

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la tecnología de banda ultra-ancha (UWB) en sistemas de localización en tiempo real en espacios interiores

Ultra-Wideband (UWB) Technology Study in Real-Time Location Systems in Indoor Spaces

Autor

Borja Blanco Moreno

Director

Dr. David Asiain Ansorena

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia

Junio 2024

Página intencionadamente en blanco.



**Escuela Universitaria
Politécnica** - La Almunia
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Estudio de la tecnología de banda ultra-ancha
(UWB) en sistemas de localización en tiempo
real en espacios interiores

Ultra-Wideband (UWB) Technology Study in
Real-Time Location Systems in Indoor Spaces

424.23.66

Autor: Borja Blanco Moreno
Director: Dr. David Asiain Ansorena
Fecha: 06 2024

Página intencionadamente en blanco.

INDICE DE CONTENIDO BREVE

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	3
3. INTRODUCCIÓN	4
4. MARCO TEÓRICO	5
5. DESARROLLO	24
6. RESULTADOS	51
7. CONCLUSIONES	74
8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	76
9. BIBLIOGRAFÍA	77

INDICE DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
1.1. PALABRAS CLAVE	2
2. ABSTRACT	3
2.1. KEY WORDS	3
3. INTRODUCCIÓN	4
4. MARCO TEÓRICO	5
4.1. TECNOLOGÍAS DE LA COMUNICACIÓN	5
4.1.1. Tecnología de banda ultra ancha	6
4.2. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO	10
4.2.1. Medida de distancia por tiempo de vuelo	10
4.2.2. Modelos para calcular la posición	13
4.3. PRODUCTOS OEM CON TECNOLOGÍA UWB	17
4.3.1. Transmisor UWB DWM1000	17
4.4. PLATAFORMAS DE DESARROLLO	21

4.4.1. Placa ESP32-C3-DevkitC-02	22
5. DESARROLLO	24
5.1. DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS	24
5.1.1. Dispositivo de integración modular.	25
5.1.2. Diseño de shield para la antena DWM1000	27
5.1.1. Consumo y autonomía de los dispositivos	31
5.2. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL FIRMWARE	36
5.2.1. Funcionamiento intra-módulo y extra-módulo	37
5.2.2. Calibración de parámetros de los módulos	39
5.2.3. Medida de distancia entre dispositivos	43
5.3. ENSAYO DE POSICIONAMIENTO	45
6. RESULTADOS	51
6.1. PRUEBA DE MEDIDA DE DISTANCIA	51
6.2. ENSAYO DE POSICIONAMIENTO	62
7. CONCLUSIONES	74
7.1. TRABAJOS FUTUROS	75
8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	76
9. BIBLIOGRAFÍA	77

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Comunicación entre ordenadores por internet. [21]	5
Ilustración 2 Espectro electromagnético [22]	5
Ilustración 3 Frecuencia y tasa de transmisión entre diferentes tecnologías. [2]	6
Ilustración 4 División de canales por frecuencia y ancho de banda. [5]	7
Ilustración 5 Estructura del PPDU. [3]	8
Ilustración 6 Error de medida de distancia con distinto PRF. [6]	9
Ilustración 7 Esquema de constelación GPS [23]	10

Ilustración 8 Representación del TWR. [5]	11
Ilustración 9 Esquema de sistema LPS con TWR. [5]	12
Ilustración 10 Esquema de sistema LPS con TDoA. [5]	12
Ilustración 11 Sistema utilizando trilateración. [24]	13
Ilustración 12 Módulo DWM1000 sin carcasa [11]	17
Ilustración 13 Placa de desarrollo Arduino Uno R4 Wi-Fi. [25]	21
Ilustración 14 Diagrama de bloques del ESP32-C3. [13]	22
Ilustración 15 Placa de desarrollo ESP32-C3-DevkitC-02. [13].....	23
Ilustración 16 Representación del ensayo de posicionamiento.	24
Ilustración 17 Esquema de conexión con cable USB.	24
Ilustración 18 Esquema de conexión con Wi-Fi.	25
Ilustración 19 Dispositivo interconectado por soldadura de cables.....	26
Ilustración 20 Parte trasera del dispositivo. ESP32 y alimentación.....	26
Ilustración 21 Esquema de conexión de la antena por el fabricante. [11]	26
Ilustración 22 Diseño electrónico del shield.	27
Ilustración 23 Diseño PCB. Cara frontal con DWM1000.	28
Ilustración 24 Diseño PCB. Cara trasera con ESP32.....	28
Ilustración 25 Modelo 3D del shield. Parte frontal.	29
Ilustración 26 Shield montado con la placa de desarrollo.	29
Ilustración 27 Fotografías del dispositivo con la carcasa protectora.	30
Ilustración 28 Batería recargable utilizada.....	31
Ilustración 29 Sinóptico de la medida de consumo.	34
Ilustración 30 Gráfica de tensión de la batería.....	35
Ilustración 31 Ruta de instalación de librerías.....	36
Ilustración 32 Resultado erróneo de la configuración del dispositivo.	37
Ilustración 33 Verificación del funcionamiento del dispositivo.	37
Ilustración 34 Resultado por pantalla de BasicSender.	38

Ilustración 35 Resultado por pantalla de BasicReceiver.	39
Ilustración 36 Medida de distancia con errores.	39
Ilustración 37 Esquema representativo del proceso de calibración.....	40
Ilustración 38 Resultado por puerto serie de la calibración.	41
Ilustración 39 Resultados de medida de distancia con calibración.....	42
Ilustración 40 Resultados de medida tras ajustar la calibración.....	42
Ilustración 41 Prueba de medida a 0,3m.....	43
Ilustración 42 Prueba de medida a 1,2m.....	43
Ilustración 43 Prueba de medida a 2,1m.....	44
Ilustración 44 Representación sinóptica del ensayo.	45
Ilustración 45 Desarrollo sinóptico del ensayo.	46
Ilustración 46 Ensayo de posicionamiento 1, posición (1,1).....	48
Ilustración 47 Ensayo de posicionamiento 2, posición (1,1).....	48
Ilustración 48 Grafica de medida de distancia 0,3m	51
Ilustración 49 Histograma de medida de distancia 0,3m	51
Ilustración 50 Gráfica de medida de distancia 0,6m	52
Ilustración 51 Histograma de medida de distancia 0,6m	52
Ilustración 52 Gráfica de medida de distancia 0,9m	53
Ilustración 53 Histograma de medida de distancia 0,9m	53
Ilustración 54 Gráfica de medida de distancia 1,2m	54
Ilustración 55 Histograma de medida de distancia 1,2m	54
Ilustración 56 Gráfica de medida de distancia 1,5m	55
Ilustración 57 Histograma de medida de distancia 1,5m	55
Ilustración 58 Gráfica de medida de distancia 1,8m	56
Ilustración 59 Histograma de medida de distancia 1,8m	56
Ilustración 60 Gráfica de medida de distancia 2,1m.....	57
Ilustración 61 Histograma de medida de distancia 2,1m	57

