla se conectará a un PC (por las propias características del Ancla que se encontrará en una posición fija) a través del puerto USB mientras el Tag funcionará de manera independiente. Con ello y mediante la aplicación DecaRanging se podrán extraer los datos de las medidas realizadas para su posterior estudio.

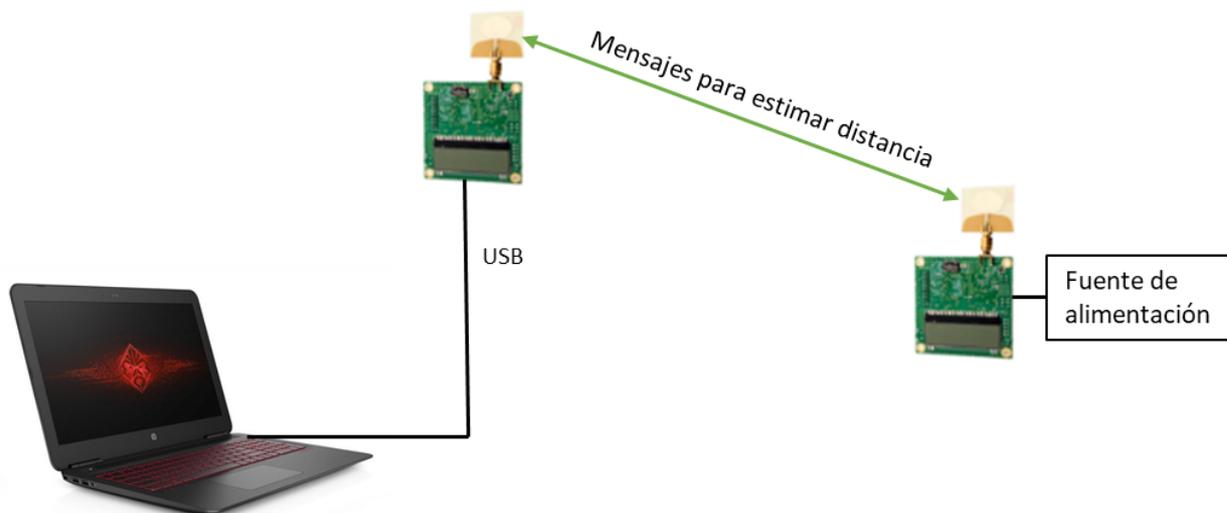


Figura 3-4. Esquema del montaje para las mediciones

Para configurar dicho modo la placa que realizará las veces de Ancla y se conectará al PC debe tener el switch S1-3 a OFF. Con ello la aplicación USB a SPI integrada en la placa actúa como un puerto virtual COM USB esclavo, permitiendo la conexión al PC mediante USB.



Figura 3-5. Switch S1

3.1.5 Antenna Delay

A pesar de que los equipos vienen calibrados de serie para los modos de uso 3 y 5 (para el desarrollo de todas las medidas se empleará el modo 5 o modo de serie), se recomienda antes de iniciar cualquier medida la calibración del parámetro conocido como antenna delay.

El antenna delay es un valor de corrección que se emplea para eliminar el tiempo de procesamiento, que se produce en el equipo cuando recibe o envía una señal, de la ecuación que calcula el tiempo de ida y vuelta de la señal y a partir de él la distancia entre Ancla y Tag.

Por ello siguiendo las instrucciones del fabricante el antenna delay debe calcularse de la siguiente manera:

1. Se ubican los dos equipos a una distancia no demasiado pequeña (por ejemplo 8 metros).
2. Iniciar el proceso de medida entre Ancla y Tag.
3. Determinar la distancia exacta entre Ancla y Tag.
4. Usar el botón Clear Counters para reiniciar las medias de las medidas. Evitando obstrucción en la línea de visión directa entre los equipos, determinar si la medida media obtenida se ajusta lo suficiente a la medida real. En caso de no serlo modificar el valor del antenna delay. Dicho valor decimal se encuentra expresado en nanosegundos. Según el fabricante, una variación de un nanosegundo en el antenna delay se traduce en una variación de unos 30 cm en la medida estimada.

Tras realizar este proceso en los equipos antes de iniciar las mediciones de este trabajo se llegó a la conclusión de que el Antenna Delay óptimo era de 512,571 ns en contraposición con el Antenna Delay por defecto cuyo valor era de 514,871 ns para el modo de configuración empleado.

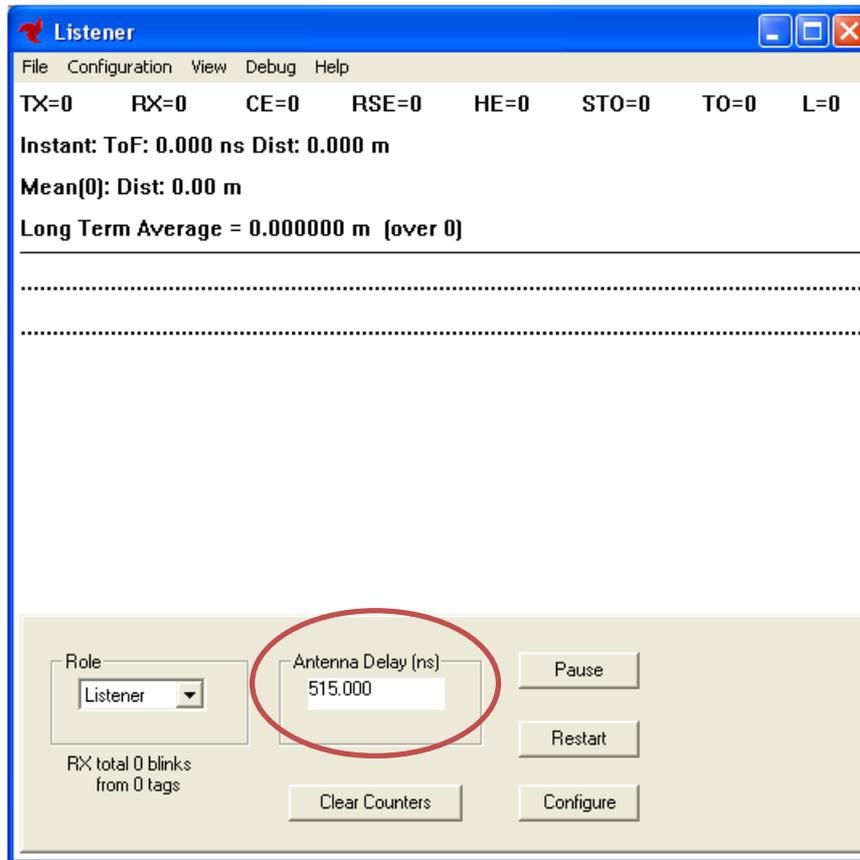


Figura 3-6. Modificar valor de Antenna Delay

3.1.6 Cálculo de la distancia

El método de medición empleado por el kit EVK1000 se basa en el uso de tres mensajes para completar dos viajes de ida y vuelta tras los cuales se obtiene la distancia entre Ancla y Tag. Mientras los mensajes son enviados y recibidos la aplicación Decaranging obtiene los tiempos de recepción y emisión de DW1000. Las marcas de tiempo incluidas en los mensajes transmitidos y recibidos se usan para calcular el retraso en el tiempo de ida y vuelta, y con ello la distancia.

En el algoritmo de medida existen dos roles, uno de ellos se denomina Tag y el otro Ancla. El Ancla principalmente escucha los mensajes emitidos por el Tag. El Tag inicia el proceso de medida enviando un mensaje de sondeo o Poll. Cuando el Ancla recibe el Poll envía a su vez un mensaje de respuesta. El Tag recibe este último mensaje y envía un último mensaje que incluye las marcas de tiempo de transmisor y receptor del Poll, su respuesta y del mensaje final. El Ancla usa esta información junto con sus propias marcas de tiempo para calcular dos viajes de ida y vuelta que posteriormente serán promediados. Una vez hecho esto se determina el tiempo de vuelo (T_{OF}) (mitad del viaje de ida y vuelta) que al ser multiplicado por la velocidad de la luz en el aire da lugar a la distancia.

Dicho protocolo se conoce como “Asymmetrical double-sided two-way ranging” [11]

A continuación se presenta un diagrama que resume el proceso.

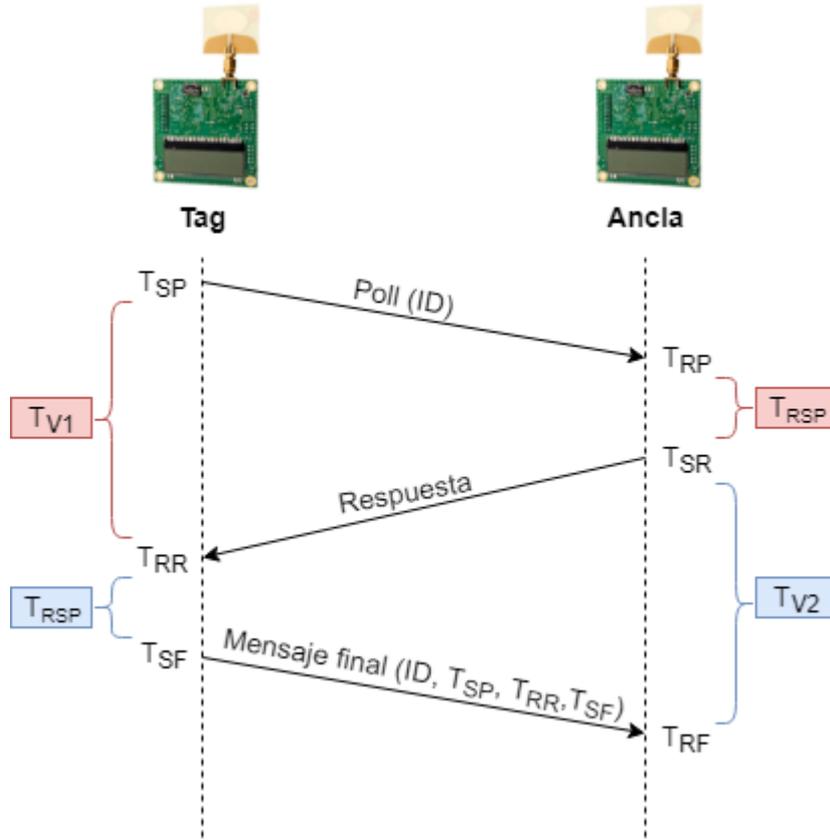


Figura 3-7. Diagrama del proceso de estimación de distancia Ancla-Tag

Para el primer envío el tiempo de vuelo de ida y vuelta se calcula como el tiempo entre la emisión del mensaje (T_{SP}) y su recepción (T_{RR}) eliminando el tiempo de procesamiento del equipo, que se produce entre la recepción del primer mensaje (T_{RP}) y el envío de la respuesta (T_{SR}).

$$T_{IV1} = (T_{RR} - T_{SP}) - (T_{SR} - T_{RP})$$

El caso del segundo envío sería análogo:

$$T_{IV2} = (T_{RF} - T_{SR}) - (T_{SF} - T_{RR})$$

Estos tiempos se promedian y posteriormente se calcula la mitad del trayecto o tiempo de vuelo. Por tanto el cálculo del tiempo de vuelo quedaría de la siguiente manera:

$$T_{OF} = \frac{(T_{RR} - T_{SP}) - (T_{SR} - T_{RP}) + (T_{RF} - T_{SR}) - (T_{SF} - T_{RR})}{4}$$

$$T_{OF} = \frac{2T_{RR} - T_{SP} - 2T_{SR} + T_{RP} + T_{RF} - T_{SF}}{4}$$

4 MODELO TEÓRICO

La sección siguiente pretende desglosar los diferentes casos que se producen a la hora de estimar la distancia en los sistemas basados en TOA. Estos son los casos LOS y NLOS.

Se presentarán los modelos propuestos por la literatura estudiada para, posteriormente en siguientes apartados, determinar si efectivamente para los equipos del kit EVK1000 y un entorno concreto se pueden replicar dichos resultados.

4.1 Modelo de estimación de la distancia [12]

A la hora de medir el rendimiento de los sistemas de localización UWB basados en TOA se suele distinguir entre los casos en los que existe visión directa entre transmisor y receptor (caso LOS) y los casos en los que no existe visión directa (NLOS).

Esta clasificación hace una distinción entre la existencia o no de un camino físico entre Tag y Ancla libre de obstáculos y asume que esto es lo que determina el desempeño del sistema a la hora de obtener estimaciones de distancia.

Sin embargo, según [12] lo que determina una correcta estimación de la distancia no es la existencia de esta visión directa sino la detección de la componente principal en el multitrayecto o camino directo (DDP).

En la práctica aunque se interponga un obstáculo entre Ancla y Tag puede existir la posibilidad de que el rayo directo se detecte, y por tanto deben distinguirse tres casos:

- LOS DDP: Existe visión directa y además se detecta el rayo directo.
- NLOS DDP: No existe visión directa pero se detecta el rayo directo.
- NLOS UDP: No existe visión directa, no se detecta el rayo directo pero se detecta otra de sus componentes multitrayecto.

En este trabajo se realizarán diferentes medidas en un entorno interior y se determinará el error (su distribución) para los diferentes casos mencionados, tratando de reproducir sus resultados.

Se define como error en la estimación de la distancia (ε) a la diferencia entre la distancia estimada por el equipo (\hat{d}) y la distancia real entre Ancla y Tag (d).

$$\varepsilon = \hat{d} - d$$

Este error es fuertemente dependiente de la localización del Tag respecto del Ancla y permite distinguir, como se mencionaba anteriormente, tres situaciones diferentes.

4.1.1 Caso de visión directa (LOS)

Es el caso en que existe visión directa entre Ancla y Tag y por tanto se detecta el rayo directo (DP).

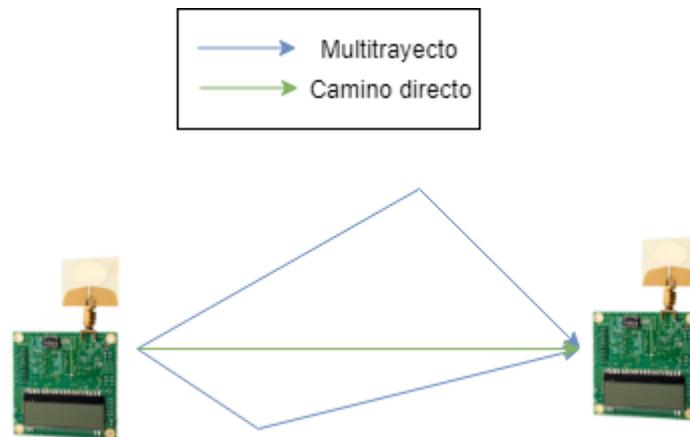


Figura 4-1. Esquema caso LOS

Los errores dominantes en esta situación son debidos al canal multitrayecto así como a un ruido gaussiano presente en todas las situaciones descritas en el trabajo.

Por tanto el modelo de la distancia estimada se describe de la siguiente manera:

$$\hat{d} = d + b_m(\omega) + n$$

donde $b_m(\omega)$ representa el error provocado por el canal multitrayecto, que es dependiente del ancho de banda empleado, y n representa el ruido gaussiano.

4.1.2 Caso sin visión directa y rayo directo detectado (NLOS DDP)

En esta situación, entre Ancla y Tag aparece un obstáculo que impide la visión directa entre ellos.

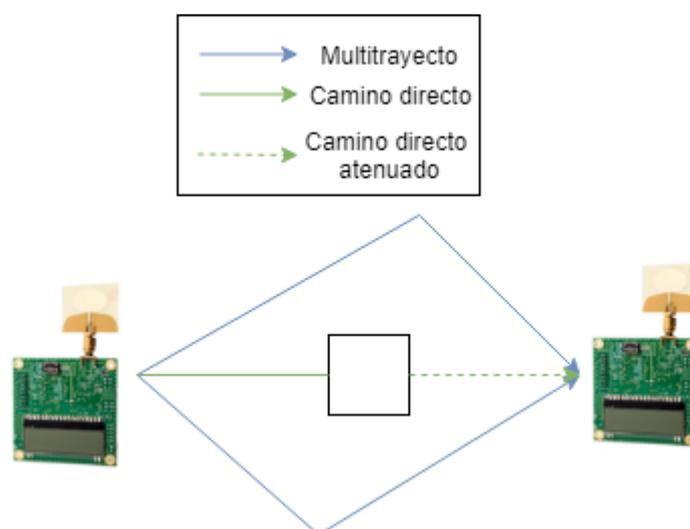


Figura 4-2. Esquema caso NLOS-DDP

Además de los errores de la situación anterior se producen errores introducidos por el retraso en la

propagación.

Debido al cambio de medio que sufre la onda cuando viaja a través del obstáculo que bloquea la visión entre Ancla y Tag, la velocidad de propagación de dicha onda varía y por tanto la estimación que realizan los equipos no son del todo exactas, ya que éstos suponen que la onda siempre está desplazándose por el aire.

Por tanto el cálculo de la distancia estimada se describe de la siguiente manera:

$$\hat{d} = d + b_m(\omega) + b_{pd} + n$$

donde se ha introducido el parámetro b_{pd}^{13} para modelar el error debido al retraso en la propagación debido al obstáculo.

4.1.3 Caso sin visión directa y sin rayo directo detectado (NLOS UDP)

Existen situaciones en las cuales debido a un obstáculo el rayo directo se ve atenuado con tanta intensidad que su potencia queda por debajo del rango dinámico de los equipos de medidas. En estas situaciones las estimaciones de distancias dependen del resto de componentes multitrayecto y por tanto dicha estimación será menos precisa.