Ilustración 62 Gráfica de medidas de distancia 2,4m	58
Ilustración 63 Histograma de medidas de distancia 2,4m.	58
Ilustración 64 Gráfica de medida de distancias 2,7m	59
Ilustración 65 Histograma de medida de distancias 2,7m	59
Ilustración 66 Gráfica de medida de distancia 3,0m	60
Ilustración 67 Histograma de medidas de distancia 3,0m.	60
Ilustración 68 Gráfica de ensayo de posición (0,1).	62
Ilustración 69 Histograma posición X (0,1).....	63
Ilustración 70 Histograma posición Y (0,1).....	63
Ilustración 71 Gráfica de ensayo de posición (1,0)	64
Ilustración 72 Histograma posición X (1,0).....	65
Ilustración 73 Histograma eje Y (1,0).....	65
Ilustración 74 Gráfica de ensayo de posición (1,1)	66
Ilustración 75 Histograma eje X (1,1).....	66
Ilustración 76 Histograma eje Y (1,1).....	67
Ilustración 77 Gráfica de posición (2,1).	68
Ilustración 78 Histograma eje X (2,1).....	68
Ilustración 79 Histograma eje Y (2,1)	69
Ilustración 80 Gráfica ensayo de posición (1,2).	70
Ilustración 81 Histograma eje X (1,2).....	70
Ilustración 82 Histograma eje Y (1,2)	71
Ilustración 83 Gráfica de ensayo de posición (2,2)	72
Ilustración 84 Histograma eje X (2,2).....	72
Ilustración 85 Histograma eje Y (2,2)	73

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 División de canales por frecuencia y región [5]	7
Tabla 2 Modos de funcionamiento del SPI. [11]	18
Tabla 3 Configuración de código de preámbulo para cada canal. [12]	18
Tabla 4 Configuración de la calibración de antena. [12]	19
Tabla 5 Consumos de corriente del ESP32-C3 [13].....	23
Tabla 6 Valores de consumo de la placa de desarrollo ESP32.....	31
Tabla 7 Valores de consumo de la antena DWM1000	31
Tabla 8 Resumen tiempo, consumo y autonomía de dispositivos.	33
Tabla 9 Resultados de consumo y autonomía reales.	34
Tabla 10 Análisis de error de las muestras.	61
Tabla 11 Análisis de valores promedio en (0,1)	64
Tabla 12 Valores promedio posición (1,0)	65
Tabla 13 Valores promedio posición (1,1)	67
Tabla 14 Valores promedio posición (2,1)	69
Tabla 15 Valores promedio posición (1,2)	71
Tabla 16 Valores promedio posición (2,2)	73

1. RESUMEN

En este proyecto se realiza un ensayo de posicionamiento en espacios interiores (IPS) donde se utiliza la tecnología de banda ultra ancha para medir la distancia entre dispositivos para obtener la posición de un objeto móvil en tiempo real.

Se diseñan y montan cuatro dispositivos y se someten a diferentes pruebas para verificar su funcionamiento propio y la interconectividad entre ellos, obteniendo valores de medida de distancia, calculados por tiempo de vuelo mediante Two-Way Ranging (TWR), de hasta cinco metros, teniendo un error de medida no superior a 10cm.

Para realizar las pruebas se programan los dispositivos con código escrito en el lenguaje de programación Arduino y basado en los ejemplos de una librería. Además, este código se modifica cuando es necesario para configurar los dispositivos durante las pruebas. Con uno de estos programas se calibra la antena de los dispositivos para mejorar la precisión de las medidas de distancia.

En el ensayo de posicionamiento tres dispositivos actúan como balizas fijas, mientras que el cuarto es el objeto móvil a posicionar dentro de un área de 4m^2 ($2\text{m} \times 2\text{m}$). El móvil se acomoda en diferentes posiciones que cambian cada 5 minutos para comprobar la precisión de los dispositivos en toda el área del ensayo.

Para llevar a cabo el ensayo de posicionamiento se escriben diferentes programas que permiten a los dispositivos comunicarse entre sí. Los dispositivos se configuran en base a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con anterioridad. Además, se escribe un programa en MATLAB encargado de calcular la posición en tiempo real del móvil, utilizando una resolución por matrices de las ecuaciones a partir del algoritmo de Newton-Raphson.

Los resultados obtenidos indican que las muestras tomadas de medida de distancia y los cálculos de posición siguen una distribución normal, teniendo una desviación inferior al 5%. Además, los errores de medida no superan los 20cm en el peor de los casos. También se encuentra que, si la distancia entre dispositivos es inferior a un metro, aparece una desviación en el valor promedio de medida de 10cm por debajo del valor real. En cambio, si se superan los dos metros de distancia aparece una desviación en el valor promedio, pero esta vez es de 10cm por encima del valor real.

1.1. PALABRAS CLAVE

GPS Indoor, Tecnología UWB, DWM1000, Posicionamiento en tiempo real.

2. ABSTRACT

In this project, a real time indoor location system, based on the ultra-wide band technology, is designed, and tested to obtain a device's position in real time.

Several devices are designed, created, and tested to verify the correct work by themselves and the interconnectivity between two of them. Ranging values obtained in the test comply with the transmitter antenna's manufacturer specifications, having 10cm of error in the worst-case scenario.

To do the tests, example programs of an Arduino IDE library were used, and some of them were modified, adjusting some characteristics to fit those of the tests. One of these examples allows the calibration of receivers, getting an improvement on ranging accuracy obtained by a time-of-flight method, Two-Way Ranging (TWR).

The location system was made with the designed devices and some programs based on the Arduino library's examples and the results of the test done, making possible to the devices to communicate with each other and obtain a distance value between them. In addition of this, a MATLAB program responsible of the real time position calculation using the Newton-Raphson model applied to non-linear equations system solving.

Results obtained show that distance measurements and position calculation follow a normal distribution curve, having low deviation (less than 5%). Moreover, if error appears, it is less than 20cm in worst-case scenarios. Is worth noting that, if the distance between tag and anchor is less than a meter, an offset in the mean value appears, being 10cm less than the real distance value. Even more, if the distance between tag and anchor is more than 2 meters, this offset is of 10cm more than the real distance value.

2.1. KEY WORDS

Indoor GPS, UWB Technology, DWM1000, Real Time Location System.

3. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayoría de los dispositivos están interconectados mediante redes inalámbricas como Wi-Fi, Bluetooth®, de telefonía, etc. ... y este aumento de conexiones puede saturar el espacio aéreo por el que circulan, generando interferencias en ciertos dispositivos.

La banda ultra ancha es una tecnología en crecimiento y desarrollo que no interactúa con ninguna de las otras tecnologías inalámbricas de radiofrecuencia gracias a su baja densidad espectral de potencia, además de tener un rango de frecuencias amplio. Su principal utilidad, y la que se está investigando en la mayoría de los artículos y en este trabajo, se encuentra en el campo del posicionamiento en tiempo real gracias a que se pueden obtener medidas de distancia y posiciones de objetos con precisión del orden de centímetros, sin tener grandes requerimientos de equipo o condiciones ambientales.

Dentro de entornos industriales sus aplicaciones aparecen en el campo de la logística y la investigación del flujo de trabajo, pero puede adaptarse a otros aspectos incluso utilizarse en casos del día a día, como encontrar un objeto perdido que tenga esta tecnología, conectarse con otra gente como hacen ciertos productos de Apple, o ayudar a posicionar dentro de un estadio un balón de fútbol, como se hizo con el balón del mundial de Qatar 2023 [16].

En este trabajo se realizará un ensayo de posicionamiento de un dispositivo con la tecnología de banda ultra ancha. Para llevar a cabo el ensayo se estipulan diferentes objetivos, que deben ejecutarse de manera pautada, antes del ensayo planteado:

- Diseñar los dispositivos necesarios para realizar el ensayo, asegurando que sean fiables y robustos. Para ello se deben realizar diagramas y circuitos para conocer su funcionamiento.
- Verificar el funcionamiento de dichos dispositivos, teniendo en cuenta la conexión de los módulos que los componen y asegurando que sean capaces de enviar información y comunicarse estos dispositivos entre sí. La verificación se realizará con código en el lenguaje de programación Arduino y sus librerías capaces de aprovechar los módulos utilizados.
- Realizar una serie de pruebas de medida de distancia que verifiquen la precisión de los dispositivos a la hora de comunicarse. Los dispositivos se programarán para enviar y recibir mensajes que midan la distancia.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. TECNOLOGÍAS DE LA COMUNICACIÓN

La comunicación se define como un intercambio de información, generalmente entre dos o más personas. Ha existido comunicación desde antes de que existiera concepto de civilización, siendo la tecnología uno de los medios que ha facilitado el intercambio de información de manera eficiente.

Desde las señales de humo, las cartas enviadas por paloma mensajera o, recientemente, el uso de teléfonos inteligentes conectados a la red de internet ha existido la comunicación a distancia, la cual ya es a nivel global.

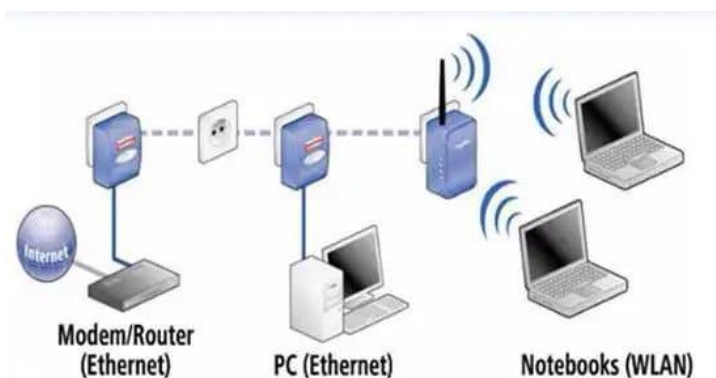


Ilustración 1 Comunicación entre ordenadores por internet. [21]

En la actualidad, las tecnologías de comunicación inalámbrica basadas en la radiofrecuencia han revolucionado la forma en la que vivimos. La radio, el teléfono móvil o la televisión son elementos que utilizan señales de radiofrecuencia para transmitir información.

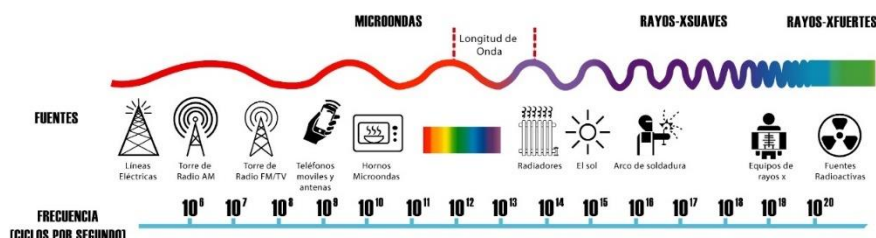


Ilustración 2 Espectro electromagnético [22]

La radiofrecuencia es una parte del espectro electromagnético que está dividida en bandas de frecuencia para separar los diferentes usos y dispositivos que se conectan entre sí. La tecnología Bluetooth, el Wi-Fi, la señal de televisión o la banda ultra ancha, de la que se profundizará a continuación, forman parte del espectro de radiofrecuencia.

4.1.1. Tecnología de banda ultra ancha

La banda ultra ancha (UWB por sus siglas en inglés Ultra-Wide Band) es una tecnología de comunicaciones basada en la modulación de pulsos de radiofrecuencia, definiéndose por ocupar un ancho de banda mayor al 25% de la frecuencia central. [1]

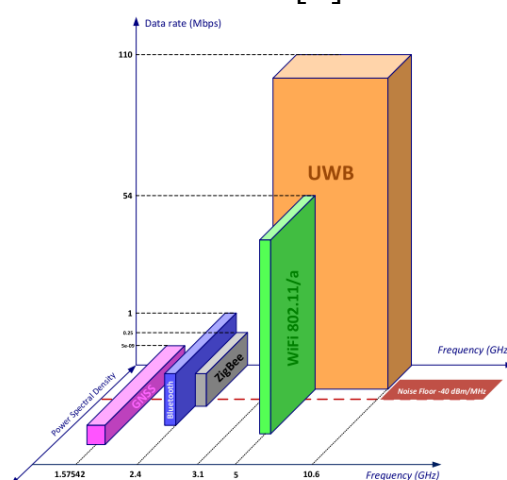


Ilustración 3 Frecuencia y tasa de transmisión entre diferentes tecnologías. [2]

La banda de frecuencias de UWB se extiende desde los 3GHz hasta los 10GHz, con la característica de que su densidad espectral de poder es inferior a la del ruido ambiental de $-41,6 \text{ mW/dB}$, haciendo que no sea detectable por el resto de las tecnologías de comunicación inalámbrica, ya que filtran el ruido ambiental y, con él, las señales UWB. [2]

Otra de las características de la tecnología UWB, como se puede ver en la ilustración 3, es que tiene una velocidad de transmisión de datos superior al resto de tecnologías gracias a su modelo de transmisión de información por pulsos.

Sus primeros usos aparecen con el nacimiento de la radiofrecuencia con experimentos realizados por Hertz y Marconi, pero no es hasta la segunda mitad del siglo XX que se implementa en sistemas de RADAR y aplicaciones de uso exclusivamente militar. No es hasta este siglo que se liberaliza su uso gracias a la FCC (Federal Communications Commission) en 2002 y aparecen otros organismos para su estandarización y fomento, como el FiRa (Fine Ranging Consortium). [4]

El estándar IEEE 802.15.4 [3] define la tecnología UWB y la divide en diferentes canales para poder regular las frecuencias, haciendo tres grupos:

- Por debajo de 1GHz. Solo se encuentra el canal 0, ocupando entre 250MHz y 750MHz, es un canal privativo.
- Banda baja entre los 3GHz y los 5GHz. Se encuentran los canales 1, 2, 3 y 4.
- Banda alta entre los 6GHz y los 10GHz. Se encuentran los canales 5 a 15.

Tabla 1 División de canales por frecuencia y región [5]

Canal	Frecuencia central (MHz)	Ancho de banda (MHz)	Región de uso
0	499,2	499,2	Privada
1	3.494,4	499,2	EE. UU, U.E.
2	3.993,6	499,2	EE. UU, U.E., Corea, Japón
3	4.492,6	499,2	EE. UU, U.E., Corea, Japón
4	3.993,6	1.331,2	EE. UU, U.E.
5	6.489,6	499,2	EE. UU, U.E., China
6	6.988,8	499,2	EE. UU, U.E., China
7	6.489,6	1.081,6	EE. UU
8	7.488,0	499,2	EE. UU, U.E., China, Corea
9	7.987,2	499,2	EE. UU, U.E., Japón, China, Corea
10	8.486,4	499,2	EE. UU, U.E., China, Corea, Japón
11	7.987,2	1.331,2	EE. UU, Corea, Japón
12	8.985,6	499,2	EE. UU, Corea, Japón
13	9.484,8	499,2	EE. UU, Corea, Japón
14	9.984,0	499,2	EE. UU, Corea, Japón
15	9.484,8	1.354,97	EE. UU, Corea, Japón

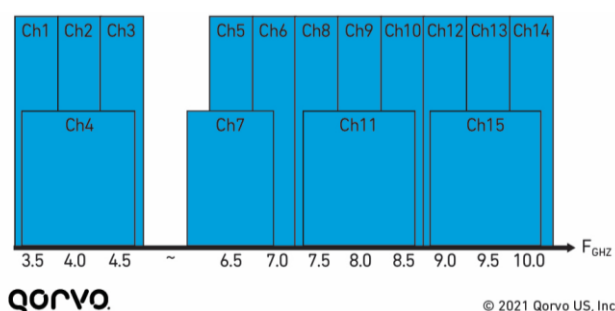


Ilustración 4 División de canales por frecuencia y ancho de banda. [5]

Este estándar IEEE también define la capa física (PHY de sus siglas en inglés Physical Layer) como la interfaz de más bajo nivel que gestiona el funcionamiento de la antena, la transmisión y la recepción.