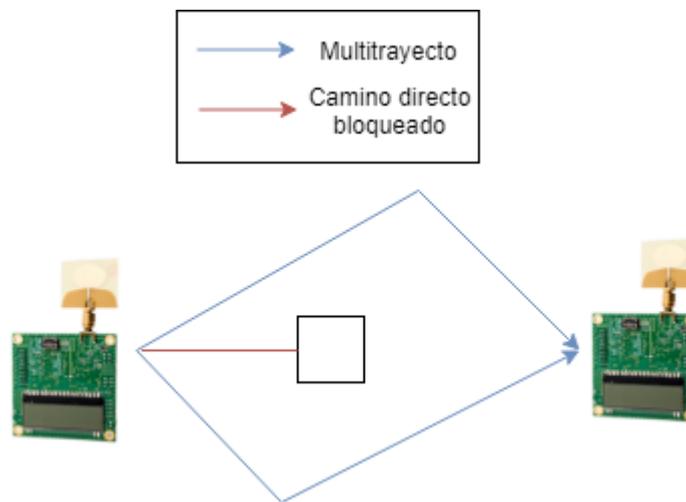


Figura 4-3. Esquema caso NLOS-UDP

El cálculo de la distancia estimada se describe de la siguiente manera:

$$\hat{d} = d + b_m(\omega) + b_{pd} + b_B(\omega) + n$$

modelando el bloqueo del rayo directo mediante $b_B(\omega)$ y siendo éste dependiente del ancho de banda. A mayor ancho de banda menos energía en cada una de las componentes multitrayecto y por tanto mayor probabilidad de bloqueo.

La componente $b_B(\omega)$ introducida por el bloqueo es siempre positiva. Esto se debe a que la onda debe recorrer un mayor trayecto por cualquiera de los caminos del multitrayecto que no sea el directo, aumentando así de manera errónea la distancia estimada.

¹³ Propagation Delay

4.2 Modelado del error en la estimación de la distancia

En esta sección procedemos a describir el modelo del error descrito en la documentación de referencia para en secciones posteriores verificar si para equipos y entornos diferentes se cumple dicho modelo.

En primer lugar se establece en [12] la suposición de que el error en la estimación de la distancia crece linealmente a medida que se alejan Ancla y Tag, por lo cual podemos definir el concepto de error normalizado.

$$\psi = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{\hat{d} - d}{d}$$

Mediante esta definición del error se espera eliminar la dependencia de éste con la distancia haciendo por tanto el modelo trasladable a otros escenarios.

Aplicando lo descrito en la sección 4.1 establecemos el modelo del error en la estimación de la distancia en entornos interiores de la siguiente forma:

$$\psi = \psi_m + G(\psi_{pd} + X\psi_B)$$

donde ψ_m es el error normalizado debido al multitrayecto que se produce tanto en casos LOS como NLOS e independiente de la detección o no del rayo directo.

ψ_{pd} es el error normalizado debido al retraso de propagación y se produce en casos NLOS, independientemente de si se detecta o no el rayo directo.

ψ_B es el error introducido en el sistema cuando se produce un bloqueo en el rayo directo y por tanto solo se produce en casos NLOS UDP.

Es decisión de diseño del modelo presentar a ψ_B como incremental a ψ_{pd} . Si bien es cierto que pueden darse casos NLOS UDP donde la componente del multitrayecto no se vea bloqueada, y por tanto no presente ψ_{pd} , en la práctica y manteniendo ψ_{pd} se traduce en un menor valor de ψ_B del real pero que al sumarlo a ψ_{pd} refleja el error real producido en el caso NLOS UDP.

Para diferenciar en el modelo el comportamiento del error en situaciones LOS y NLOS se introduce la variable aleatoria G , siguiendo esta una distribución de Bernoulli.

$$G = \begin{cases} 0, & LOS \\ 1, & NLOS \end{cases}$$

De manera análoga, para diferenciar en el modelo el comportamiento del error en situaciones de detección del rayo directo (DDP) de situaciones de bloqueo del rayo directo (UDP) se introduce la variable aleatoria X , siguiendo también una distribución de Bernoulli.

$$X = \begin{cases} 0, & DDP \\ 1, & UDP \end{cases}$$

4.2.1 Función densidad de probabilidad del error para situaciones LOS

Tras observar las situaciones anteriormente descritas, se puede inferir que para los casos LOS el error en la estimación de la distancia está dominado por la componente debida al multitrayecto.

El error en estas situaciones puede modelarse como una distribución normal de media μ_m y desviación típica σ_m

$$f(\psi|G = 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} e^{-\frac{(\psi-\mu_m)^2}{2\sigma_m^2}}$$

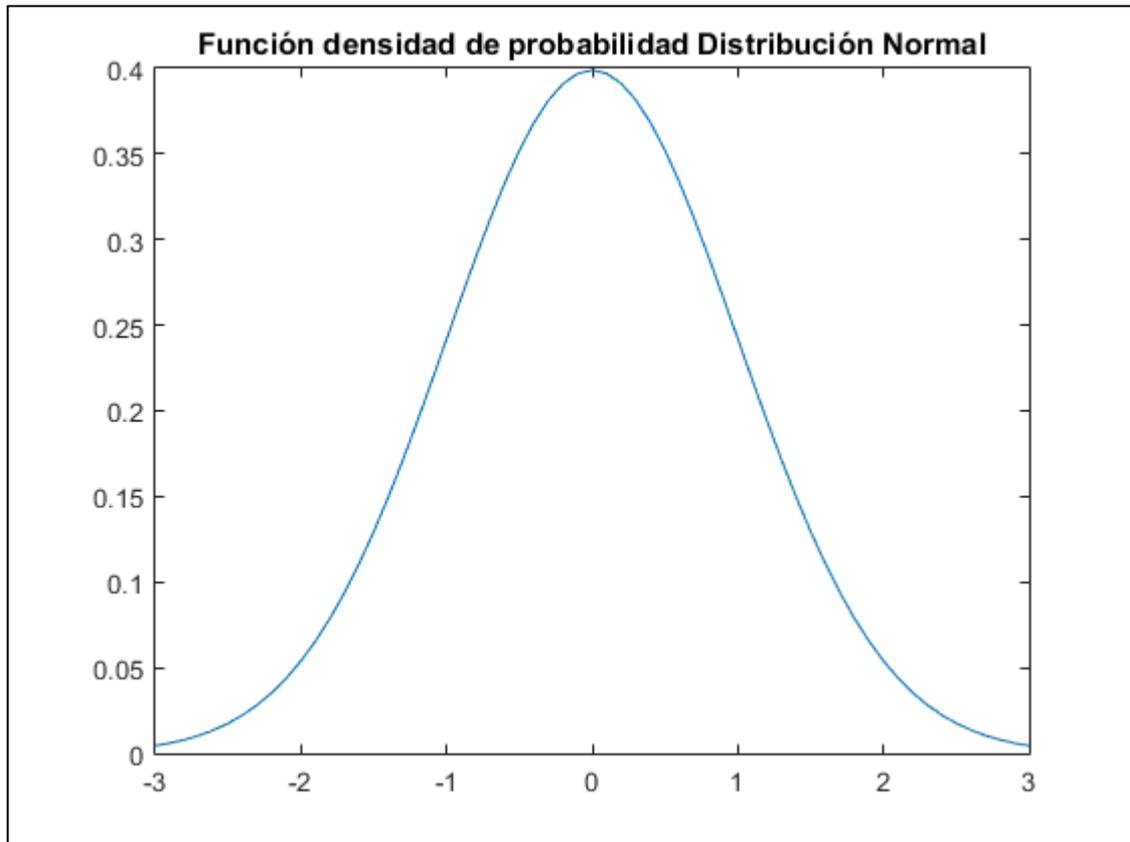


Figura 4-4. Función densidad de probabilidad de una distribución Normal

4.2.2 Función densidad de probabilidad del error para situaciones NLOS-DDP

Para los casos donde no existe visión directa pero el rayo directo se detecta, además de la influencia del multirayecto se incluye el retraso de propagación. Esto se traduce en un aumento de la media ($\mu_{m,pd}$) y de la desviación típica $\sigma_{m,pd}$, pero conservando la misma función gaussiana.

$$f(\psi|G = 1, X = 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{m,pd}^2}} e^{-\frac{(\psi - \mu_{m,pd})^2}{2\sigma_{m,pd}^2}}$$

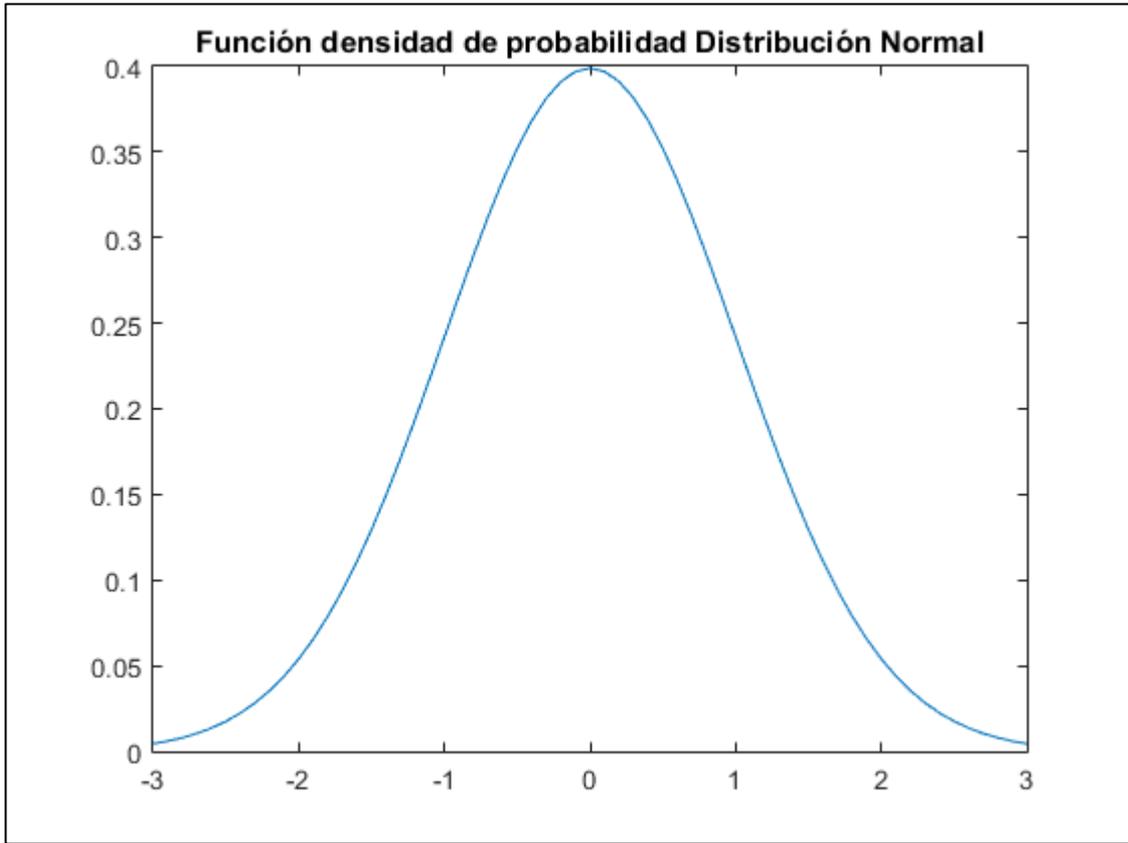


Figura 4-5. Función densidad de probabilidad de una distribución Normal

4.2.3 Función densidad de probabilidad del error para situaciones NLOS-UDP

Para el último caso contemplado, cuando no existe visión directa y además no se detecta el rayo directo, algunos autores mantienen la distribución del error como una gaussiana, otros modelan el error como una función Beta. Sin embargo, la documentación de [12] propone modelar el error no como una gaussiana sino como una distribución lognormal ya que dice ajustarse más al caso estudiado.

$$f(\psi|G = 1, X = 1) = \frac{1}{\psi \sqrt{2\pi\sigma_{m,pd,B}^2}} e^{-\frac{(\ln(\psi) - \mu_{m,pd,B})^2}{2\sigma_{m,pd,B}^2}}$$

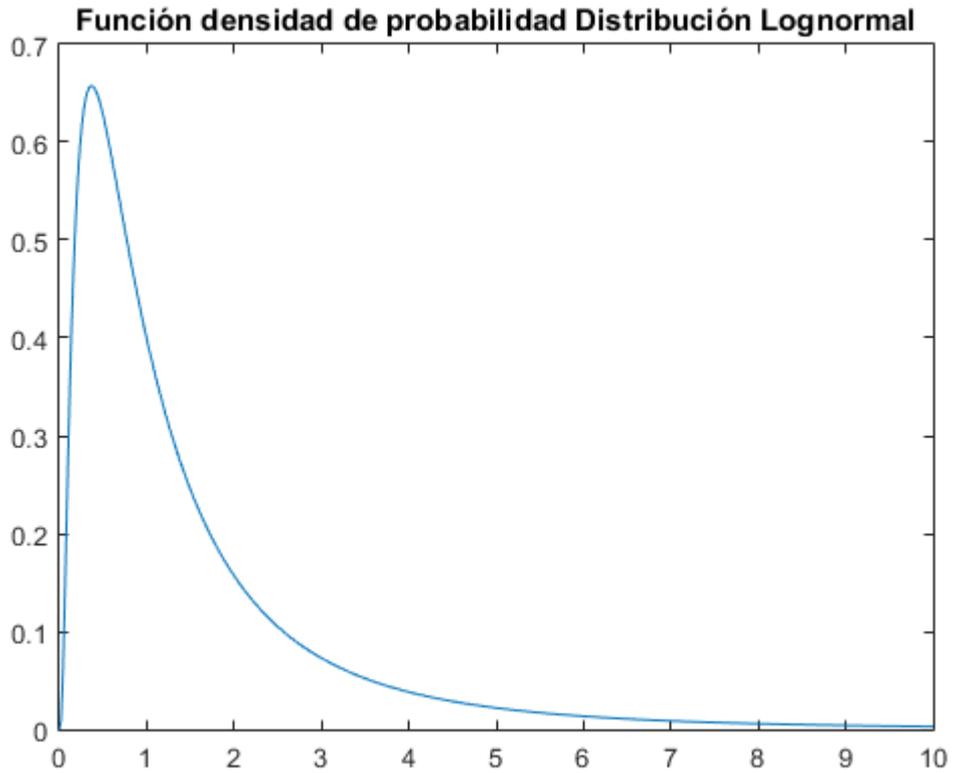


Figura 4-6. Función densidad de probabilidad de una distribución Lognormal

Una distribución lognormal se caracteriza porque el logaritmo de la variable aleatoria representada sigue una distribución normal de media μ y desviación típica σ .

La relación que existe entre los parámetros μ y σ en una distribución lognormal y la media y varianza de dicha distribución es la siguiente:

$$Media = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$

$$Varianza = e^{2\mu + \sigma^2} * (e^{\sigma^2} - 1)$$

5 MEDICIONES

El objetivo de este apartado es el de, empleando los equipos del kit EVK1000 de Decawave anteriormente descrito en el Capítulo 3, realizar un conjunto de medidas de estimación de la distancia entre Ancla y Tag en un entorno doméstico abarcando éstas la casuística explicada en el Capítulo 4.

Mediante el análisis del error en el cálculo de la distancia se pretende determinar la distribución estadística de dicho error para los casos LOS, NLOS-DDP y NLOS-UDP corroborando si es posible reproducir los resultados obtenidos por [12] o existen diversos factores que provocan una variación de estos resultados.

5.1 Entorno del experimento

El lugar elegido para la realización de toda la batería de medidas empleadas en el desarrollo posterior del trabajo es un domicilio particular con la siguiente distribución.

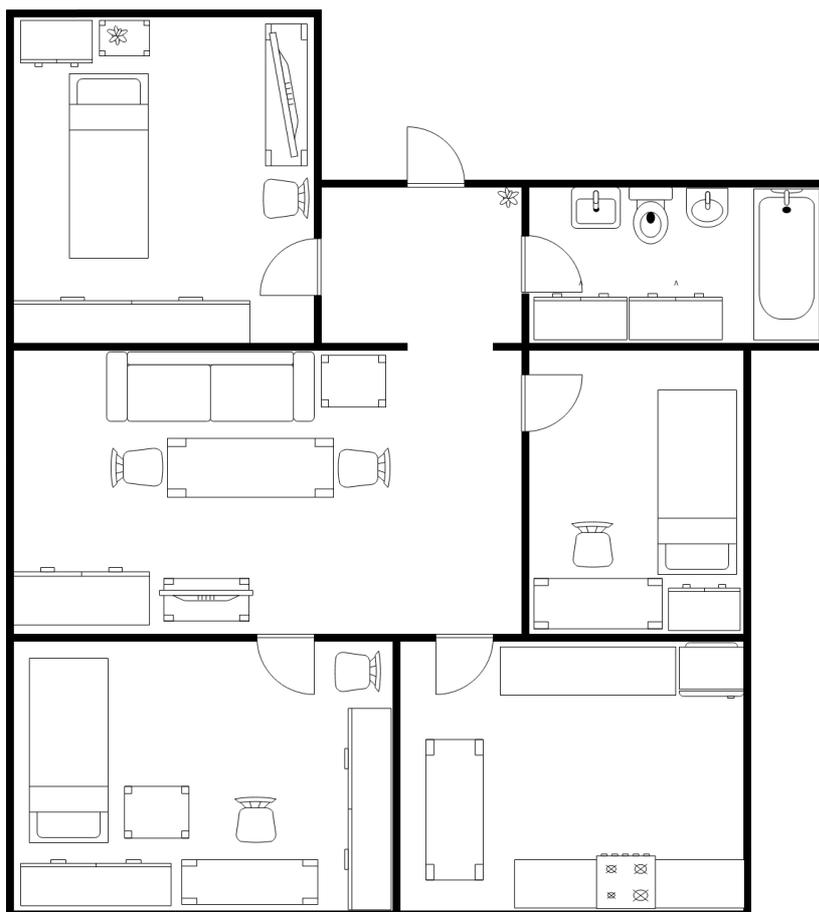


Figura 5-1. Plano de domicilio

Se trata de una casa de tamaño medio con muros de aproximadamente 15 cm de grosor en las paredes interiores. Las habitaciones tienen una dimensión de varios metros y se encuentra completamente amueblada (camas, sillas, mesas, sofás, televisores...), por lo que resulta un entorno idóneo para realizar las mediciones.

5.2 Resultados

Se realizarán una serie de medidas en diferentes zonas de la casa desplazando tanto Ancla como Tag maximizando así la diversidad en las muestras. Posteriormente y de forma manual se etiquetará cada una de las medidas en uno de los tres casos contemplados en el estudio: LOS, NLOS-DDP y NLOS-UDP.

Tras esto se extraerán los diferentes estadísticos de las medidas y se ajustarán a modelos, comparando los resultados obtenidos para los tres casos con las conclusiones del artículo base del trabajo.

5.2.1 Normalización del error en función de la distancia

El error en la estimación se definía de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \hat{d} - d$$

siendo \hat{d} la distancia estimada y d la distancia real.

Sin embargo en las diferentes fuentes estudiadas se llega a la conclusión de que el error en la estimación de la distancia entre Ancla y Tag es dependiente de la distancia entre ellos.

Por tanto en lugar de con el error se trabaja con el error normalizado ψ a la hora de la proposición de los diferentes modelos de error.

Algunos autores [13] consideran que dicha dependencia es logarítmica y expresan el error normalizado con la siguiente ecuación:

$$\psi = \frac{\varepsilon}{\log(1 + d)} = \frac{\hat{d} - d}{\log(1 + d)}$$

Otros, entre ellos el artículo base de este trabajo [12] presenta esta dependencia mediante una función lineal:

$$\psi = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{\hat{d} - d}{d}$$

Sin embargo debido a que en este estudio se trabajará con un equipo diferente, que además realiza un procesamiento de la señal para aumentar la calidad de la estimación, como primer paso se procederá a comprobar si efectivamente existe esta dependencia (lineal, logarítmica o de otra clase) entre error y distancia.

Para ello se realizan una serie de medidas a diferentes distancias de Ancla y Tag, todas ellas para el caso LOS.

Tras esto se calcula el error en la estimación y una media del mismo para cada una de las distancias.

Una vez se tiene este conjunto de datos se representan las diferentes medias de error en función de la distancia real en la siguiente gráfica:

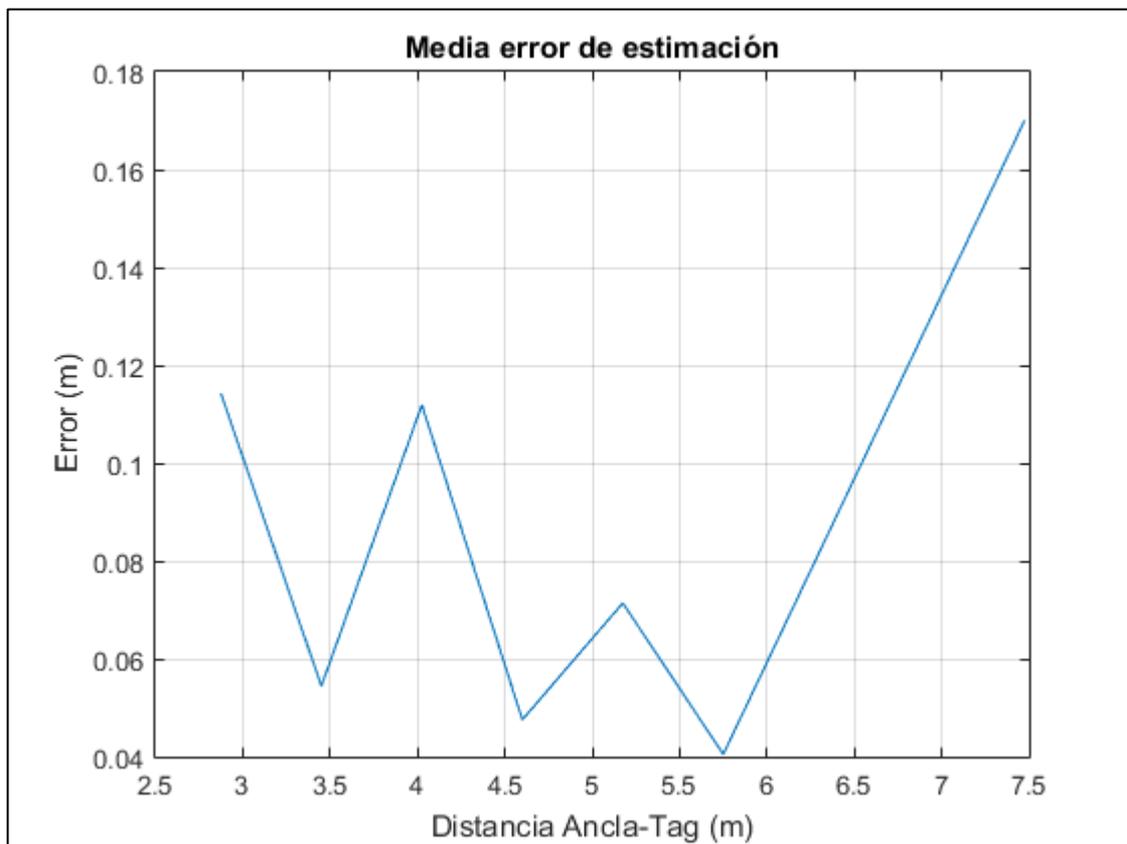


Figura 5-2. Media del error de estimación en función de la distancia Ancla-Tag

Como se puede apreciar no se observa ningún tipo de dependencia entre error y distancia, ni lineal ni logarítmica, por lo que en lo sucesivo del trabajo se usará el error y no el error normalizado.

5.2.2 Estudio Medidas

Se propone la realización de una serie de medidas con diferentes posiciones de Ancla y Tag a lo largo de toda la casa cubriendo la mayor variedad posible de distancias y situaciones (LOS, NLOS-DDP, NLOS-UDP).

Una vez realizada la medida en una determinada posición, se clasificará de manera manual si dicha ubicación corresponde al caso LOS, NLOS-DDP o NLOS-UDP.

La clasificación entre casos LOS y NLOS resulta bastante sencilla dado que es apreciable a simple vista si existe visión directa entre Ancla y Tag.

La distinción entre los casos NLOS-DDP y NLOS-UDP es un poco más compleja. Existen propuestas para, mediante la extracción de diversos estadísticos de las señales recibidas en el Tag y el Ancla, a través de máquinas de vectores de soporte (SVM) etiqueten la posición en el caso DDP o UDP. Dado que esta propuesta se escapa del alcance de este proyecto, además de necesitar de unas medidas de entrenamiento clasificadas de manera manual (Ground Truth) se realizará el etiquetado de las posiciones de manera manual.

Una vez realizada la batería de medidas y su posterior clasificación se procede a su estudio. Para cada una de las tres situaciones se propone un análisis de la distribución del error para poder así aproximar dicha distribución a un determinado modelo, comparándolo además con el propuesto por [12].

Mediante este modelo podrían simularse algoritmos de detección en interiores UWB sin necesidad de tomar medidas, dado que se tendría una idea aproximada de la distribución del error.

5.2.2.1 Medidas LOS

Una vez tomadas todas las medidas de estimación de la posición para los casos etiquetados como LOS, se procede a calcular el error para cada una de estas posiciones, dado que se conoce el valor de distancia real.

Según lo descrito en la sección 4.1.1 la variable aleatoria que modela el error sigue una distribución normal de media μ_m y desviación típica σ_m .

$$f(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} e^{-\frac{(\psi-\mu_m)^2}{2\sigma_m^2}}$$

Si se representa el histograma de los errores en las estimaciones para el caso LOS se obtiene la siguiente gráfica:

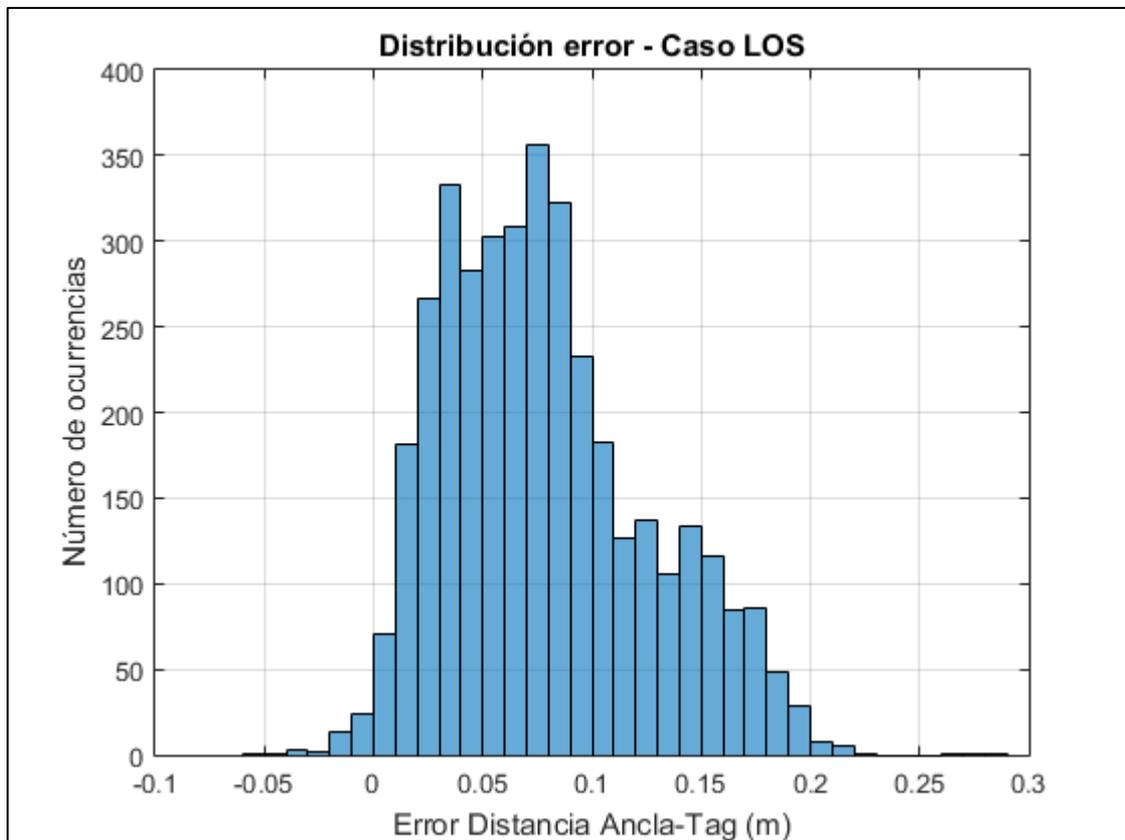


Figura 5-3. Histograma del Error – Caso LOS

Como se puede apreciar la distribución del error no presenta un ajuste a una distribución normal tan preciso

como el planteado por [12].

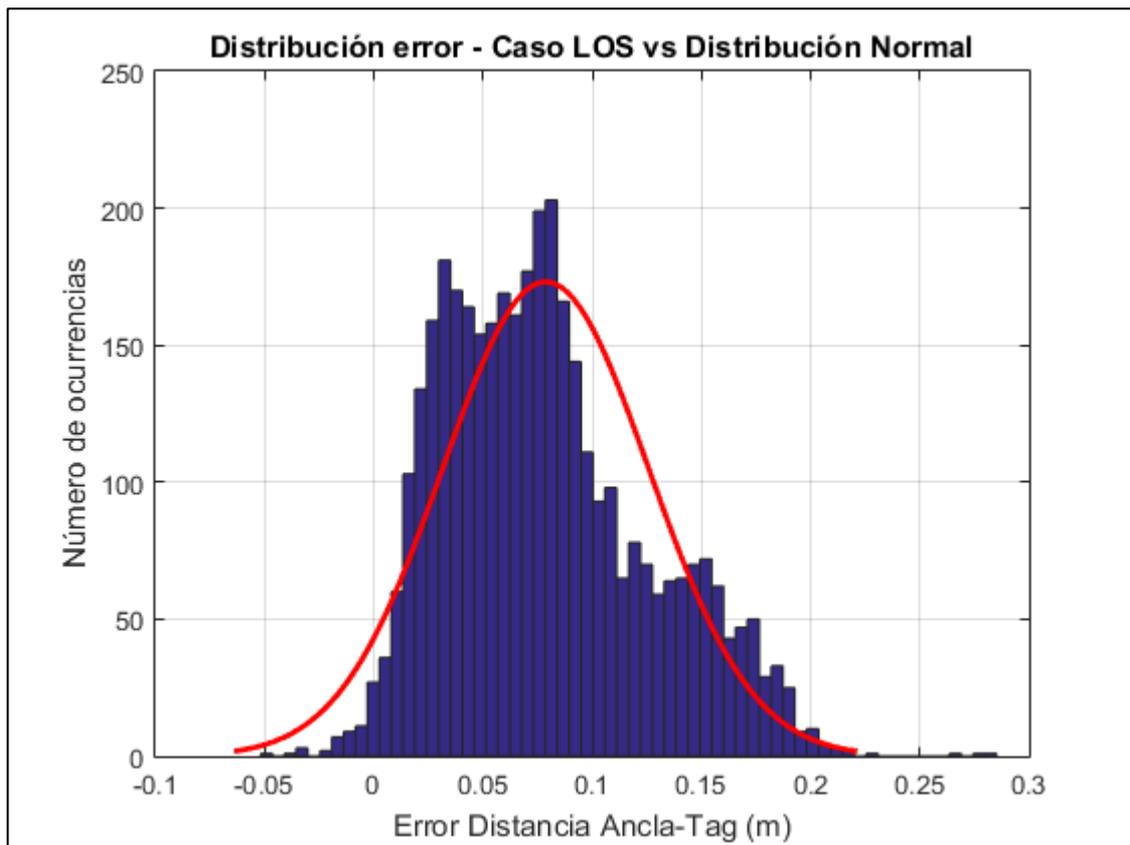


Figura 5-4. Ajuste Distribución del error a Distribución Normal – Caso LOS

Se representa también la función de probabilidad acumulada de las medidas tomadas frente a la que produciría una distribución Normal con media y varianza las calculadas según las medidas reales.

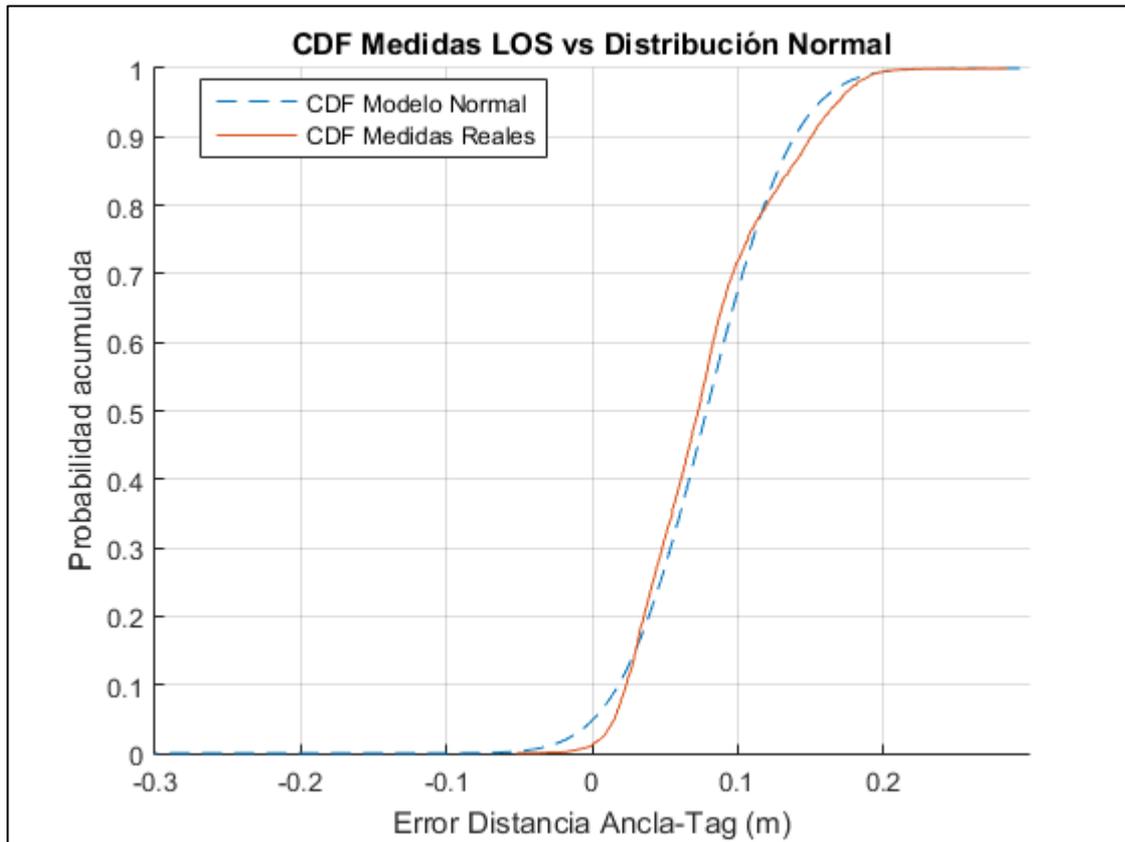


Figura 5-5. CDF Medidas LOS vs CDF Distribución Normal

En vista de la forma obtenida se prueba a continuación como modelo para el caso LOS, en la casa del estudio y para el equipo usado la distribución lognormal en su lugar.