El protocolo de las unidades de datos de esta capa (PPDU) es el formato que tienen los mensajes enviados por UWB, dividiéndose en varias partes, que se explican a continuación y se pueden ver en forma de paquete en la ilustración 5:

- Preámbulo: Conjunto de datos que permiten la sincronización entre transmisor y receptor. Indica a quién va dirigido el mensaje enviado.
- Delimitador de inicio de frame (SFD): Separador entre el preámbulo y mensaje enviado, que evita mezclar la información enviada con el preámbulo.
- Encabezado (PHR): Contiene la información necesaria sobre la transmisión del mensaje para que el receptor pueda descifrar el mensaje si cumple con los requisitos. La velocidad de transmisión o el tamaño de los datos es información de este encabezado.
- Datos: Información que se quiere transmitir.

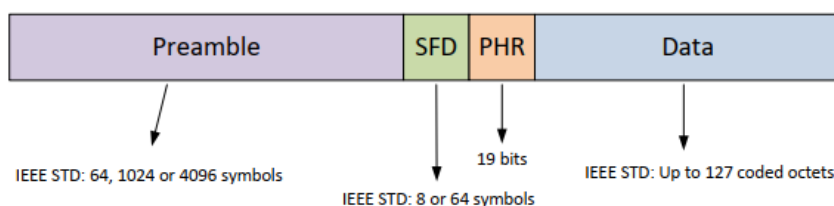


Ilustración 5 Estructura del PPDU. [3]

La PHY es la encargada de enviar los mensajes mediante el protocolo PPDU, pero para que se envíen y reciban correctamente los mensajes, tanto el transmisor como el receptor deben tener una configuración semejante de los siguientes parámetros:

- Canal UWB: banda de frecuencia en la que el dispositivo transmite o escucha para obtener mensajes.
- Longitud del preámbulo: Cantidad de símbolos necesarios para identificar el mensaje recibido. A mayor longitud es más fácil de identificar un mensaje, pero se consume más energía.
- Frecuencia de repetición de pulsos (PRF): Cantidad de pulsos enviados dentro de un intervalo de tiempo. A mayor frecuencia, más símbolos se envían, aumentando el consumo pero pudiendo obtener más distancia. Se pueden tener valores de 16MHz o de 64MHz para la transmisión del preámbulo y los datos. El valor máximo es de 500MHz, pero en ciertos apartados del mensaje no se alcanza porque la modulación de los símbolos reduce la velocidad de emisión.
- Código del preámbulo: Habilita el intercambio de información entre los dispositivos que comparten código dentro de un mismo canal.

- Velocidad de transmisión: Datos emitidos por segundo, desde 100Kbps, 850Kbps y 6,8Mbps.

Todos los parámetros de la capa física repercuten a la hora de obtener medidas de distancia con dispositivos UWB. En la ilustración 6 se puede ver una gráfica donde se compara el error obtenido cuando se utiliza un PRF de 16MHz y otro de 64MHz, sin haber cambiado el resto de los parámetros y teniendo unas condiciones de estudio iguales, se tiene menos error en la medida de distancia con un PRF de 64MHz.

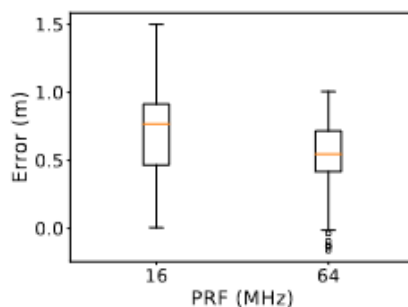


Ilustración 6 Error de medida de distancia con distinto PRF. [6]

4.2. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO

El posicionamiento es conocer la posición de un objeto en base a unas coordenadas establecidas del sistema. El caso más conocido de posicionamiento es el sistema GPS, en el que una constelación de satélites permite en cada momento conocer la ubicación de cualquier dispositivo con conexión a este sistema (teléfonos inteligentes, coches, etc. ...).

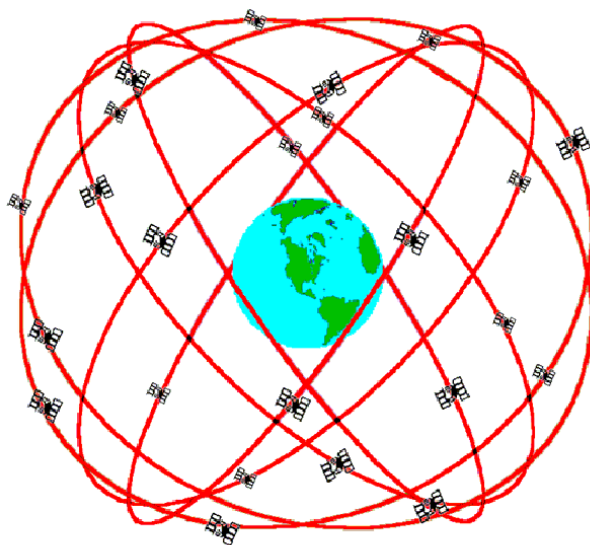


Ilustración 7 Esquema de constelación GPS [23]

Hay dos tipos de sistemas de posicionamiento, los globales (GPS) o los locales (LPS de sus siglas en inglés Local Positioning System), explorando este trabajo los segundos. La diferencia entre estos es que el GPS utiliza satélites y los locales utilizan otros elementos, como torres de telefonía, balizas o puntos de acceso Wi-Fi, entre otras posibilidades. Independientemente de la tecnología utilizada, los procesos de posicionamiento son similares. Una representación del GPS se puede ver en la ilustración superior.

Los LPS se centran en el posicionamiento dentro de un espacio reducido y tienen mayor precisión en estos que el GPS porque en algunos casos el GPS no tiene línea de visión directa al objeto, mientras que el LPS sí.

4.2.1. Medida de distancia por tiempo de vuelo

El tiempo de vuelo (ToF por sus siglas en inglés Time-of-Flight) es el tiempo que pasa desde que un dispositivo transmisor envía una señal hasta que otro dispositivo receptor la detecta. Este valor es

fundamental para realizar cálculos de distancia entre dispositivos inalámbricos y es el método más utilizado.

$$v = \frac{d}{t}$$

En la expresión matemática de arriba se puede ver que la velocidad (v) es igual a la distancia (d) entre el tiempo (t). Si se quiere calcular la distancia entre dos dispositivos mediante el ToF utilizando una onda electromagnética, como en el caso de la tecnología UWB, la velocidad es la constante de la velocidad de la luz (c) y el tiempo es el tiempo de vuelo de la señal enviada (t_{of}), como se ve en la expresión inferior.

$$d = c \cdot t_{of}$$

Al calcular la distancia enviando una sola señal, en muchos casos los tiempos de vuelo no se obtienen con precisión, haciendo que la distancia obtenida tenga una gran variación. Entonces se utilizan modelos que aportan fiabilidad a los resultados, como puede ser el caso de la medida bidireccional (TWR por sus siglas en inglés Two-Way Ranging) representada gráficamente en la siguiente ilustración.