La distribución Lognormal se caracteriza por estar definida únicamente para valores positivos. Debido a que en los valores de error del caso LOS existen valores negativos la distribución que se estudiará para el ajuste del error en este caso es la distribución lognormal desplazada o shifted-lognormal con desplazamiento Y .

$$f(\psi) = \frac{1}{(\psi + Y)\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} e^{-\frac{(\ln(\psi+Y)-\mu_m)^2}{2\sigma_m^2}}$$

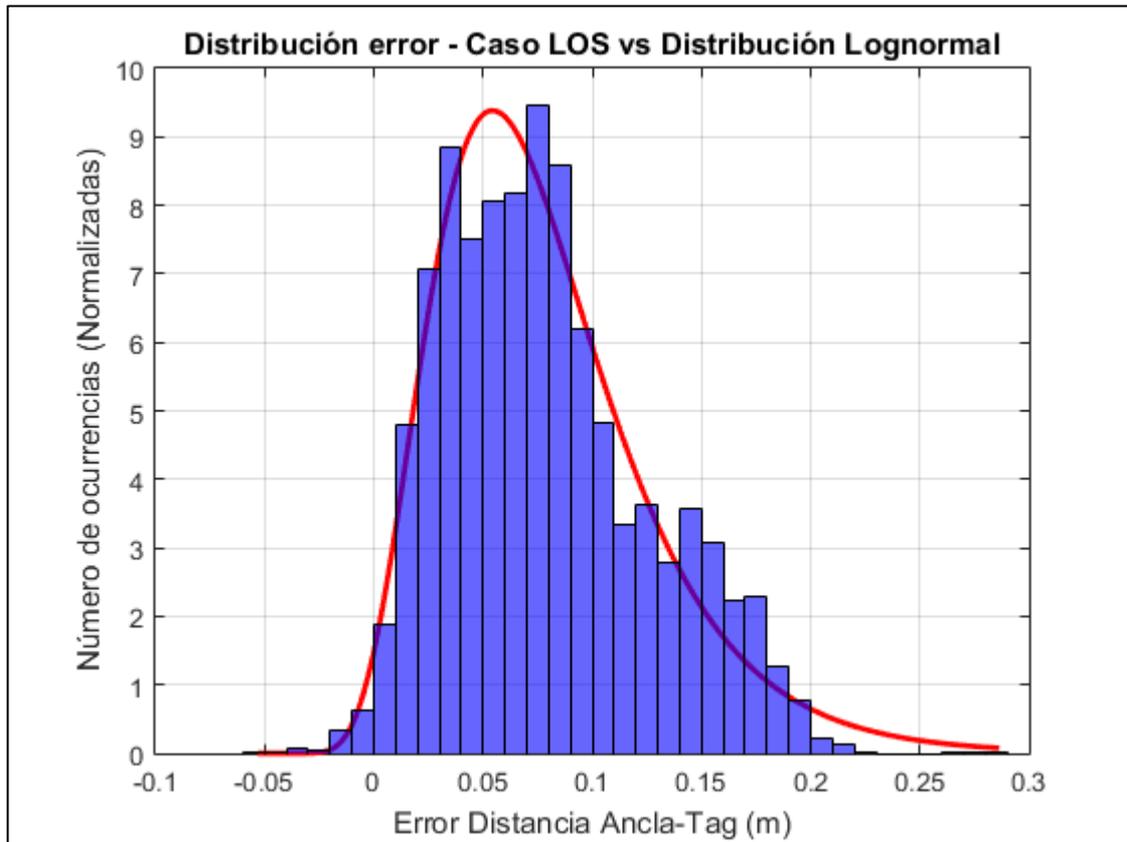


Figura 5-6. Ajuste Distribución del error a Distribución Lognormal – Caso LOS

Como podemos apreciar en la Figura 5-6 la distribución del error para el caso LOS se ajusta más a una distribución shifted lognormal [14] [15].

Sin embargo, en vista de la alta complejidad del modelo LOS basado en shifted Lognormal (Lognormal de tres parámetros) consideramos que puede modelarse el error en los casos LOS como una distribución normal por simplicidad y para seguir el criterio usado mayoritariamente en la literatura [12].

El modelo para una distribución normal obtenido con las medidas LOS presenta los siguientes valores de media y varianza:

Tabla 5-1. Parámetros distribución Normal con medidas LOS

Parámetros	Valor
μ_m	0.0787 m
σ_m	0.0472 m

5.2.2.2 Medidas NLOS-DDP

Tras etiquetar varias de las medidas tomadas como casos sin visión directa pero donde se detecta el rayo directo se procede a su estudio y comparación con la documentación de referencia para determinar equivalencias entre los modelos propuestos.

Según lo descrito en la sección 4.1.2 la variable aleatoria que modela el error para casos NLOS-DDP sigue una distribución normal de media $\mu_{m,pd}$ y desviación típica $\sigma_{m,pd}$, superiores a la media y desviación típica del caso LOS.

$$f(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{m,pd}^2}} e^{-\frac{(\psi-\mu_{m,pd})^2}{2\sigma_{m,pd}^2}}$$

Representando el histograma de los errores obtenidos para cada uno de los casos NLOS-DDP se obtiene la siguiente gráfica:

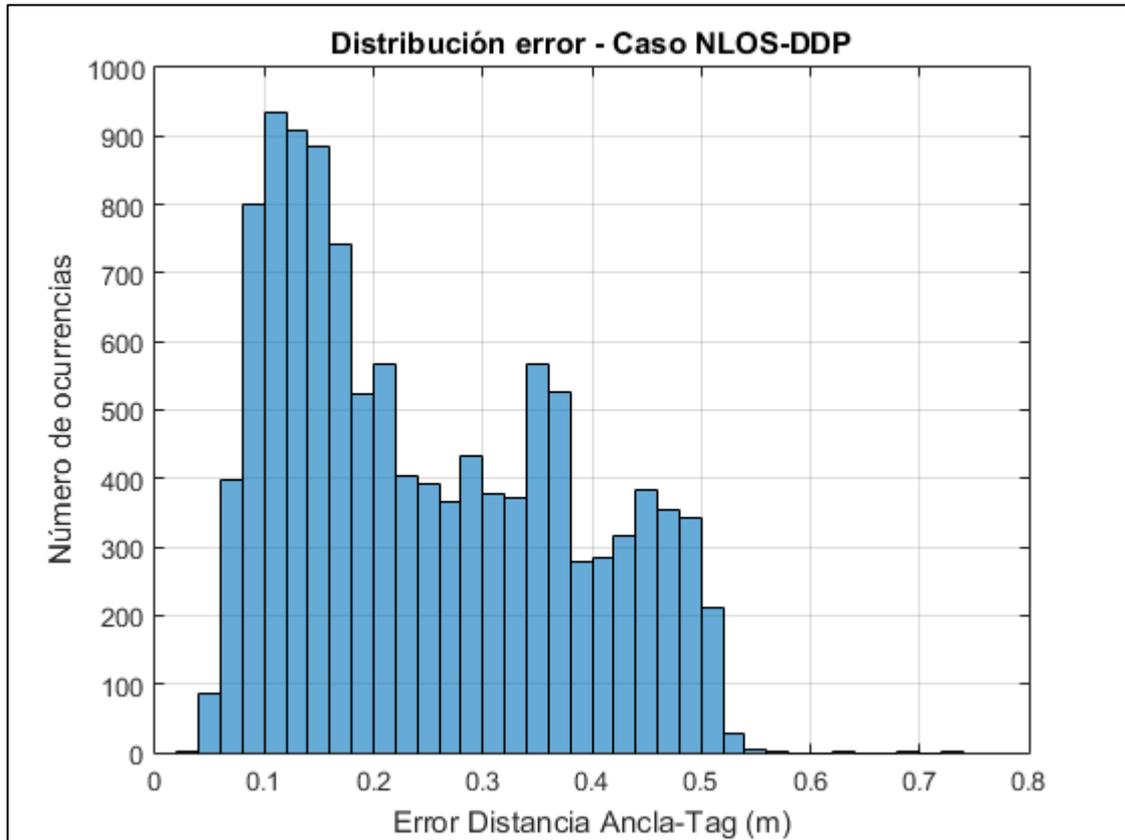


Figura 5-7. Histograma del Error – Caso NLOS-DDP

Comparándola con la distribución normal se observa que el ajuste no es adecuado.

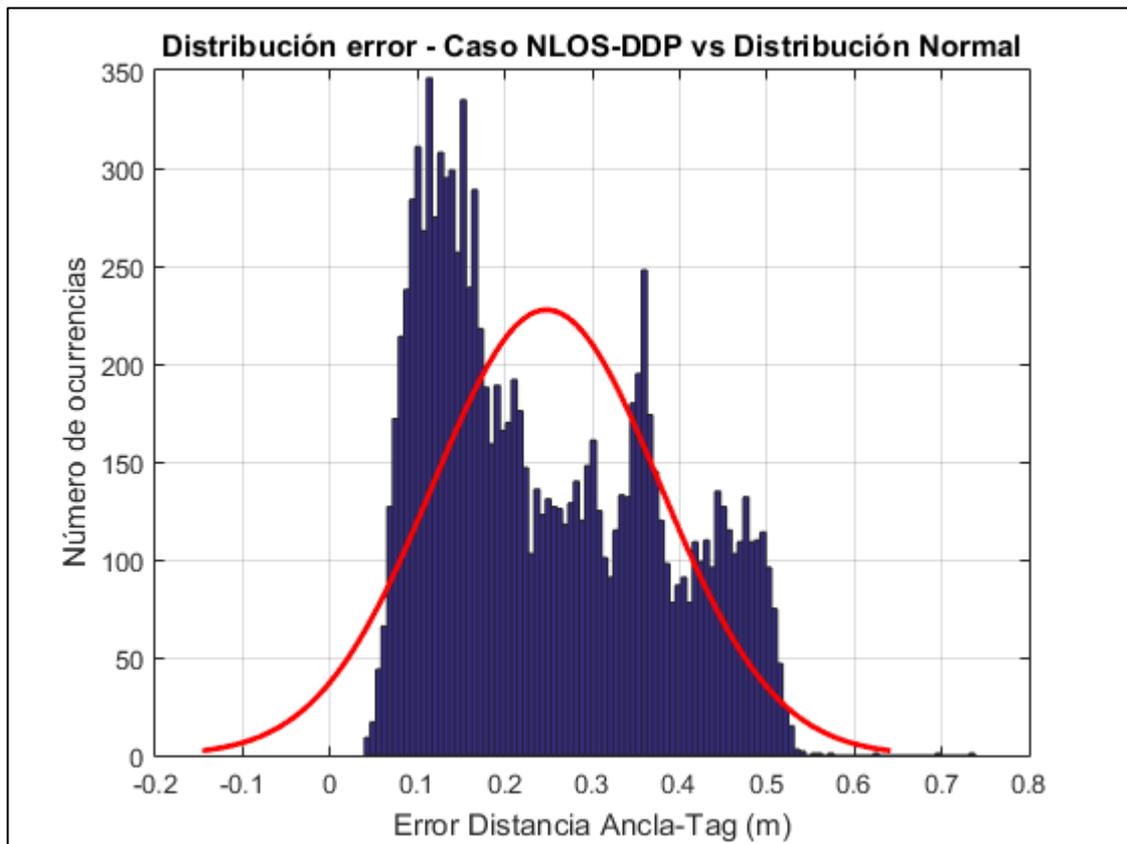


Figura 5-8. Ajuste Distribución del error a Distribución Normal – Caso NLOS-DDP

Se representa también la función de probabilidad acumulada de las medidas tomadas frente a la que produciría una distribución Normal con media y varianza las calculadas según las medidas reales.

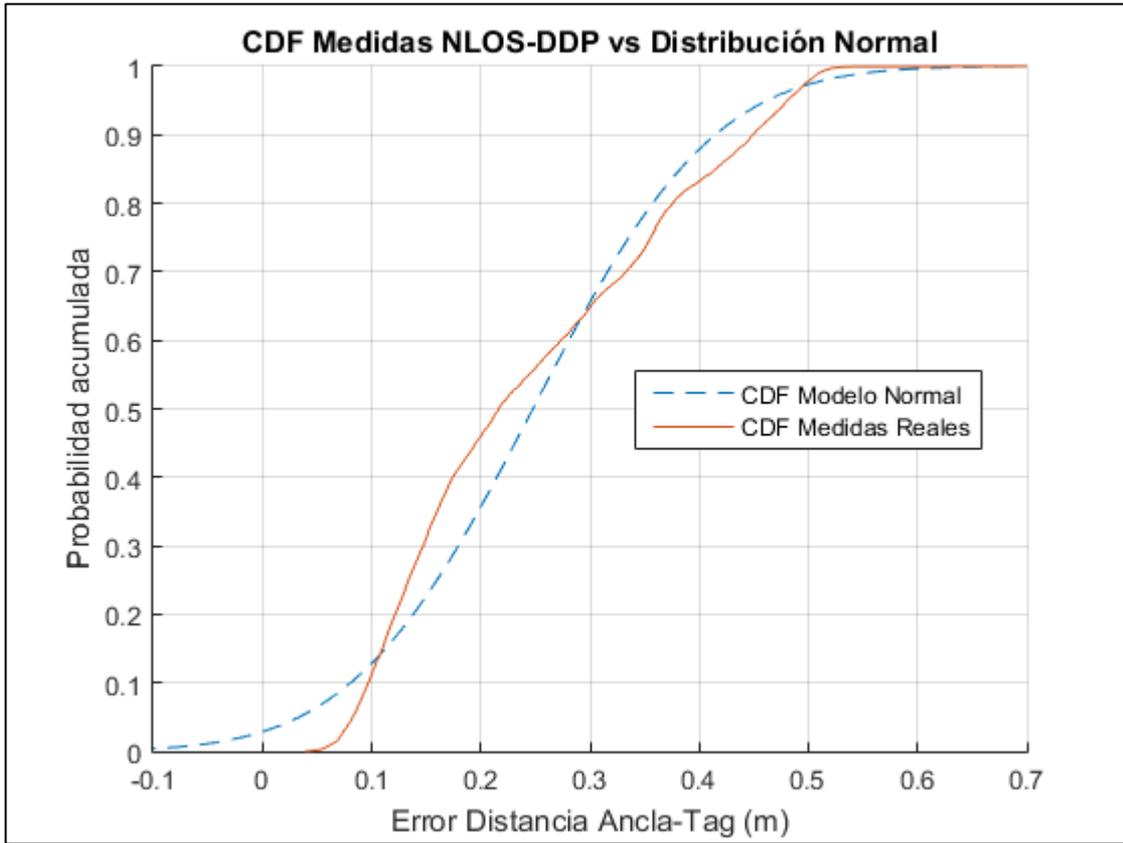


Figura 5-9. CDF Medidas NLOS-DDP vs CDF Distribución Normal

Debido a la falta de ajuste se propone por tanto la distribución Lognormal para ajustar la distribución del error obtenido.

$$f(\psi) = \frac{1}{\psi \sqrt{2\pi\sigma_{m,pd}^2}} e^{-\frac{(\ln(\psi) - \mu_{m,pd})^2}{2\sigma_{m,pd}^2}}$$

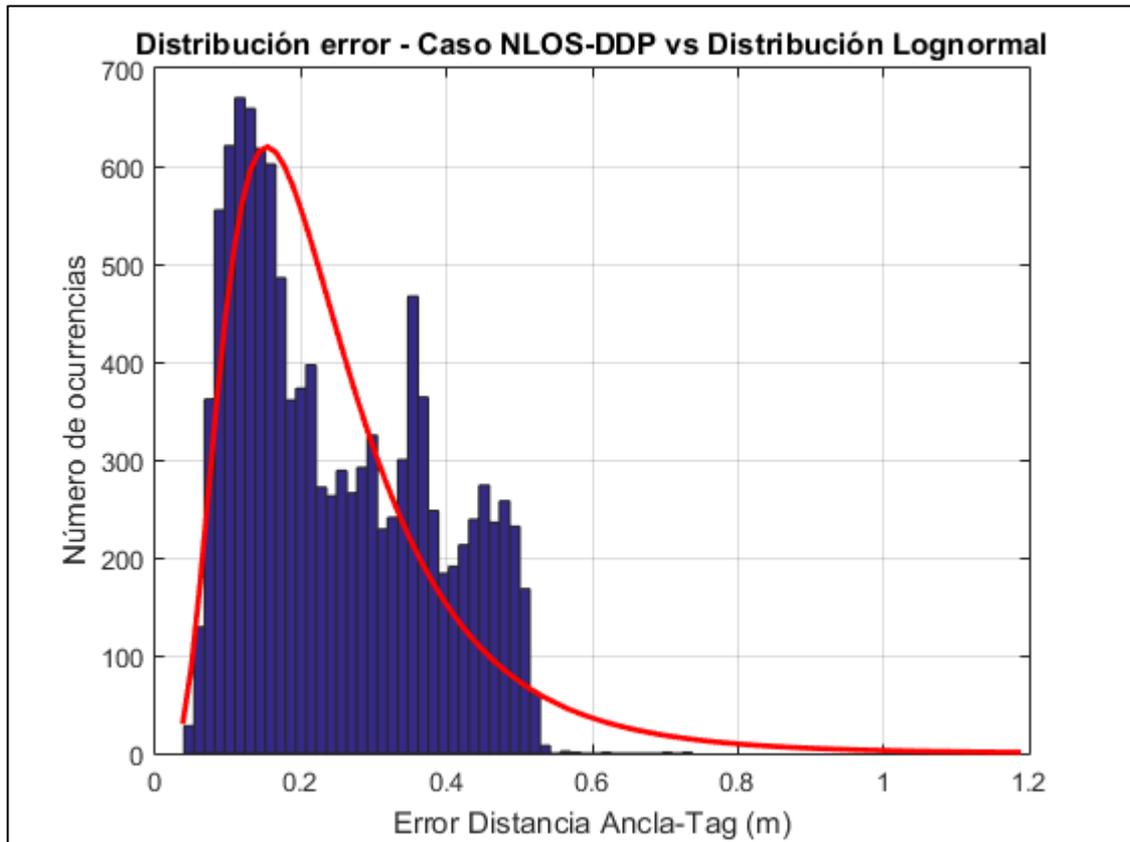


Figura 5-10. Ajuste Distribución del error a Distribución Lognormal – Caso NLOS-DDP

Se observa que la distribución lognormal presenta un mejor ajuste.

Y la comparativa de funciones de probabilidad acumulada:

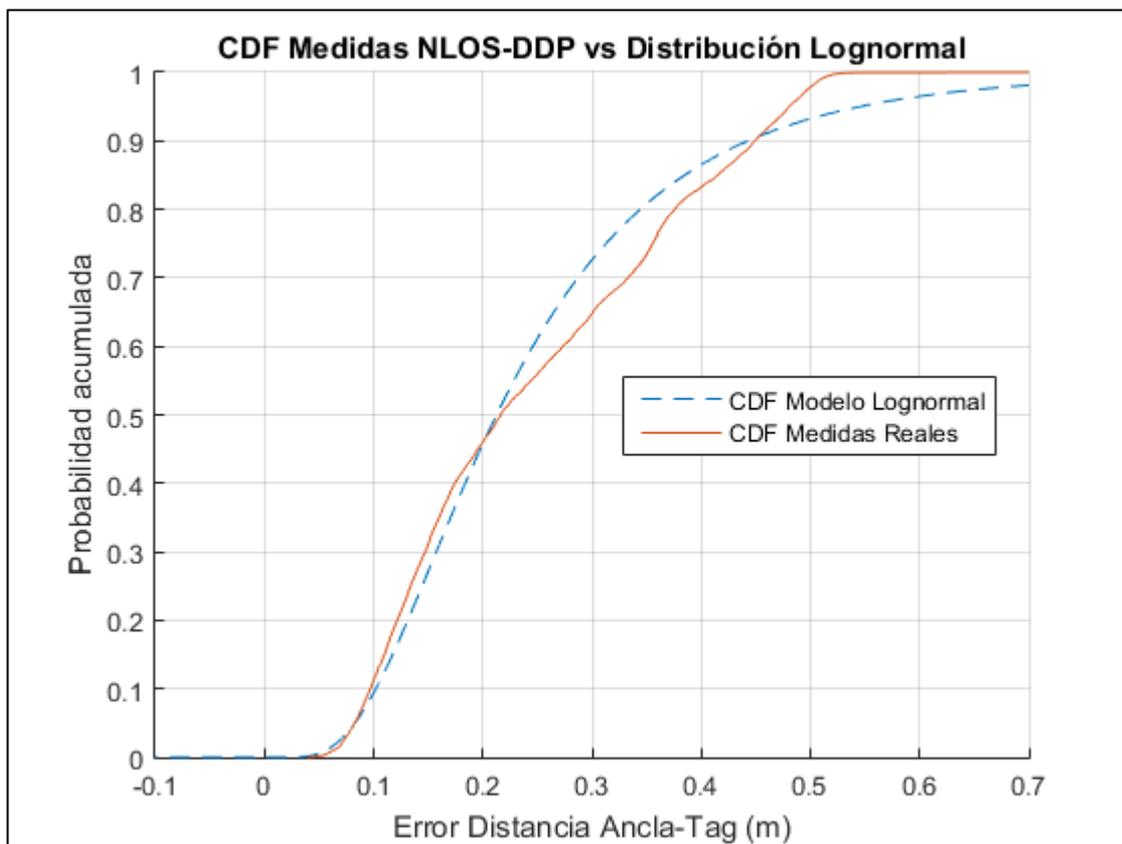


Figura 5-11. CDF Medidas NLOS-DDP vs CDF Distribución Lognormal

Suponiendo el error en la estimación de la distancia (en metros) como una variable aleatoria que sigue una distribución lognormal, para los datos obtenidos en el caso NLOS-DDP los parámetros del modelo se presentan en la Tabla 5-2, siendo $\mu_{m,pd}$, la media del logaritmo del error expresado en metros y $\sigma_{m,pd}$ la desviación típica del logaritmo del error. Además en dicha tabla se representan también la media y varianza del error en metros en la estimación de la distancia.

Tabla 5-2. Parámetros distribución Lognormal y media y varianza con medidas NLOS-DDP

Parámetros	Valor
$\mu_{m,pd}$	-1.5486
$\sigma_{m,pd}$	0.5728
Media	0.2504 m
Varianza	0.0244 m ²

5.2.2.3 Medidas NLOS-UDP

Finalmente seleccionando las medidas de los casos sin visión directa y en los que no se detecta el rayo directo si se calcula el error en la estimación de la distancia para cada una de ellas y se representa su histograma se obtiene la gráfica de la Figura 5-12.

En ella se puede apreciar que, para los casos NLOS-UDP los errores son siempre positivos y además presentan una magnitud mayor que para el resto de casos.

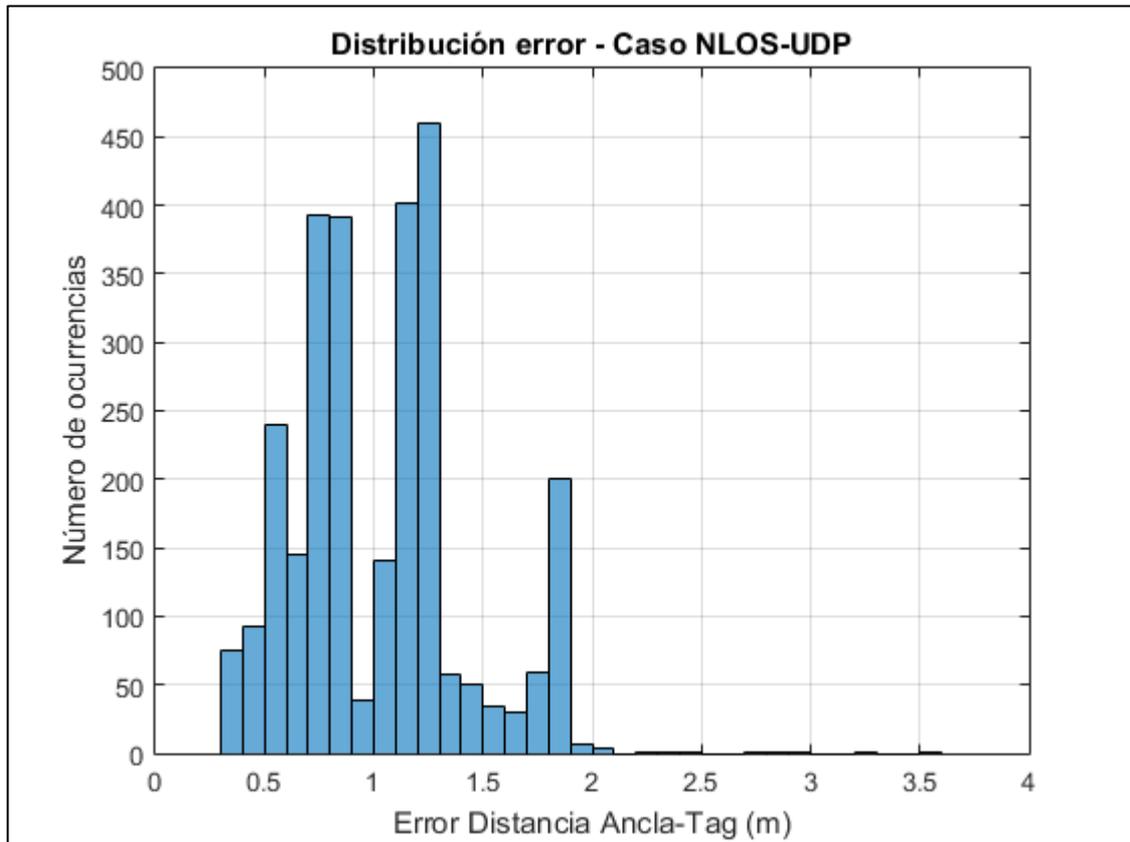


Figura 5-12. Histograma del Error – Caso NLOS-UDP

Se propone como modelo para este caso la distribución lognormal cuya función es la siguiente:

$$f(\psi) = \frac{1}{\psi \sqrt{2\pi\sigma_{m,pd,B}^2}} e^{-\frac{(\ln(\psi) - \mu_{m,pd,B})^2}{2\sigma_{m,pd,B}^2}}$$

Si se compara con el histograma obtenido tras representar el error en las mediciones se observa una cola de valores positivos más típica de una distribución lognormal que de una normal. Aunque el ajuste de las medidas tomadas para casos NLOS UDP a una distribución lognormal es relativo, esta distribución permite incluir los órdenes de magnitud de los errores que se producen, incluyendo el comportamiento de la cola de valores positivos

Para que el histograma presentase una forma más suave y por tanto más fácilmente modelable, serían necesarias muchas más medidas en diferentes situaciones, pudiendo además aparecer una curva diferente en los otros entornos.

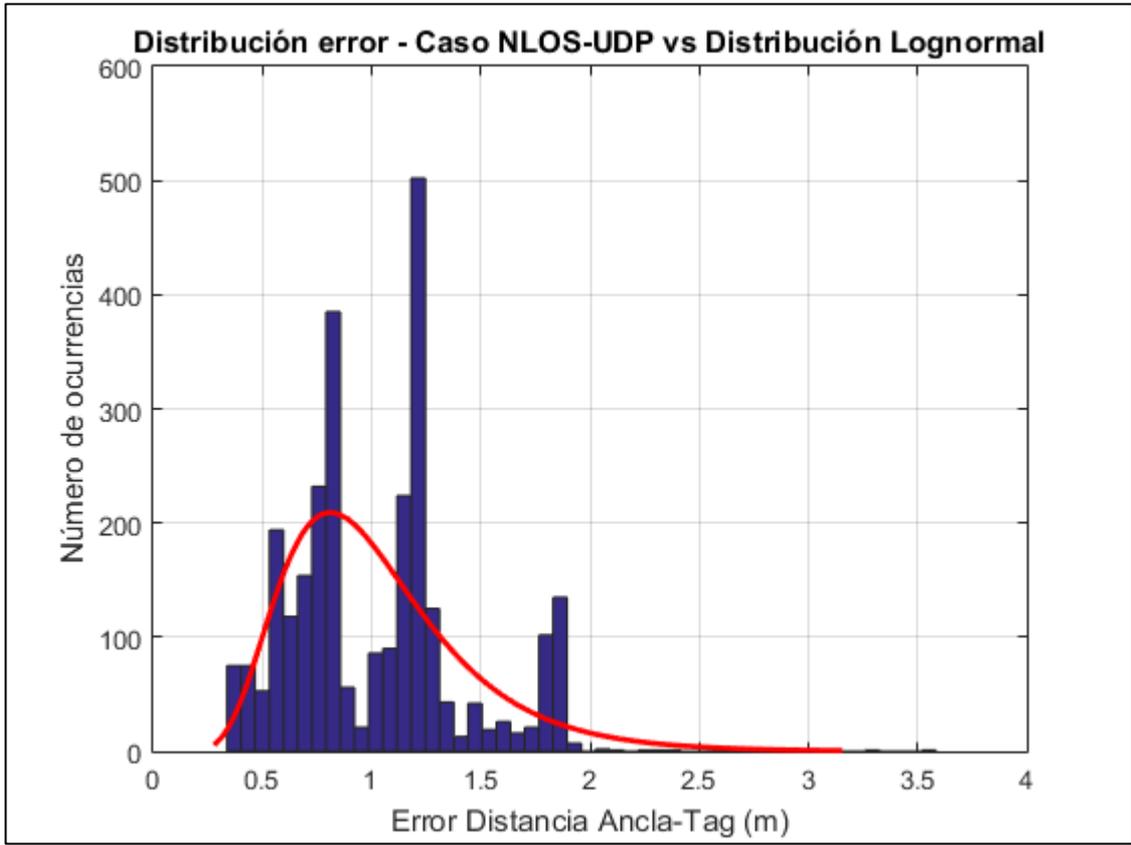


Figura 5-13. Ajuste Distribución del error a Distribución Lognormal – Caso NLOS-UDP

A continuación se representa la comparativa entre las funciones de distribución acumulada del modelo de la distribución lognormal y de las medidas realizadas.

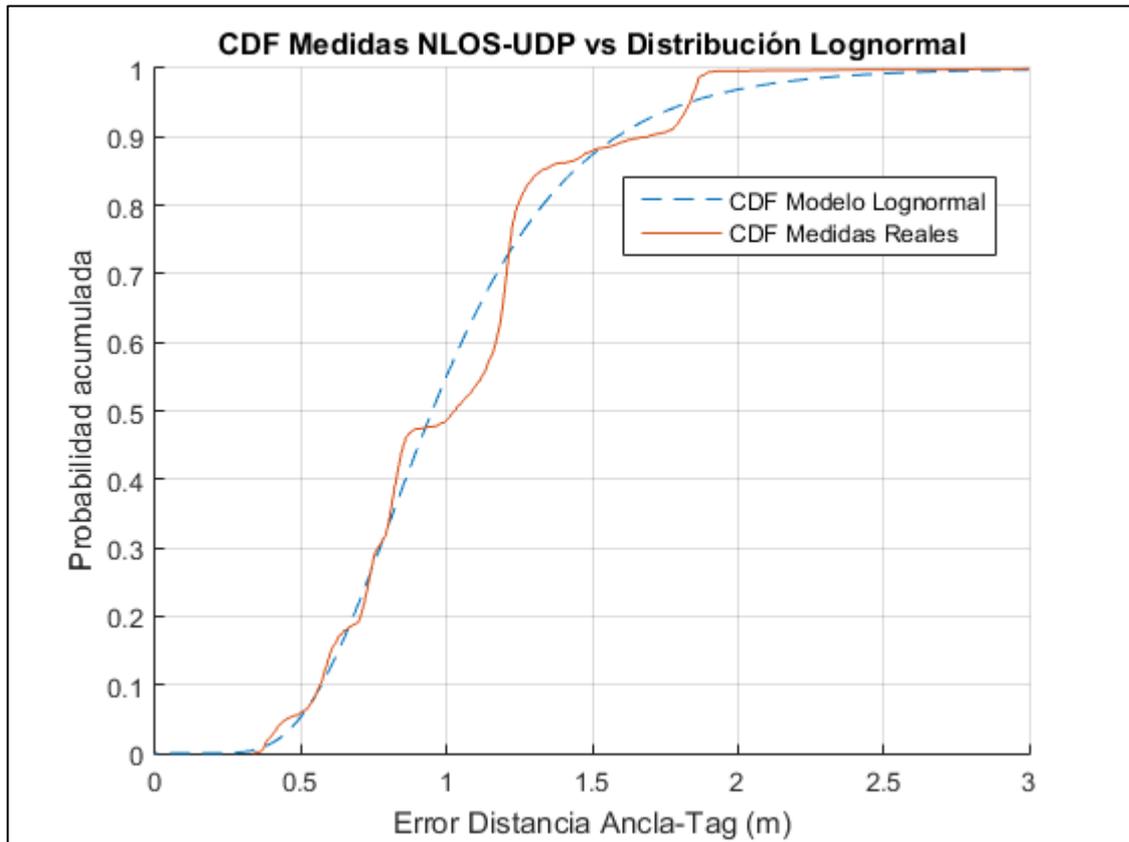


Figura 5-14. CDF Medidas NLOS-UDP vs CDF Distribución Lognormal

Tabla 5-3. Parámetros distribución Lognormal y media y varianza del error con medidas NLOS-UDP

Parámetros	Valor
$\mu_{m,pd,B}$	-0.0509
$\sigma_{m,pd,B}$	0.3986
Media	1.0290 m
Varianza	0.1823 m ²

5.2.2.4 Medidas NLOS (DDP+UDP)

Debido a las similitudes en las funciones de distribución de los errores para casos NLOS-UDP y NLOS-DDP a continuación se procede a estudiar el caso NLOS contemplando tanto los casos donde se detecta el rayo directo como los que no.

La unificación de los casos NLOS DDP y NLOS UDP en un único caso NLOS da como resultado el siguiente histograma:

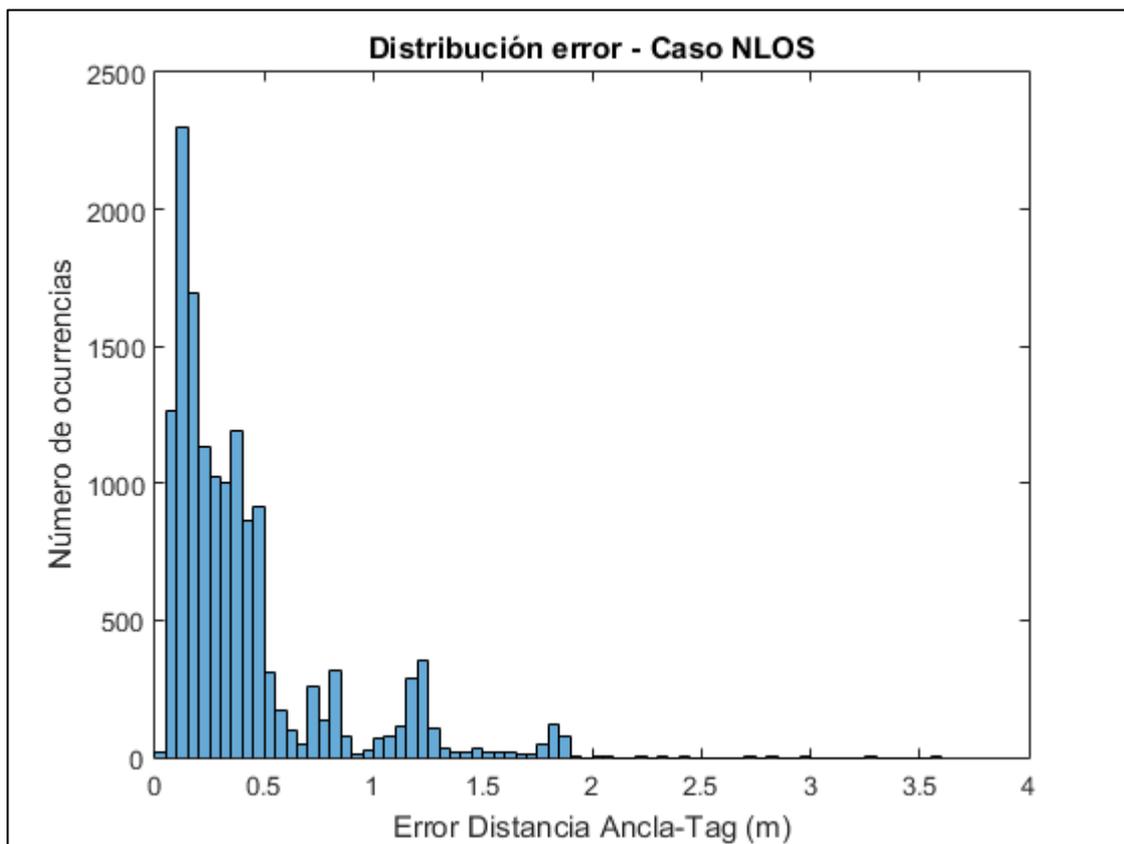


Figura 5-15. Histograma del Error – Caso NLOS

El error por tanto en el caso NLOS puede modelarse como una distribución lognormal independientemente de si se detecta o no el rayo directo.

$$f(\psi) = \frac{1}{\psi \sqrt{2\pi\sigma_{m,pd,B}^2}} e^{-\frac{(\ln(\psi) - \mu_{m,pd,B})^2}{2\sigma_{m,pd,B}^2}}$$