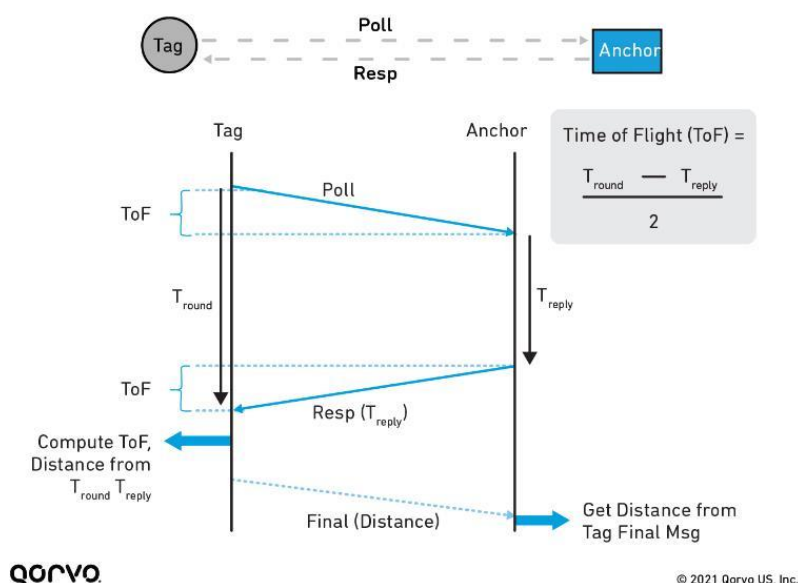


Ilustración 8 Representación del TWR. [5]

Para poder explicar cómo se calcula la distancia mediante TWR, se sigue un ejemplo con dos dispositivos, A y B, separados una distancia d . El dispositivo A comienza enviando un mensaje de búsqueda (Poll), que recibirá el dispositivo B. El dispositivo B guardará la marca de tiempo de la recepción (T_1) y se la enviará como respuesta al dispositivo A, al igual que la marca de tiempo del envío (T_2). Entonces, el dispositivo A recibirá esta respuesta, guardará la marca de tiempo de la recepción (T_{round}), calculará el tiempo de respuesta ($T_{respuesta}$) como ($T_2 - T_1$) y podrá calcular entonces el ToF, utilizando la siguiente expresión:

$$ToF = \frac{T_{ronda} - T_{respuesta}}{2}$$

Se divide entre 2 porque al enviar el poll como la respuesta hay dos tiempos de vuelo. Este método es más preciso y permite obtener la distancia entre dispositivos. Un ejemplo de sistema de posicionamiento utilizando este método de medida de distancia se puede ver en la ilustración 9.

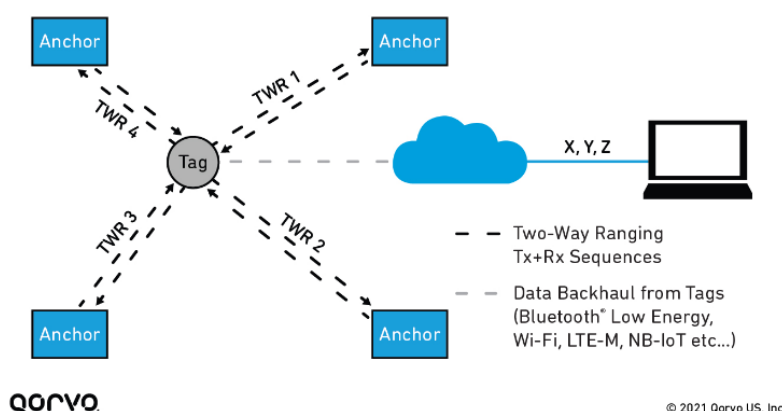


Ilustración 9 Esquema de sistema LPS con TWR. [5]

El modelo TWR es utilizado porque es sencillo de implementar al no ser necesario sincronizar las balizas entre sí con marcas de tiempo porque se comunicarán únicamente con el móvil. Igualmente, existe un inconveniente con este modelo cuando hay muchas balizas, ralentizándose la obtención de la posición ya que el objeto móvil se tendrá que comunicar uno a uno con las balizas y, hasta que no se haya comunicado con todos no se obtendrá la posición.

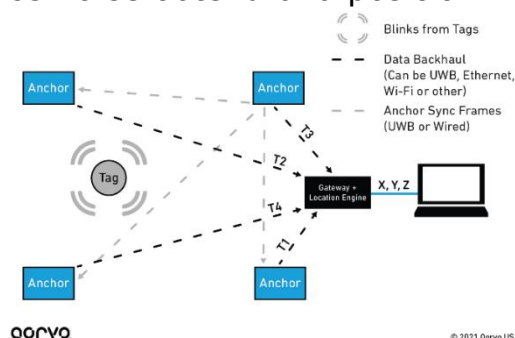


Ilustración 10 Esquema de sistema LPS con TDoA. [5]

El modelo de diferencia en el tiempo de llegada (TDoA por sus siglas en inglés Time Difference of Arrival) resuelve el inconveniente de tener muchas balizas, ya que el dispositivo móvil envía un mensaje de localización genérico a todas las balizas que, sincronizadas temporalmente entre sí, guardan una marca de tiempo diferente entre ellas según la distancia a la que se encuentre el objeto de cada una.

Su implementación es más compleja el modelo anterior debido a la sincronización de tiempos, pero su funcionamiento tiene la misma velocidad de adquisición de datos con el número de balizas elevado.

4.2.2. Modelos para calcular la posición

Para conocer la posición de un objeto móvil dentro de un espacio se pueden utilizar técnicas como la multilateración o el análisis de la escena y proximidad, pero este trabajo se centrará en la trilateración. [7]

La trilateración es una técnica de cálculo de la posición donde se miden las distancias entre el objeto móvil y varios objetos fijos, o balizas, de las que se conocen sus posiciones. No hay que confundir esta técnica con la de triangulación, que consiste en obtener la posición a partir de la distancia y el ángulo que forma el objeto móvil con las balizas.

Para poder aplicar la trilateración en dos dimensiones, es necesario utilizar al menos tres balizas para conocer tres distancias al objeto. Para una posición en tres dimensiones sería necesario utilizar cuatro anclas en diferentes planos. En este caso se explica en profundidad el proceso de trilateración en dos dimensiones, con tres balizas.

Como se puede ver en la ilustración 11, las distancias se pueden representar como radios de circunferencia cuyo centro es cada una de las balizas. Estos radios se intersecan en el punto donde se encuentra objeto móvil. Aplicando la expresión matemática de la circunferencia se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\ d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \end{cases}$$

Donde (d_1, d_2, d_3) son las distancias entre cada baliza y el objeto móvil, (x, y) son las coordenadas del objeto móvil, y (x_1, x_2, x_3) y (y_1, y_2, y_3) son las coordenadas de cada una de las balizas.

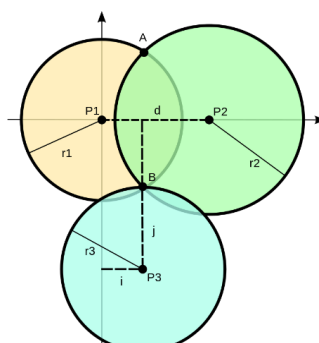


Ilustración 11 Sistema utilizando trilateración. [24]

El modelo más sencillo para resolver este sistema de ecuaciones es descomponiendo las ecuaciones y extrayendo las coordenadas "x" e "y" siguiendo estos pasos [8]:

Primero se expanden y reordenan las expresiones, obteniendo $[f_1]$, $[f_2]$ y $[f_3]$.

$$d_1^2 - x_1^2 - y_1^2 = (x^2 + y^2) - 2x_1x - 2y_1y [f_1]$$

$$d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 = (x^2 + y^2) - 2x_2x - 2y_2y [f_2]$$

$$d_3^2 - x_3^2 - y_3^2 = (x^2 + y^2) - 2x_3x - 2y_3y [f_3]$$

Después se opera $[f_1] - [f_2]$ y $[f_1] - [f_3]$.

$$d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 = 2(x_2 - x_1)x + 2(y_2 - y_1)y [f_4]$$

$$d_1^2 - d_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2 = 2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y [f_5]$$

Para simplificar el proceso, se abrevian los términos en $[f_4]$ y $[f_5]$ de la siguiente forma.

$$A = Bx + Cy [f_4']$$

$$D = Ex + Fy [f_5']$$

Y con esta nomenclatura se operan las expresiones para obtener "x" e "y", obteniendo primero "y".

$$[f_4'] = x = \frac{A - Cy}{B} \rightarrow [f_5'] = D = \frac{E \cdot A}{B} - \frac{E \cdot C}{B}y + Fy$$

$$y = \frac{A \cdot E - B \cdot D}{C \cdot E - B \cdot F}$$

Y a partir de aquí, se sustituye "y" en $[f_4']$ y se obtiene "x":

$$x = \frac{A - C \frac{A \cdot E - B \cdot D}{C \cdot E - B \cdot F}}{B}$$

$$x = \frac{C \cdot D - A \cdot F}{C \cdot E - B \cdot F}$$

Al conocer la posición de las balizas se puede calcular la posición del objeto móvil una vez se obtiene la medida de distancia entre este y las balizas. Es una resolución sencilla para este caso, pero si se aumenta el número de balizas aparecen más expresiones a resolver y complica el proceso de resolución. Por ello otros modelos basados igualmente en el sistema de ecuaciones obtenido de la ilustración 11 son de mayor interés.

El primero es una aproximación matricial del problema. En este caso, el sistema obtenido de $[f_1]$, $[f_2]$ y $[f_3]$ se expresa de forma matricial. [9]

$$AX = B$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 \\ 1 & -2x_3 & -2y_3 \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} t \\ x \\ y \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} d_1^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ d_3^2 - x_3^2 - y_3^2 \end{bmatrix}$$

Siendo t una abreviatura de $(x^2 + y^2)$ para poder resolver de forma sencilla el sistema. Para obtener los datos de la matriz de posición del objeto móvil X se puede aplicar la siguiente expresión:

$$X = (A^t A)^{-1} A^t B$$

Ahora, con tener las diferentes matrices utilizadas un ordenador sería capaz de resolver este problema fácilmente sin tener que obtener por el método anterior " x " e " y ". Es escalable, pero se puede aplicar un algoritmo a la resolución matricial para obtener resultados de posición más precisos.

Uno de los más básicos, y el que se utiliza en el ensayo, es el de Newton-Raphson [10], utilizado para resolver ecuaciones no lineales y que puede adaptarse a un sistema de matrices. Este indica que, si se tiene una función $f(x)=0$, esta debe satisfacer las siguientes condiciones:

- $f(a) \cdot f(b) < 0$.
- La función es continua en el intervalo $[a, b]$.
- La función es derivable en el intervalo abierto $]a, b[$ y su valor es distinto a cero.
- La concavidad de la función no cambia en el intervalo $[a, b]$.

Si se cumplen estas condiciones, la ecuación admite una única raíz real en el intervalo descrito, que puede obtenerse con el siguiente algoritmo:

$$\begin{cases} x_0 \text{ es la aproximación inicial} \\ x_n = x_{n-1} - \frac{f(x_{n-1})}{f'(x_{n-1})}, \text{ siendo } n \geq 1 \end{cases}$$

Este algoritmo puede adaptarse al sistema de matrices, teniendo en este caso el sistema $F(X)$:

$$F(X) = \begin{bmatrix} t - 2x_1x - 2y_1y + x_1^2 + y_1^2 - d_1^2 \\ t - 2x_2x - 2y_2y + x_2^2 + y_2^2 - d_2^2 \\ t - 2x_3x - 2y_3y + x_3^2 + y_3^2 - d_3^2 \end{bmatrix} = 0$$

Se mantiene la abreviatura de $(x^2+y^2) = t$ porque es de utilidad en el proceso. X es la matriz de incógnitas del modelo con matrices.

Será necesario aplicar un jacobiano, que en este caso queda tal que así:

$$J(F(X)) = \begin{bmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 \\ 1 & -2x_3 & -2y_3 \end{bmatrix}$$

Entonces, el algoritmo de Newton-Raphson aplicado a matrices se puede adaptar de la siguiente forma para este problema:

$$\begin{cases} X_0 = \begin{pmatrix} t_0 \\ x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}, \text{aproximación inicial} \\ X_n = X_{n-1} - J(F(X_{n-1}))^{-1}F(X_{n-1}), \text{para } n \geq 1 \end{cases}$$

Este modelo final requiere de unos valores de posición inicial del objeto móvil para poder realizar los cálculos. Esto no es un inconveniente, ya que en la mayoría de los casos al comenzar el proceso se conoce la posición del móvil al haber situado uno mismo el objeto. En su defecto, se puede indicar una posición de referencia inicial, suponiendo que el móvil parte siempre desde una posición conocida.

4.3. PRODUCTOS OEM CON TECNOLOGÍA UWB

Un fabricante de equipos originales (OEM de sus siglas en inglés "Original Equipment Manufacturer"), como su nombre indica, fabrica componentes que vende a otras empresas para que los añadan en sus productos. [19]

Utilizar productos OEM es común en cualquier industria porque permite ahorrar tiempo y esfuerzo al no tener que fabricar todos los componentes necesarios para sus productos, centrando a la empresa en mejorar su factor distintivo. Además, si una empresa se especializa en realizar estos componentes OEM permite abaratar sus costes, mejorando sus beneficios y ofreciendo productos de calidad a menor precio.

En el ámbito de los sistemas de posicionamiento en espacios interiores, centrando el foco en la tecnología UWB, al ser una tecnología emergente muchos fabricantes prefieren tener sus diseños propios de antena, pero otros como SEWIO [20] optan por implementar productos OEM de la marca Qorvo en sus dispositivos de localización, como el DWM1000.

4.3.1. Transmisor UWB DWM1000

Este módulo es la antena transmisora de UWB fabricado por Qorvo y diseñado por DecaWave [11], basado en el chip transmisor DW1000 de la misma compañía. Se alimenta a través de tres pines VCC a tensiones entre 2,8V y 3,6V, teniendo un consumo típico de transmisión y recepción a 3,3V de 160mA al utilizar el canal 5. Cuando no está recibiendo ni enviando información, el módulo consume 13,4mA.



Ilustración 12 Módulo DWM1000 sin carcasa [11]

También cuenta con funciones "SLEEP" y "DEEPSLEEP", con pines habilitados para activar estos estados. En los modos de sueño, el módulo tiene las funciones mínimas activadas para estar alerta a la hora de enviar o recibir pulsos, reduciendo el consumo a mínimos.

En el modo "SLEEP", el módulo consume 0,55mA, mientras que en el modo "DEEPSLEEP" es de 0,2mA.

Para comunicarse con otros integrados y gestionar las comunicaciones UWB, este módulo tiene pines SPI disponibles y configurables según el modo de comunicación SPI que se quiera. Por defecto el modo 0 (Polo y Fase son 0), ya que los pines de selección están internamente en "PULL LOW". En la siguiente tabla se explican brevemente los modos de SPI.

Tabla 2 Modos de funcionamiento del SPI. [11]

GPIOS (POL)	GPIOS (PHA)	SPI Modo	Description (Master/Host Point of View)
0	0	0	El reloj empieza en bajo y los datos se muestrean en la subida del pulso (al inicio del pulso).
0	1	1	El reloj empieza en bajo y los datos se muestrean en la bajada del pulso (al final del pulso).
1	0	2	El reloj empieza en alto y los datos se muestrean en la bajada del pulso (al inicio del pulso).
1	1	3	El reloj empieza en alto y los datos se muestrean en la subida del pulso (al final del pulso).