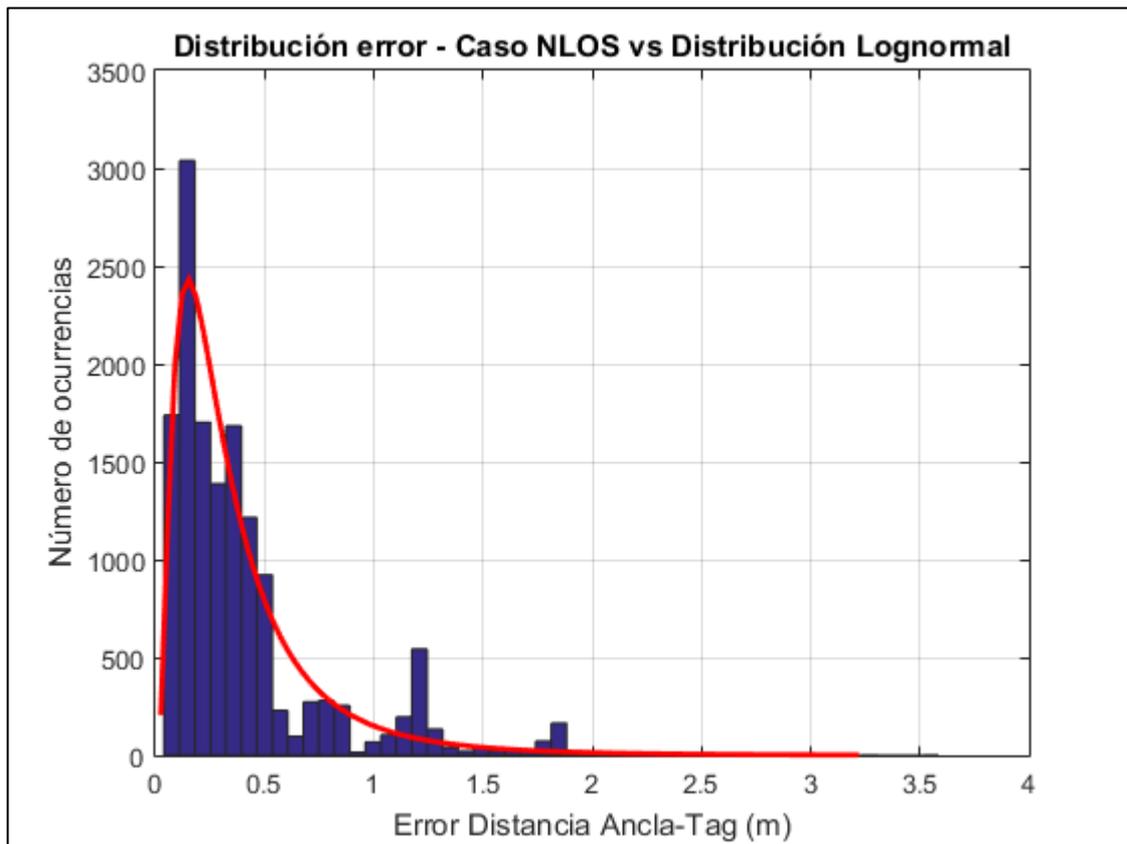


Figura 5-16. Ajuste Distribución del error a Distribución Lognormal – Caso NLOS

Si ahora se representa la comparativa entre las funciones de distribución acumulada del modelo de la distribución lognormal y de las medidas realizadas para todos los casos NLOS, tanto DDP como UDP:

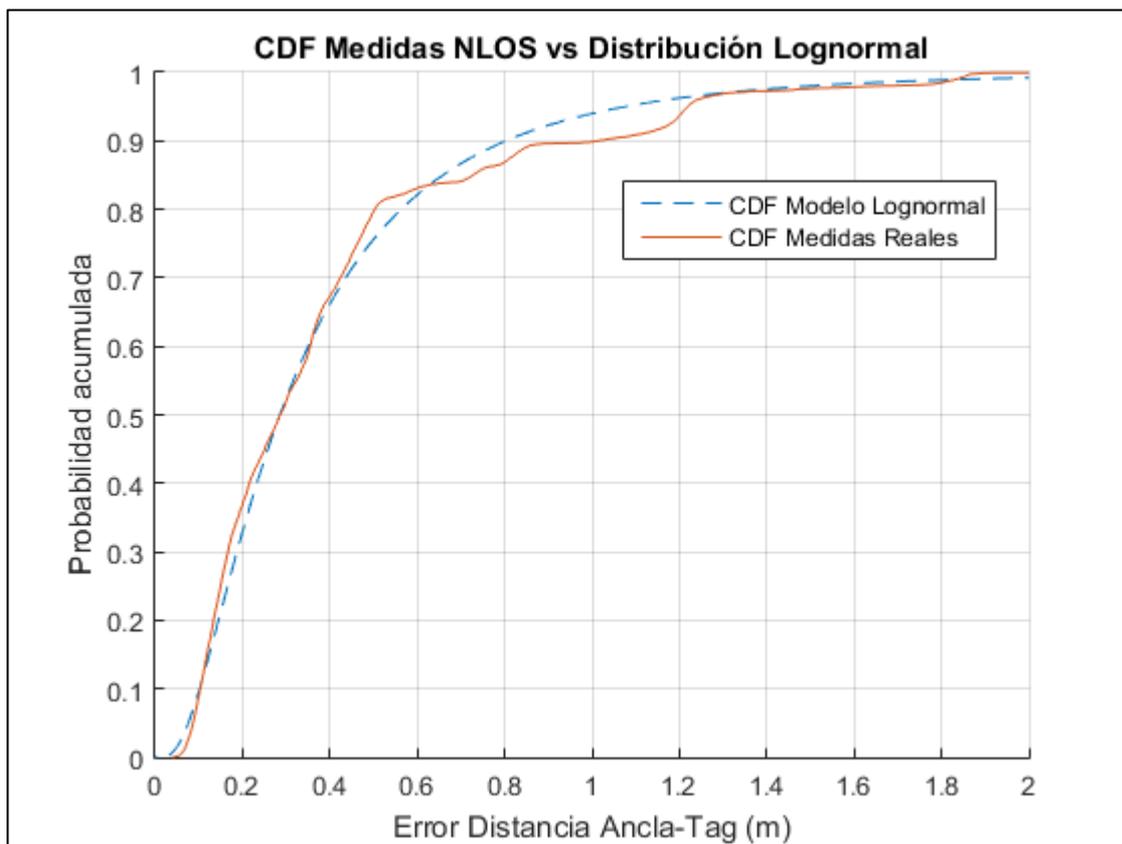


Figura 5-17. CDF Medidas NLOS vs CDF Distribución Lognormal

Tabla 5-4. Parámetros distribución Lognormal y media y varianza del error con medidas NLOS

Parámetros	Valor
$\mu_{m,pd,B}$	-1.2530
$\sigma_{m,pd,B}$	0.8063
Media	0.3954 m
Varianza	0.1431 m ²

Las claras diferencias entre el modelo propuesto por [12] y las medidas obtenidas de manera empírica permiten destacar la gran dependencia que existe en las medidas obtenidas con los equipos empleados y el algoritmo de estimación de TOA. Debido al procesamiento de señal que realiza el equipo usado en este trabajo para optimizar las estimaciones de la distancia, la dependencia entre error y distancia desaparece, al menos para los rangos de distancia presentes en todas las medidas realizadas en el entorno doméstico propuesto. Incluso para casos LOS donde según toda la literatura estudiada el modelo del error más adecuado es una distribución normal se observa que debido a las características del equipo empleado el modelo de error obtenido es diferente.

Sin embargo los modelos de errores basados en estadísticos resultan cruciales a la hora de evaluar el desempeño de los algoritmos de localización en condiciones realistas, particularizando para diversos entornos. La alternativa sería realizar medidas in situ en cada uno de los entornos en los que se desea evaluar el algoritmo, con el objetivo además de particularizarlo para este entorno concreto, lo cual tendría un coste enorme.

Por otra parte es necesario conocer las limitaciones de estos modelos pues nunca podrán ser un reflejo

completamente veraz de la realidad.

En este trabajo se propone un modelo para un entorno doméstico clásico pero en la práctica para la evaluación de los algoritmos de estimación de distancia es posible usar diversos modelos que cubran casos diferentes (entorno doméstico, industrial, oficinas...) obtenidos a partir de medidas en entornos similares.

Como posible línea de mejora se propone realizar medidas en otros entornos similares al de este trabajo (doméstico) y agregarlas a las ya existentes para así refinar los modelos ya propuestos.

En este capítulo se realizarán mediciones cubriendo la totalidad del domicilio a estudiar con el objetivo de generar un mapa de medias y varianzas del error en función de la posición respecto al Ancla.

Con ello se pretende observar la influencia de los obstáculos y el multitrayecto en el error así como posibles zonas de sombra [16] existentes en la casa debida a estos mismos obstáculos.

6.1 Condiciones base

A diferencia de las mediciones llevadas a cabo en los apartados anteriores, en este segmento se dejará fija el Ancla en un punto de la casa, concretamente la puerta de entrada, y se desplazará el Tag a lo largo del domicilio formando una rejilla de medidas (siempre que no haya obstáculos que lo impidan) que cubra todos los rincones de la casa.

Conociendo la distancia real del Ancla (fija) al Tag en cada una de las posiciones de la rejilla se puede calcular el error en cada una de éstas. En cada posición se realizan alrededor de 400 estimaciones diferentes de la distancia entre Ancla y Tag. Posteriormente se determinará la media y la varianza del error en la estimación en cada posición para cada una de las iteraciones calculadas en una misma posición.

El plano de la casa a estudiar, la posición fija del Ancla y los diversos puntos donde colocar el Tag para realizar la rejilla se representan en la siguiente imagen:



Figura 6-1. Plano de casa y posiciones de Ancla y Tag. Ejes medidos en nº de losetas.

6.1.1 Mapa de Medias

A continuación se presenta sobre el plano de la casa estudiada los valores de la media del error en la estimación de la distancia calculado para cada una de las posiciones.

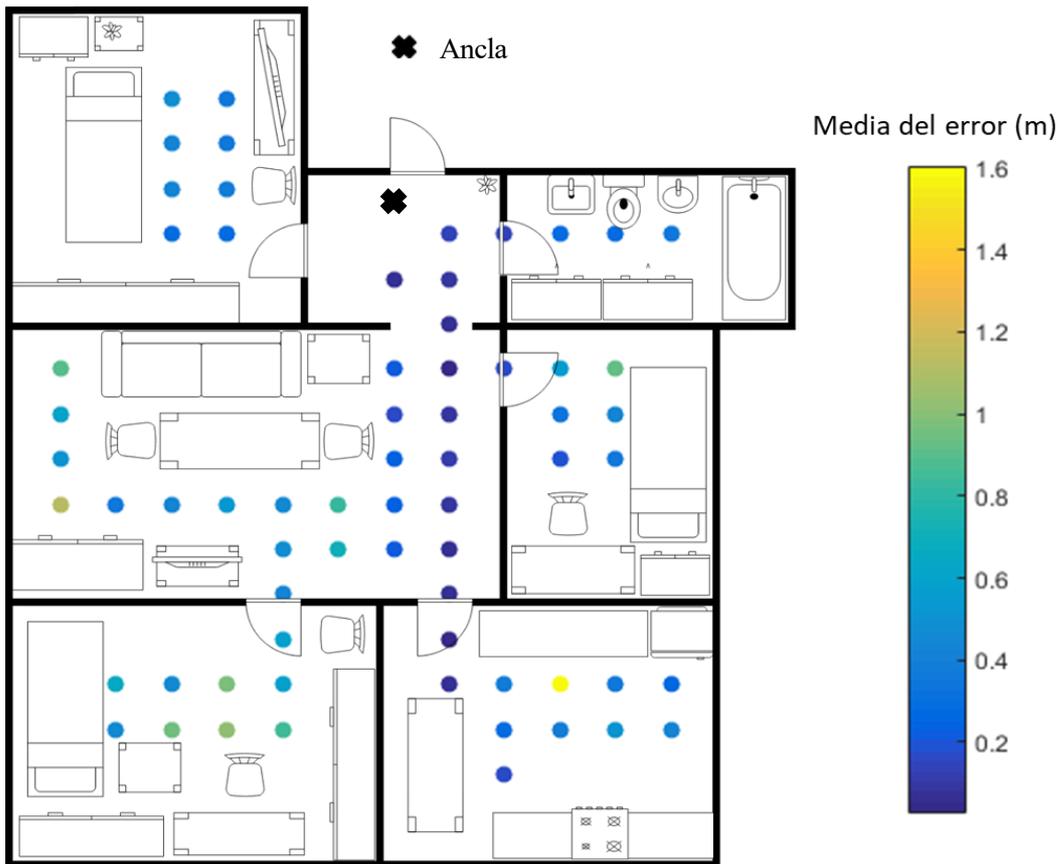


Figura 6-2. Distribución de media del error sobre plano de casa

Como puede observarse, en los puntos donde existe visión directa, estando el camino libre de obstáculos el error es bajo. Dicho error en la estimación aumenta a medida que interponemos obstáculos entre Ancla y Tag, debido al retraso de propagación, existiendo zonas en las que el rayo directo se ve bloqueado y se estima la distancia de manera errónea mediante otra de las componentes del multirrayecto. Estas últimas son las llamadas zonas de sombra, puesto que no se obtiene una estimación fiable de la posición del objeto.

Debido a la optimización de los equipos y el tamaño de la casa, la influencia de la distancia entre Ancla y Tag no es apreciable.

Desde la posición en la se encuentra el Ancla, para la casa estudiada, existen pocas posiciones donde se produzca bloqueo del rayo directo, siendo estas zonas donde el error en la estimación es mayor y apreciándose claramente en el mapa.

Para puntos en los que existe visión directa la estimación de la distancia presenta una precisión del orden de 10 centímetros, aumentando progresivamente a medida que se interponen obstáculos apareciendo en las zonas de sombra errores de entre 1 y 1.5 metros.

En general la estimación de medidas en toda la casa es bastante buena exceptuando la zona de sombras. Sin embargo lo que determinará finalmente la calidad de estas estimaciones es la aplicación que hará uso de ellas, pues en etiquetado de objetos pequeños en entornos industriales u hospitalarios es necesaria una precisión del orden de centímetros, permitiéndose errores algo mayores para la localización de personas.

6.1.2 Mapa de Varianzas

Finalmente sobre el plano de la casa se representa ahora la distribución de la varianza del error en la estimación para cada una de las posiciones.

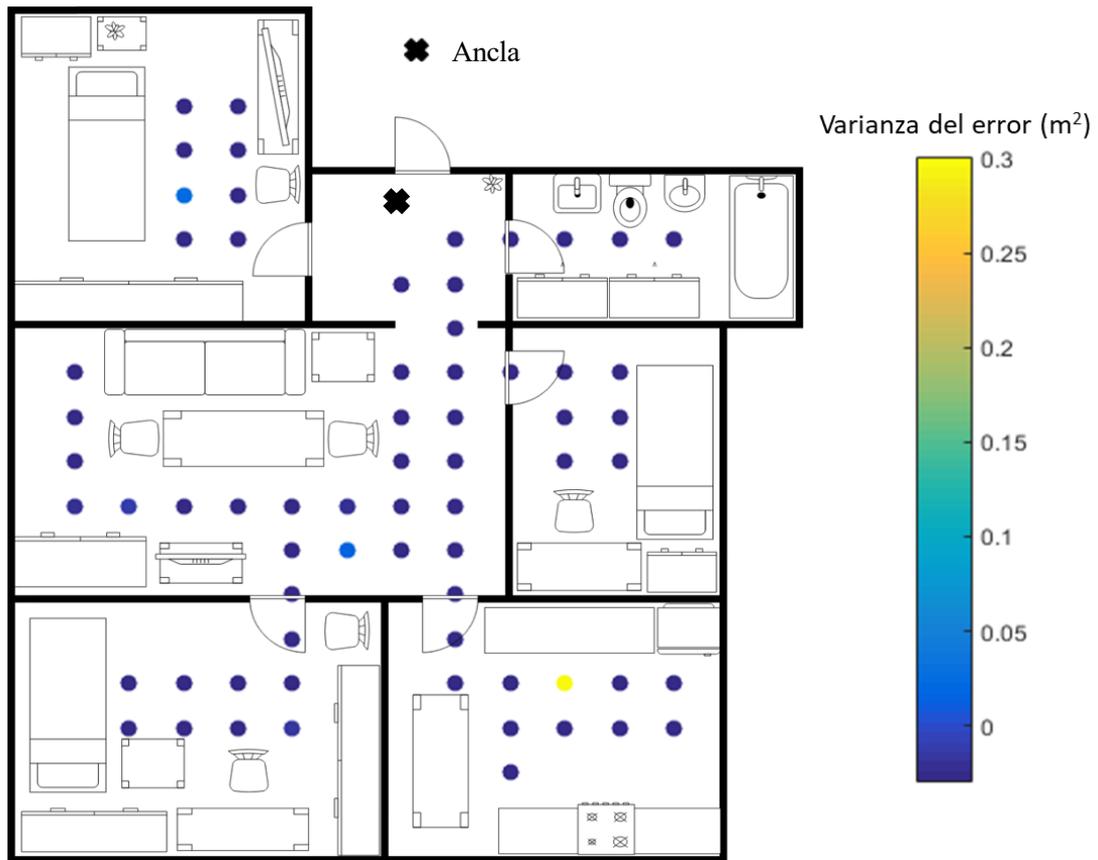


Figura 6-3. Distribución de varianza del error sobre plano de casa

La varianza del error parece ser un parámetro que se ve poco afectado por la posición en la que se encuentran Ancla y Tag en los casos estudiados, siendo destacable una mayor varianza en la zona que presentaba una mayor media de error, siendo esta por tanto la situación más desfavorable de la casa para la localización. Esta posición se incluye en los casos sin visión directa y sin detección del rayo directo (NLOS-UDP), de ahí el alto valor del error y su elevada varianza.

7 CONCLUSIONES

A pesar de ser una tecnología relativamente antigua, cada día surgen nuevos usos para Ultra Wide Band. Ya sea elaborando sistemas de comunicaciones con altas tasas de transferencia de datos o sirviendo de base para sistemas de localización en interiores de gran precisión, Ultra Wide Band parece destinado a mejorar y seguir usándose en el futuro, gracias sobre todo a su inclusión en el mercado civil desde el militar, aunque a día de hoy es necesario solucionar problemas de alcance, debidos a las propias características de UWB.

La localización en interiores es cada vez más necesaria y van surgiendo cada día nuevas ideas para su implementación. UWB gracias a su inmunidad frente al multitrayecto, típico de entornos interiores, a resultar indetectable frente a otras señales, lo que le permite convivir con múltiples señales en entornos domésticos, y a tener el potencial para obtener medidas de una altísima precisión, del orden de centímetros, resulta una apuesta segura en este campo. Esta precisión puede conseguirse mediante la mitigación y corrección de efectos como los bloqueos presentes en los casos NLOS; a la inclusión de algoritmos de mejora en la estimación de medidas (como el “Asymmetrical double-sided two-way ranging” que emplean los equipos usados en este proyecto) o al uso de un mayor número de Anclas.

A día de hoy existen múltiples kits con equipos UWB que, por un bajo coste, permiten estudiar las fortalezas y debilidades de esta tecnología, e integrarla de variadas formas. Uno de estos kits es el desarrollado por la empresa Decawave, usado en este trabajo, el llamado EVK1000.

Las medidas y estudios realizados en el trabajo han permitido proponer un modelo del comportamiento del error ante estimaciones de distancia en interiores para entornos domésticos en diversas situaciones de visibilidad entre emisor y receptor. Con dicho modelo se pretende disociar la tediosa toma de medidas reales de su posterior estudio y análisis, elaboración de algoritmos de estimación de distancia y una posterior evaluación de éstos. Gracias a los modelos teóricos como los propuestos en trabajos como éste se pueden producir medidas artificiales que incluyan el comportamiento realista de los errores en la estimación para la evaluación de algoritmos de localización.

Sin embargo durante este trabajo se ha observado la enorme dependencia del modelo propuesto con el equipo empleado. El equipo del kit, para maximizar la precisión de la estimación realiza un procesado de señal que diferencia el modelo obtenido mediante medidas reales de los propuestos en la literatura estudiada. Además, debido al alcance de este trabajo se han realizado medidas en un único entorno, un domicilio con diversas habitaciones.

Los modelos propuestos en este trabajo se ajustan a un entorno doméstico, si bien es normal a la hora de evaluar los algoritmos de localización emplear diversos modelos, asociados cada uno de ellos a entornos diferentes: domésticos (este trabajo), industriales, oficinas... Cada uno de ellos ajustados a las idiosincrasias propias del entorno donde se tomaron las medidas y donde se pretende evaluar el algoritmo. La alternativa a esto sería realizar medidas reales en todos y cada uno de los entornos donde se desease evaluar el algoritmo, siendo esto inviable.

Como posible línea futura de mejora se podría aumentar el número de medidas en entornos domésticos para así suavizar las curvas obtenidas y hacer más independiente al modelo propuesto del entorno doméstico concreto usado en este trabajo.

ANEXO A. BATERÍA DE MEDIDAS CAPÍTULO 5

Fichero de Medidas	Distancia Ancla-Tag (m)	Número de medidas por posición	Tiempo de medidas (min)	LOS/NLOS-DDP/NLOS-UDP
Medida1.log	5.7500	~350	5	LOS
Medida2.log	4.6000	~350	5	LOS
Medida3.log	3.4500	~350	5	LOS
Medida4.log	4.0250	~350	5	LOS
Medida5.log	2.8750	~350	5	LOS
Medida6.log	5.1750	~350	5	NLOS-DDP
Medida7.log	5.7500	~350	5	NLOS-DDP
Medida8.log	4.6000	~350	5	NLOS-DDP
Medida9.log	3.4500	~350	5	NLOS-DDP
Medida10.log	3.6366	~350	5	NLOS-DDP
Medida13.log	7.3636	~350	5	NLOS-UDP
Medida14.log	7.8208	~350	5	NLOS-UDP
Medida15.log	7.7358	~350	5	NLOS-UDP
Medida16.log	6.7056	~350	5	NLOS-UDP
Medida17.log	5.7500	~350	5	NLOS-UDP
Medida18.log	3.4500	~350	5	LOS
Medida19.log	4.6000	~350	5	LOS
Medida20.log	5.1750	~350	5	LOS
Medida21.log	2.8750	~350	5	LOS
Medida22.log	4.0659	~350	5	LOS
Medida23.log	8.9449	~350	5	NLOS-UDP
Medida24.log	6.3511	~350	5	NLOS-UDP
Medida25.log	6.1123	~350	5	NLOS-UDP
Medida26.log	5.6631	~350	5	NLOS-UDP

Medida27.log	6.7056	~350	5	NLOS-UDP
Medida30.log	3.6366	~350	5	NLOS-DDP
Medida31.log	2.9319	~350	5	NLOS-DDP
Medida32.log	4.0250	~350	5	NLOS-DDP
Medida33.log	4.6358	~350	5	NLOS-DDP
Medida35.log	7.4570	~350	5	LOS
Medida36.log	2.8750	~350	5	NLOS-DDP
Medida37.log	3.4500	~350	5	NLOS-DDP
Medida38.log	3.4500	~350	5	NLOS-DDP
Medida39.log	5.1750	~350	5	NLOS-DDP
Medida40.log	4.0250	~350	5	NLOS-DDP
Medida41.log	4.0250	~350	5	NLOS-DDP
Medida42.log	4.0250	~350	5	NLOS-DDP
Medida43.log	2.8750	~350	5	NLOS-DDP
Medida44.log	2.8750	~350	5	NLOS-DDP
Medida45.log	6.9000	~350	5	NLOS-DDP
Medida46.log	6.9000	~350	5	NLOS-DDP
Medida47.log	6.3250	~350	5	NLOS-DDP
Medida48.log	6.3250	~350	5	NLOS-DDP
Medida49.log	5.7500	~350	5	NLOS-DDP
Medida50.log	5.7500	~350	5	NLOS-DDP
Medida51.log	5.1750	~350	5	NLOS-DDP
Medida52.log	5.1750	~350	5	NLOS-DDP
Medida53.log	4.6000	~350	5	NLOS-DDP
Medida54.log	4.6000	~350	5	NLOS-DDP
Medida55.log	4.0250	~350	5	NLOS-DDP
Medida56.log	4.0250	~350	5	NLOS-DDP
Medida57.log	3.4500	~350	5	NLOS-DDP

Medida58.log	3.4500	~350	5	NLOS-DDP
Medida59.log	2.8750	~350	5	NLOS-DDP
Medida60.log	2.8750	~350	5	NLOS-DDP

ANEXO B. BATERÍA DE MEDIDAS CAPÍTULO 6

Fichero de Medidas	Distancia Ancla-Tag (m)	Número de medidas por posición	Coordenadas (Y,X) (Nº losetas)	Media del error(m)	Varianza del error (m ²)
Mapa1.log	1.1500	~700	(2,0)	0,0958	0,0001869
Mapa2.log	2.3000	~700	(4,0)	0,2598	0,0001937
Mapa3.log	3.4500	~700	(6,0)	0,2679	0,0002774
Mapa4.log	4.6000	~700	(8,0)	0,2616	0,0002060
Mapa5.log	1.2800	~700	(2,1)	0,1265	0,0003629
Mapa6.log	2.3708	~700	(4,1)	0,0599	0,0002949
Mapa7.log	3.4976	~700	(6,1)	0,1483	0,0001870
Mapa8.log	4.6358	~700	(8,1)	0,1095	0,0002037
Mapa9.log	4.0659	~700	(7,-1)	0,8937	0,0076256
Mapa10.log	4.1861	~700	(7,-2)	0,4990	0,0003465
Mapa11.log	4.3791	~700	(7,-3)	0,5823	0,0005371
Mapa12.log	4.6358	~700	(7,-4)	0,4893	0,0004507
Mapa13.log	4.9463	~700	(7,-5)	0,4175	0,0177290
Mapa14.log	5.3012	~700	(7,-6)	1,2050	0,0057931
Mapa15.log	4.8790	~700	(6,-6)	0,5685	0,0003268
Mapa16.log	4.4909	~700	(5,-6)	0,6671	0,0003865
Mapa17.log	4.1464	~700	(4,-6)	0,9813	0,0030645
Mapa18.log	5.7787	~700	(10,1)	0,0671	0,0001455
Mapa19.log	6.3511	~700	(11,1)	0,0950	0,0002303
Mapa20.log	6.4287	~700	(11,2)	0,4372	0,0003788
Mapa21.log	6.5560	~700	(11,3)	1,7082	0,3176141
Mapa22.log	6.7302	~700	(11,4)	0,4096	0,0005661
Mapa23.log	6.9478	~700	(11,5)	0,3074	0,0006230
Mapa24.log	7.4750	~700	(12,5)	0,4815	0,0009857

Mapa25.log	7.2732	~700	(12,4)	0,5693	0,0004614
Mapa26.log	7.1124	~700	(12,3)	0,4437	0,0013665
Mapa27.log	6.9952	~700	(12,2)	0,3266	0,0004375
Mapa28.log	7.5629	~700	(13,2)	0,1996	0,0002724
Mapa29.log	4.6358	~700	(8,-1)	0,7705	0,0438811
Mapa30.log	4.7416	~700	(8,-2)	0,5267	0,0002745
Mapa31.log	2.8750	~700	(5,0)	0,2121	0,0002493
Mapa32.log	4.0250	~700	(7,0)	0,2763	0,0001854
Mapa33.log	1.8183	~700	(3,1)	0,1006	0,0001632
Mapa34.log	2.9319	~700	(5,1)	0,1226	0,0002418
Mapa35.log	4.0659	~700	(7,1)	0,1216	0,0001898
Mapa36.log	5.2068	~700	(9,1)	0,0995	0,0003189
Mapa37.log	5.3012	~700	(9,-2)	0,4922	0,0005170
Mapa38.log	5.8639	~700	(10,-2)	0,6424	0,0002488
Mapa39.log	6.4287	~700	(11,-2)	0,6514	0,0008406
Mapa40.log	6.9952	~700	(12,-2)	0,9178	0,0148469
Mapa41.log	7.1124	~700	(12,-3)	1,0958	0,0037111
Mapa42.log	7.2732	~700	(12,-4)	1,0286	0,0007773
Mapa43.log	7.4750	~700	(12,-5)	0,5135	0,0004234
Mapa44.log	6.9478	~700	(11,-5)	0,7174	0,0005532
Mapa45.log	6.7302	~700	(11,-4)	0,5005	0,0003485
Mapa46.log	6.5560	~700	(11,-3)	1,0478	0,0008364
Mapa47.log	2.5715	~700	(4,2)	0,1898	0,0002762
Mapa48.log	2.8750	~700	(4,3)	0,6211	0,0011391
Mapa49.log	3.2527	~700	(4,4)	1,0117	0,0004932
Mapa50.log	3.6818	~700	(5,4)	0,4886	0,0004776
Mapa51.log	4.1464	~700	(6,4)	0,3969	0,0023630
Mapa52.log	3.8572	~700	(6,3)	0,2320	0,0002132

Mapa53.log	3.3528	~700	(5,3)	0,3779	0,0007915
Mapa54.log	0.8132	~700	(1,1)	0,1860	0,0002385
Mapa55.log	1.2857	~700	(1,2)	0,1874	0,0003204
Mapa56.log	1.8183	~700	(1,3)	0,3274	0,0001074
Mapa57.log	2.3708	~700	(1,4)	0,3311	0,0003060
Mapa58.log	2.9319	~700	(1,5)	0,4091	0,0001694
Mapa59.log	1.8183	~700	(1,-3)	0,3299	0,0001720
Mapa60.log	1.7250	~700	(0,-3)	0,4295	0,0001704
Mapa61.log	1.8183	~700	(-1,-3)	0,4007	0,0002977
Mapa62.log	2.0732	~700	(-2,-3)	0,4084	0,0002073
Mapa63.log	2.5715	~700	(-2,-4)	0,5413	0,0001449
Mapa64.log	2.3708	~700	(-1,-4)	0,4914	0,0002615
Mapa65.log	2.3000	~700	(0,-4)	0,4943	0,0509896
Mapa66.log	2.3708	~700	(1,-4)	0,3377	0,0002046

ANEXO C. CÓDIGOS MATLAB

ModeloLOS.m

```
%% Leemos los ficheros de datos

file= {'../DatosCasa/Medida1.log'; '../DatosCasa/Medida2.log';
'../DatosCasa/Medida3.log'; '../DatosCasa/Medida4.log';
'../DatosCasa/Medida5.log'; '../DatosCasa/Medida18.log';
'../DatosCasa/Medida19.log'; '../DatosCasa/Medida20.log';
'../DatosCasa/Medida21.log'; '../DatosCasa/Medida22.log';
'../DatosCasa/Medida35.log'};
vDistReal = DistanciaAncla(0.575,[10 8 6 7 5 6 8 9 4 7 13],[0 0 0 0 0 0 0 0 3
1 0]);
vError = [];

for ii=1:size(file,1)

fid = fopen(file{ii}, 'rt'); % opción rt para abrir en modo texto
text = textscan(fid,'%s','Delimiter',' ','endofline','');
text = text{1}{1};

fid = fclose(fid);

% Obtenemos cualquier numero de digitos.cualquier numero de digitos despues
% de la palabra Dist
tk = regexp(text, 'Dist:\s(\d*+\.?\d*)','tokens');
Dist=str2double([tk{:}]);

% Calculamos el error en la medida de la distancia
Error=(Dist-vDistReal(ii));

% Se incluye en el vector de errores
vError = [vError Error];

end

mErrorDist=mean(vError);
varErrorDist=var(vError);
[mu, sigma]=normfit(vError);

%% PDF y CDF a partir de datos

% Se pinta el histograma

h = histogram(vError),title('Distribución error - Caso LOS'),xlabel('Error
Distancia Ancla-Tag (m)'),ylabel('Número de ocurrencias');
grid on

% Se ajusta a una distribución normal

h = histfit(vError),title('Distribución error - Caso LOS vs Distribución
Normal'),xlabel('Error Distancia Ancla-Tag (m)'),ylabel('Número de
ocurrencias'), grid on;
```

```

% pintamos la cdf de la distribucion

x=linspace(-1,1,100000);
pd = makedist('Normal','mu',mu,'sigma',sigma);
y = cdf(pd,x);
figure
hold on
plot(x,y,'--')

% Pintamos la cdf de los datos
cdfplot(vError)
legend('CDF Modelo Normal','CDF Medidas Reales','Location','best')
title('CDF Medidas LOS vs Distribución Normal'),xlabel('Error Distancia
Ancla-Tag (m)'),ylabel('Probabilidad acumulada')
axis([-0.3 0.3 0 1 ])
hold off

%% Ahora se pinta una distribución shifted lognormal

%Calculamos el mínimo para hacer un shift de la función
min(vError);
vErrorNoNeg=vError-min(vError);
% Eliminamos el valor 0
vErrorNoZero = vErrorNoNeg(vErrorNoNeg > 0);
estad = lognfit(vErrorNoZero);
muLog=estad(1);
sigmaLog=estad(2);

x = 0:0.001:max(vErrorNoZero);
y = lognpdf(x,muLog,sigmaLog);
plot(x+min(vError),y, 'color','red','LineWidth',2)
hold on
h = histogram(vErrorNoNeg+min(vError), 'Normalization','pdf', 'FaceColor',
'blue'),title('Distribución error - Caso LOS vs Distribución
Lognormal'),xlabel('Error Distancia Ancla-Tag (m)'),ylabel('Número de
ocurrencias (Normalizadas)'), grid on;
hold off

```

ModeloNLOSDDP.m

```

%% Leemos los ficheros de datos

file= {'../DatosCasa/Medida6.log'; '../DatosCasa/Medida7.log';
'../DatosCasa/Medida8.log'; '../DatosCasa/Medida9.log';
'../DatosCasa/Medida10.log'; '../DatosCasa/Medida30.log';
'../DatosCasa/Medida31.log'; '../DatosCasa/Medida32.log';
'../DatosCasa/Medida33.log'; '../DatosCasa/Medida36.log';
'../DatosCasa/Medida37.log'; '../DatosCasa/Medida38.log';
'../DatosCasa/Medida39.log'; '../DatosCasa/Medida40.log';
'../DatosCasa/Medida41.log'; '../DatosCasa/Medida42.log';
'../DatosCasa/Medida43.log'; '../DatosCasa/Medida44.log';
'../DatosCasa/Medida45.log'; '../DatosCasa/Medida46.log';
'../DatosCasa/Medida47.log'; '../DatosCasa/Medida48.log';
'../DatosCasa/Medida49.log'; '../DatosCasa/Medida50.log';
'../DatosCasa/Medida51.log'; '../DatosCasa/Medida52.log';
'../DatosCasa/Medida53.log'; '../DatosCasa/Medida54.log';

```

```

'../DatosCasa/Medida55.log'; '../DatosCasa/Medida56.log';
'../DatosCasa/Medida57.log'; '../DatosCasa/Medida58.log';
'../DatosCasa/Medida59.log'; '../DatosCasa/Medida60.log'};
vDistReal = DistanciaAncla(0.575,[9 10 8 6 6 6 5 7 7 4 6 6 9 7 7 7 5 5 12 12
11 11 10 10 9 9 8 8 7 7 6 6 5 5],[0 0 0 0 2 2 1 0 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]);
vError = [];

for ii=1:size(file,1)

fid = fopen(file{ii}, 'rt'); % opción rt para abrir en modo texto
text = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', ',', 'endofline', '');
text = text{1}{1};

fid = fclose(fid);

% Obtenemos cualquier numero de digitos.cualquier numero de digitos despues
% de la palabra Dist
tk = regexp(text, 'Dist:\s(\d*+\.?\d*)', 'tokens');
Dist=str2double([tk{:}]);

% Calculamos el error normalizado en la medida de la distancia
Error=(Dist-vDistReal(ii));

% Se incluye en el vector de errores
vError = [vError Error];

end

mErrorDist=mean(vError);
varErrorDist=var(vError);
[mu, sigma]=normfit(vError);

% Calculo de media y varianza de distribución lognormal
% x = 0:0.001:max(vError);
% estad=lognfit(vError);
%
% y = lognpdf(x,estad(1),estad(2));
% plot(x,y)
%
% exp(estad(1)+(estad(2)^2)/2)

%% PDF y CDF a partir de datos

% Se pinta el histograma
h = histogram(vError),title('Distribución error - Caso NLOS-
DDP'),xlabel('Error Distancia Ancla-Tag (m)'),ylabel('Número de
ocurrencias');
grid on

% Se ajusta a una distribución normal
h = histfit(vError),title('Distribución error - Caso NLOS-DDP vs Distribución
Normal'),xlabel('Error Distancia Ancla-Tag (m)'),ylabel('Número de
ocurrencias'), grid on;

% Se ajusta a una distribución lognormal
h = histfit(vError,50,'lognormal'),title('Distribución error - Caso NLOS-DDP
vs Distribución Lognormal'),xlabel('Error Distancia Ancla-Tag
(m)'),ylabel('Número de ocurrencias'), grid on;