Por defecto, el módulo DW1000 no tiene implementados algoritmos de medidas de distancia, pero las funciones para guardar marcas de tiempo de transmisión y recepción están específicamente preparadas para calcular la distancia mediante TWR.

Las velocidades de transmisión que puede utilizar el DW1000 son de 110kbps, 850kbps y 6,8Mbps, y las longitudes de preámbulo que dispone son de 64, 128, 256, 1024, 1536, 2048 y 4096. También soporta los canales del 1 al 7, sin incluir el sexto, recomendándose una serie de códigos para cada canal como se ve en la tabla 3 [12].

Tabla 3 Configuración de código de preámbulo para cada canal. [12]

Canal	Códigos para PRF de 16MHz	Códigos para PRF de 64MHz
1	1, 2	9, 10, 11, 12
2	3, 4	9, 10, 11, 12
3	5, 6	9, 10, 11, 12
4	7, 8	17, 18, 19, 20
5	3, 4	9, 10, 11, 12
7	7, 8	17, 18, 19, 20

Respecto al funcionamiento del módulo en la transmisión, desde el modo de reposo comienza escribiendo el mensaje con una forma mostrada en la ilustración 4 y configura los parámetros de transmisión (PRF, longitud de preámbulo y velocidad de transmisión).

Una vez generado el mensaje se activa el modo de transmisión y envía señales UWB con el mensaje, hasta que el final de mensaje se envía y se vuelve al modo de reposo o se indica al módulo de entrar en modos de bajo consumo.

En el caso de la recepción de mensajes es más complejo, ya que una vez el módulo está configurado con los parámetros de recepción adecuados y empieza a recibir señales UWB, debe seguir esta serie de pasos:

- Buscar el preámbulo que cumpla las condiciones preestablecidas y, una vez detectado, guardarlo. Hay un modo de detección de preámbulo, llamado "SNIFF", en el que se buscan muestras regularmente del preámbulo para reducir el consumo.
- Guardar el indicador de inicio de mensaje. Si la velocidad de transmisión es de 110kbps, el indicador contiene 64 símbolos, mientras que si hay otra velocidad este tendrá 8 símbolos.
- Finalmente se recogen los símbolos de información y se demodulan para guardarlos o enviarlos por SPI.

En cada una de las fases de recepción se puede establecer un tiempo límite en el que, si no se reciben los datos correspondientes, se vuelve a la posición de reposo.

Para asegurar que el mensaje se envía y recibe correctamente es importante calibrar los parámetros de los dispositivos, en especial el retardo de la antena para corregir errores de tiempo a la hora de medir las distancias entre dispositivos.

En la calibración se tiene en cuenta el canal, PRF y la potencia del receptor, tal como se muestra en la tabla 4 [12]. Para calibrar el retardo de la antena primero se configuran los dispositivos de acuerdo con la aplicación que va a realizar. Después, se sitúa el transmisor y receptor a calibrar a la distancia recomendada de calibración y se toman medidas de distancia con el algoritmo TWR, ajustando el retardo de la antena del receptor en función de los resultados obtenidos.

Tabla 4 Configuración de la calibración de antena. [12]

Canal	Potencia del receptor (PRF 16MHz) (dBm/MHz)	Potencia del receptor (PRF 64MHz) (dBm/MHz)	Distancia de calibración (PRF 16MHz) (m)	Distancia de calibración (PRF 64MHz) (m)
1	-108	-104	14,75	9,3
2	-108	-104	12,9	8,14
3	-108	-104	11,47	7,24
4	-104	-104	8,68	8,68
5	-108	-104	7,94	5,01
7	-104	-104	5,34	5,34

Otras recomendaciones que se dan respecto a la configuración del módulo es el uso de diferentes longitudes de preámbulo para las velocidades de transmisión, siendo las recomendadas:

- Para 6,8Mbps utilizar 64, 128 o 256 símbolos.
- Para 850kbps utilizar 256, 512 o 1024 símbolos.
- Para 110kbps utilizar 2048 o 4096 símbolos.

Tener en cuenta que, mientras mayor longitud de preámbulo mejor precisión y distancia de transmisión, pero más uso de espacio aéreo y más consumo, y a mayor velocidad de transmisión menor es la distancia de transmisión, pero se puede enviar más información. Las recomendaciones plantean un equilibrio entre distancia y consumo.

4.4. PLATAFORMAS DE DESARROLLO

El microcontrolador, o μC , es la parte más importante dentro de un dispositivo, ya que se encarga de gestionar toda la información y transformarla en los datos que necesitamos, es el cerebro del dispositivo. Este elemento permite que muchos dispositivos de la actualidad tengan, en un espacio reducido, gran cantidad de funcionalidades: adquirir datos, procesar información, activar accionamientos o comunicarse con otros dispositivos similares, entre otros. [17]

Estos μC se implementan generalmente dentro de sistemas embebidos, aquellos que se diseñan para realizar una serie de funciones específicas, encontrando todos los componentes necesarios en una sola placa base. [18]

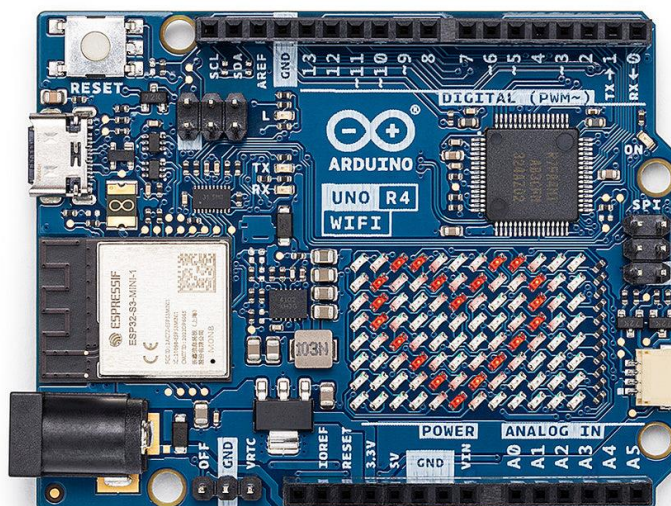


Ilustración 13 Placa de desarrollo Arduino Uno R4 Wi-Fi. [25]

Las placas de desarrollo son sistemas embebidos muy utilizados en el ámbito de la educación y la investigación porque otorgan gran abanico de posibilidades de desarrollo, generalmente a bajo coste y con pocos requisitos.

Una de estas placas es el Arduino Uno, placa de desarrollo de hardware libre basada en el μC ATMEGA328P, aunque en su última versión utiliza un microcontrolador ESP32-S3 como se ve en la fotografía superior [25]. Otras placas de desarrollo son las Raspberry Pi o, como se desarrolla en el siguiente apartado una de ellas, las ESP32-DevKit del fabricante Espressif.

4.4.1. Placa ESP32-C3-DevkitC-02

El ESP32-C3 es un microcontrolador SoC (del inglés "System on Chip") compuesto por un microprocesador tipo RISC-V de 32 bit con frecuencia de hasta 160MHz, con soporte para conectar Bluetooth de baja potencia (BLE) y Wi-Fi de 2,4GHz y capacidad de conexión por UART, SPI, I2C, como se muestra en la ilustración 14.