```

```

% pintamos la cdf de la distribucion normal
x=linspace(-1,1,100000);
pd = makedist('Normal','mu',mu,'sigma',sigma);
y = cdf(pd,x);
figure
hold on
plot(x,y,'--')

% Pintamos la cdf de los datos
cdfplot(vError)
legend('CDF Modelo Normal','CDF Medidas Reales','Location','best')
title('CDF Medidas NLOS-DDP vs Distribución Normal'),xlabel('Error Distancia
Ancla-Tag (m)'),ylabel('Probabilidad acumulada')
axis([-0.1 0.7 0 1 ])
hold off

% pintamos la cdf de la distribucion lognormal
x=linspace(-1,1,100000);
pd = fitdist(vError,'Lognormal');
y = cdf(pd,x);
figure
hold on
plot(x,y,'--')

% Pintamos la cdf de los datos
cdfplot(vError)
legend('CDF Modelo Lognormal','CDF Medidas Reales','Location','best')
title('CDF Medidas NLOS-DDP vs Distribución Lognormal'),xlabel('Error
Distancia Ancla-Tag (m)'),ylabel('Probabilidad acumulada')
axis([-0.1 0.7 0 1 ])
hold off

```

ModeloNLOSUDP.m

```

%% Leemos los ficheros de datos

file= {'../DatosCasa/Medida13.log'; '../DatosCasa/Medida14.log';
'../DatosCasa/Medida15.log'; '../DatosCasa/Medida16.log';
'../DatosCasa/Medida17.log'; '../DatosCasa/Medida23.log';
'../DatosCasa/Medida24.log'; '../DatosCasa/Medida25.log';
'../DatosCasa/Medida26.log'; '../DatosCasa/Medida27.log'};
vDistReal = DistanciaAncla(0.575,[10 11 10 10 10 11 11 7 4 10],[8 8 9 6 0 11
1 8 9 6]);
vError = [];

for ii=1:size(file,1)

fid = fopen(file{ii}, 'rt'); % opción rt para abrir en modo texto
text = textscan(fid,'%s','Delimiter',' ','endofline','');
text = text{1}{1};

fid = fclose(fid);

% Obtenemos cualquier numero de digitos.cualquier numero de digitos despues

```

```

% de la palabra Dist
tk = regexp(text, 'Dist:\s(\d*+\.\?\d*)', 'tokens');
Dist=str2double([tk{:}]);

% Calculamos el error normalizado en la medida de la distancia
Error=(Dist-vDistReal(ii));

% Se incluye en el vector de errores
vError = [vError Error];

end

mErrorDist=mean(vError);
varErrorDist=var(vError);
[mu, sigma]=normfit(vError);

%% PDF y CDF a partir de datos

% Se pinta el histograma
h = histogram(vError),title('Distribución error - Caso NLOS-
UDP'),xlabel('Error Distancia Ancla-Tag (m)'),ylabel('Número de
ocurrencias');
grid on

% Se ajusta a una distribución lognormal

h = histfit(vError,50,'lognormal'),title('Distribución error - Caso NLOS-UDP
vs Distribución Lognormal'),xlabel('Error Distancia Ancla-Tag
(m)'),ylabel('Número de ocurrencias'), grid on;

% pintamos la cdf de la distribución lognormal
x=linspace(-1,4,100000);
pd = fitdist(vError,'Lognormal');
y = cdf(pd,x);
figure
hold on
plot(x,y,'--')

% Pintamos la cdf de los datos
cdfplot(vError)
legend('CDF Modelo Lognormal','CDF Medidas Reales','Location','best')
title('CDF Medidas NLOS-UDP vs Distribución Lognormal'),xlabel('Error
Distancia Ancla-Tag (m)'),ylabel('Probabilidad acumulada')
axis([0 3 0 1 ])
hold off

```

ModeloNLOS.m

```

%% Leemos los ficheros de datos

file= {'../DatosCasa/Medida6.log'; '../DatosCasa/Medida7.log';
'../DatosCasa/Medida8.log'; '../DatosCasa/Medida9.log';
'../DatosCasa/Medida10.log'; '../DatosCasa/Medida30.log';
'../DatosCasa/Medida31.log'; '../DatosCasa/Medida32.log';
'../DatosCasa/Medida33.log'; '../DatosCasa/Medida36.log';
'../DatosCasa/Medida37.log'; '../DatosCasa/Medida38.log';
'../DatosCasa/Medida39.log'; '../DatosCasa/Medida40.log';
'../DatosCasa/Medida41.log'; '../DatosCasa/Medida42.log';

```

```

'../DatosCasa/Medida43.log'; '../DatosCasa/Medida44.log';
'../DatosCasa/Medida45.log'; '../DatosCasa/Medida46.log';
'../DatosCasa/Medida47.log'; '../DatosCasa/Medida48.log';
'../DatosCasa/Medida49.log'; '../DatosCasa/Medida50.log';
'../DatosCasa/Medida51.log'; '../DatosCasa/Medida52.log';
'../DatosCasa/Medida53.log'; '../DatosCasa/Medida54.log';
'../DatosCasa/Medida55.log'; '../DatosCasa/Medida56.log';
'../DatosCasa/Medida57.log'; '../DatosCasa/Medida58.log';
'../DatosCasa/Medida59.log';
'../DatosCasa/Medida60.log'; '../DatosCasa/Medida13.log';
'../DatosCasa/Medida14.log'; '../DatosCasa/Medida15.log';
'../DatosCasa/Medida16.log'; '../DatosCasa/Medida17.log';
'../DatosCasa/Medida23.log'; '../DatosCasa/Medida24.log';
'../DatosCasa/Medida25.log'; '../DatosCasa/Medida26.log';
'../DatosCasa/Medida27.log';};
vDistReal = DistanciaAncla(0.575,[9 10 8 6 6 6 5 7 7 4 6 6 9 7 7 7 5 5 12 12
11 11 10 10 9 9 8 8 7 7 6 6 5 5 10 11 10 10 10 11 11 7 4 10],[0 0 0 0 2 2 1 0
4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 8 8 9 6 0 11 1 8 9 6]);
vError = [];

for ii=1:size(file,1)

fid = fopen(file{ii}, 'rt'); % opción rt para abrir en modo texto
text = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', ',', 'endofline', '');
text = text{1}{1};

fid = fclose(fid);

% Obtenemos cualquier numero de digitos.cualquier numero de digitos despues
% de la palabra Dist
tk = regexp(text, 'Dist:\s(\d*+\.?\d*)', 'tokens');
Dist=str2double([tk{:}]);

% Calculamos el error normalizado en la medida de la distancia
Error=(Dist-vDistReal(ii));

% Se incluye en el vector de errores
vError = [vError Error];

end

mErrorDist=mean(vError);
varErrorDist=var(vError);
[mu, sigma]=normfit(vError);

%% PDF y CDF a partir de datos

% Se pinta el histograma
h = histogram(vError),title('Distribución error - Caso NLOS'),xlabel('Error
Distancia Ancla-Tag (m)'),ylabel('Número de ocurrencias');

% Se ajusta a una distribución lognormal
h = histfit(vError,50,'lognormal'),title('Distribución error - Caso NLOS vs
Distribución Lognormal'),xlabel('Error Distancia Ancla-Tag
(m)'),ylabel('Número de ocurrencias'), grid on;

% pintamos la cdf de la distribucion lognormal
x=linspace(-1,4,100000);

```

```

pd = fitdist(vError,'Lognormal');
y = cdf(pd,x);
figure
hold on
plot(x,y,'--')

% Pintamos la cdf de los datos
cdfplot(vError)
legend('CDF Modelo Lognormal','CDF Medidas Reales','Location','best')
title('CDF Medidas NLOS vs Distribución Lognormal'),xlabel('Error Distancia
Ancla-Tag (m)'),ylabel('Probabilidad acumulada')
axis([0 2 0 1 ])
hold off

```

DistanciaAncla.m

```

%% Funcion que calcula la distancia (dist) del tamaño de la losa (tamLosa),
el eje y (alto) y el eje x (ancho) mediante pitagoras

function dist = DistanciaAncla(tamLosa, alto, ancho)
dist = 0;
dist = sqrt((tamLosa*ancho).^2+(tamLosa*alto).^2);
end

```

Mapa.m

```

clear

% Leemos los ficheros de datos, calculamos la media del error y su varianza

V_dist_x = [0 0 0 0 1 1 1 1 -1 -2 -3 -4 -5 -6 -6 -6 -6 1 1 2 3 4 5 5 4 3 2 2
-1 -2 0 0 1 1 1 1 -2 -2 -2 -2 -3 -4 -5 -5 -4 -3 2 3 4 4 4 3 3 1 2 3 4 5 -3 -3
-3 -3 -4 -4 -4 -4];
V_dist_y = [2 4 6 8 2 4 6 8 7 7 7 7 7 7 6 5 4 10 11 11 11 11 11 12 12 12 12
13 8 8 5 7 3 5 7 9 9 10 11 12 12 12 12 11 11 11 4 4 4 5 6 6 5 1 1 1 1 1 1 0 -
1 -2 -2 -1 0 1];

file=
{'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa1.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa2.log';'../Mapa
Casa/DatosMapa/Mapa3.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa4.log';'../MapaCasa/Dato
sMapa/Mapa5.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa6.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Map
a7.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa8.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa9.log';'
../MapaCasa/DatosMapa/Mapa10.log'...

; '../MapaCasa/DatosMapa/Mapa11.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa12.log';'../Ma
paCasa/DatosMapa/Mapa13.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa14.log';'../MapaCasa/
DatosMapa/Mapa15.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa16.log';'../MapaCasa/DatosMa
pa/Mapa17.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa18.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa
19.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa20.log'...

; '../MapaCasa/DatosMapa/Mapa21.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa22.log';'../Ma
paCasa/DatosMapa/Mapa23.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa24.log';'../MapaCasa/
DatosMapa/Mapa25.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa26.log';'../MapaCasa/DatosMa
pa/Mapa27.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa28.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa
29.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa30.log'...

; '../MapaCasa/DatosMapa/Mapa31.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa32.log';'../Ma
paCasa/DatosMapa/Mapa33.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa34.log';'../MapaCasa/

```

```

DatosMapa/Mapa35.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa36.log';'../MapaCasa/DatosMa
pa/Mapa37.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa38.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa
39.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa40.log'...

;'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa41.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa42.log';'../Ma
paCasa/DatosMapa/Mapa43.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa44.log';'../MapaCasa/
DatosMapa/Mapa45.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa46.log';'../MapaCasa/DatosMa
pa/Mapa47.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa48.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa
49.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa50.log'...

;'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa51.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa52.log';'../Ma
paCasa/DatosMapa/Mapa53.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa54.log';'../MapaCasa/
DatosMapa/Mapa55.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa56.log';'../MapaCasa/DatosMa
pa/Mapa57.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa58.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa
59.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa60.log'...

;'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa61.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa62.log';'../Ma
paCasa/DatosMapa/Mapa63.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa64.log';'../MapaCasa/
DatosMapa/Mapa65.log';'../MapaCasa/DatosMapa/Mapa66.log'};
vDistReal = DistanciaAncla(0.575,V_dist_x,V_dist_y);
vMError = [];
vVarError = [];

for ii=1:size(file,1)

fid = fopen(file{ii}, 'rt'); % opción rt para abrir en modo texto
text = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', ',', 'endofline', '');
text = text{1}{1};

fid = fclose(fid);

% Obtenemos cualquier numero de digitos.cualquier numero de digitos despues
% de la palabra Dist
tk = regexp(text, 'Dist:\s(\d*+\.?\d*)', 'tokens');
Dist=str2double([tk{:}]);

% Calculamos el error normalizado en la medida de la distancia
Error=(Dist-vDistReal(ii));

% Se incluye en el vector de media de errores

mError = mean(Error);

varError = var(Error);

%% Vector de medias y varianzas de errores: para cada fichero de medidas una
posicion
vMError = [vMError mError];
vVarError = [vVarError varError];
end

%% Se imprimen los valores de media en cada coordenada siendo el color del
punto el valor de la media en dicho punto

color_v = [ones(1,22),2*ones(1,22),3*ones(1,22)];
V_dot_z = ones(1,66);
scatter3(V_dist_x, V_dist_y, V_dot_z, 60, vMError, 'filled')
%Para fijar los ejes

```

```

set(gca, 'XLim', [-7 7], 'YLim', [-3 14], 'ZLim', [-3 3])
colormap;
colorbar
grid off
box off

%% Se imprimen los valores de varianza en cada coordenada siendo el color del
punto el valor de la varianza en dicho punto

color_v = [ones(1,22), 2*ones(1,22), 3*ones(1,22)];
V_dot_z = ones(1,66);
scatter3(V_dist_x, V_dist_y, V_dot_z, 60, vVarError, 'filled')
%Para fijar los ejes
set(gca, 'XLim', [-7 7], 'YLim', [-3 14], 'ZLim', [-3 3])
colormap;
colorbar
grid off
box off

```

DistribucionError.m

```

% Representar media del error en funcion de la distancia

%% Leemos los ficheros de datos

file= {'../DatosCasa/Medida1.log'; '../DatosCasa/Medida2+19.log';
'../DatosCasa/Medida3+18.log'; '../DatosCasa/Medida4.log';
'../DatosCasa/Medida5+21.log'; '../DatosCasa/Medida20.log';
'../DatosCasa/Medida35.log'};
vDistReal = DistanciaAncla(0.575, [10 8 6 7 5 9 13], [0 0 0 0 0 0 0]);

vError = [];
mError = [];

for ii=1:size(file,1)

fid = fopen(file{ii}, 'rt'); % opción rt para abrir en modo texto
text = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', ',', 'endofline', '');
text = text{1}{1};

fid = fclose(fid);

% Obtenemos cualquier numero de digitos.cualquier numero de digitos despues
% de la palabra Dist
tk = regexp(text, 'Dist:\s(\d*+\.?\d*)', 'tokens');
Dist=str2double([tk{:}]);

% Calculamos el error normalizado en la medida de la distancia
Error=(Dist-vDistReal(ii));

mError=[mError mean(Error)];

end

%% Ordenamos los vectores de distancias y de error

[vDistOrdenada, index]=sort(vDistReal);

```

```
vErrorOrdenado=[];

for ii=1:size(mError,2)
    vErrorOrdenado=[vErrorOrdenado mError(index(ii))];
end

plot(vDistOrdenada,vErrorOrdenado),title('Media error de
estimación'),xlabel('Distancia Ancla-Tag (m)'),ylabel('Error (m)');
grid on
```

REFERENCIAS

- [1] ETSI, «Ultra Wide Band,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.etsi.org/technologies/radio/ultra-wide-band>. [Último acceso: Julio 2019].
- [2] M. J. Madero Ayora, Redes Inalámbricas de Área Humana, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2014.
- [3] ITU-R, Rec. ITU-R SM.1755-0. Characteristics of ultra-wideband technology, 2006.
- [4] J. H. Reed, An Introduction to Ultra Wideband Communication Systems, Prentice Hall, 2005.
- [5] T. Verge, «Verizon's 5G network is blazing fast, but it barely exists,» Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.theverge.com/2019/4/4/18295600/verizon-5g-network-first-tests-data-speed>. [Último acceso: Julio 2019].
- [6] Forbes, «NXP Introduces Higher Security Using Ultra-Wideband Technology,» Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.forbes.com/sites/tiriasresearch/2019/06/26/nxp-introduces-higher-security-using-ultra-wideband-technology/#5914dd343841>. [Último acceso: Julio 2019].
- [7] ITU-R, IEEE Standard 802.15.4a: Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs) Amendment 1: Add Alternate PHYs, 2014.
- [8] M. Kwak y J. Chong, A new Double Two-Way Ranging algorithm for ranging system, IEEE, 2010.
- [9] DecaWave, EVK1000 User Manual, 2014.
- [10] DecaWave, Ranging Demo (PC) User Guide, 2014.
- [11] DecaWave, The implementation of two-way ranging with the DW1000, 2015.
- [12] N. A. Alsindi, B. Alavi y K. Pahlavan, Measurement and Modeling of Ultrawideband TOA-Based Ranging in Indoor Multipath Environments, IEEE, 2009.
- [13] K. Pahlavan y B. Alavi, Modeling of the TOA-based Distance Measurement Error Using UWB Indoor Radio Measurements, IEEE, 2006.
- [14] Wikipedia, «Log-normal distribution,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal_distribution. [Último acceso: Julio 2019].
- [15] Wikipedia, «Shifted log-logistic distribution,» 2019. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Shifted_log-logistic_distribution. [Último acceso: Julio 2019].
- [16] M. Heidari y K. Pahlavan, A New Statistical Model for the Behavior of Ranging Errors in TOA-Based Indoor Localization, IEEE, 2007.
- [17] DecaWave, «DecaWave,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.decawave.com/>. [Último acceso:

Julio 2019].

- [18] Sewio, «UWB TECHNOLOGY,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.sewio.net/uwb-technology/>. [Último acceso: Julio 2019].
- [19] MathWorks, «regexp,» 2019. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/regexp.html>.
- [20] MathWorks, «Tokens en expresiones regulares,» 2019. [En línea]. Available: https://es.mathworks.com/help/matlab/matlab_prog/tokens-in-regular-expressions.html.
- [21] DecaWave, Quick Start Guide EVK1000, 2014.
- [22] R. G. Aiello y G. D. Rogerson, Ultra-WideBand Wireless Systems, 2003.
- [23] Y. Jiang y V. C. Leung, An Asymmetric Double Sided Two-Way Ranging for Crystal Offset, IEEE, 2007.