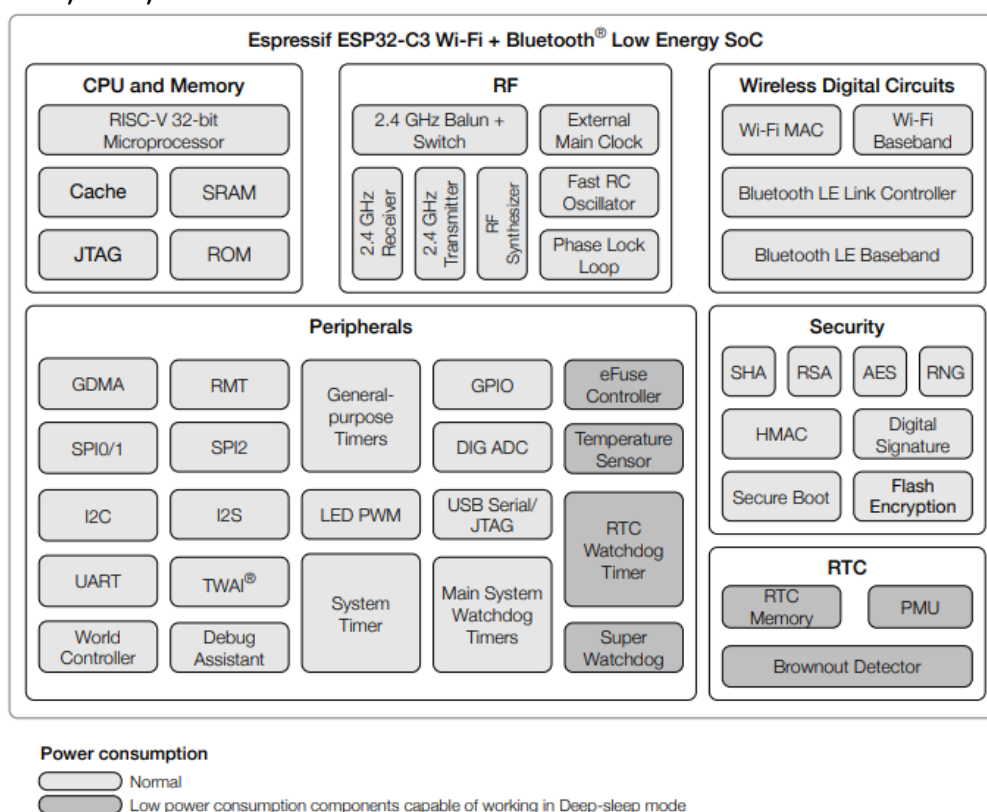


Ilustración 14 Diagrama de bloques del ESP32-C3. [13]

Es muy común utilizar este tipo de SoC para aplicaciones de bajo consumo gracias a sus diferentes modos de reposo y sueño. En la tabla 5 se muestran los valores de consumo en diferentes modos.

Este SoC se encuentra generalmente dentro de módulos, como el ESP32-C3-WROOM-02, que incluye una antena para utilizar las funciones de Wi-Fi y BLE, además de un cristal de 40MHz y un chip de flash SPI de 4MB, aunque hay modelos con 8MB.

La placa de desarrollo ESP32-C3-DevkitC-02 [13] contiene un módulo ESP32-C3-WROOM-02, un regulador de tensión (LDO por sus siglas en inglés) de 5V a 3,3V, un chip de puente UART a USB para poder conectarlo al ordenador y programarlo fácilmente y pines para conectarse a una placa blanca u otros dispositivos.

Tabla 5 Consumos de corriente del ESP32-C3 [13]

Modo	Consumo máximo (mA)
Módulo RF operativo, transmitiendo.	335
Módulo RF operativo, recibiendo.	87
Módulo RF desactivado y CPU trabajando.	28
Módulo RF desactivado y CPU en reposo.	21
Sueño ligero. (SPI y Wi-Fi en bajo consumo y los GPIO de alta impedancia)	0,13
Sueño profundo. (Solo activo reloj y memoria RTC)	0,005
"Power-off". (Chip apagado, con CHIP_EN en bajo)	0,001

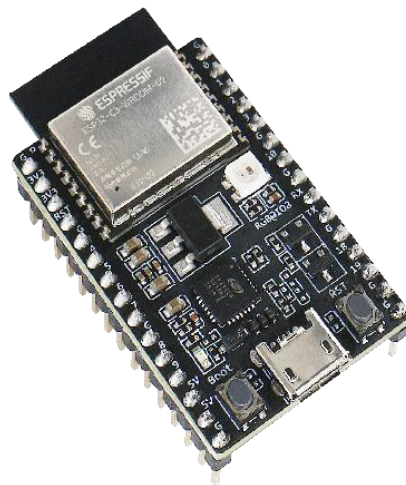


Ilustración 15 Placa de desarrollo ESP32-C3-DevkitC-02. [13]

La conexión SPI de la placa puede cumplir el rol de maestro como esclavo, teniendo la posibilidad de ser Dual o Quad SPI. Los pines de conexión son los GPIO 4 para el reloj (CLK), 5 entrada del maestro (MISO), 6 salida del maestro (MOSI) y 7 selección de chip (CSn).

5. DESARROLLO

5.1. DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS

Este es el primer paso para realizar el ensayo de posicionamiento, y se establecen las necesidades que los dispositivos utilizados deben satisfacer y, sobre estas, se realizará un prototipo robusto capaz de obtener resultados fiables.

Se tienen que diseñar y montar cuatro dispositivos capaces de comunicarse con tecnología UWB para medir la distancia entre ellos. Además, esta medida de distancia obtenida en la comunicación debe poder almacenarse para calcular la posición del dispositivo móvil.

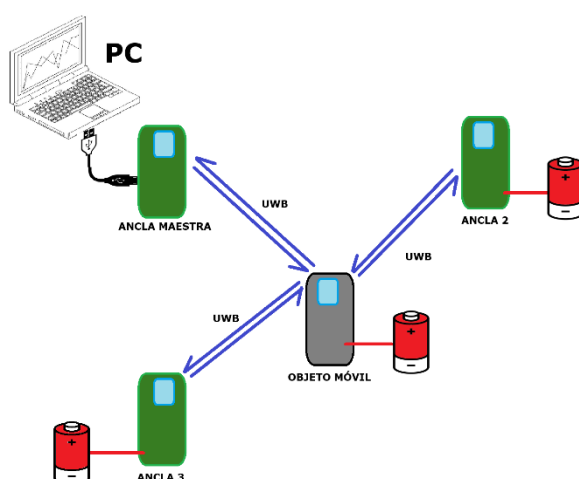


Ilustración 16 Representación del ensayo de posicionamiento.

Todos los dispositivos deben ser capaces de conectarse a un PC para poder ser programados, además de tener una forma de alimentación externa, como puede ser una batería, ya que no siempre estarán conectados al PC. Se plantea que los dispositivos trabajen en un sistema similar al de la ilustración 16, esquema sinóptico del ensayo de posicionamiento.

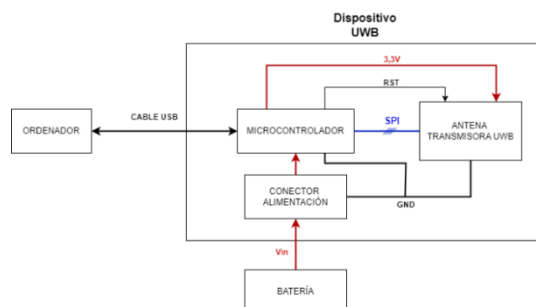


Ilustración 17 Esquema de conexión con cable USB.

Se busca que el diseño de las anclas y el objeto móvil sea el mismo para reducir complejidad, teniendo únicamente diferencias en el programa incorporado en cada dispositivo para cumplir el rol asignado dentro del sistema. Para ello, se plantearon dos diseños, como se puede ver en las ilustraciones 17 y 18.

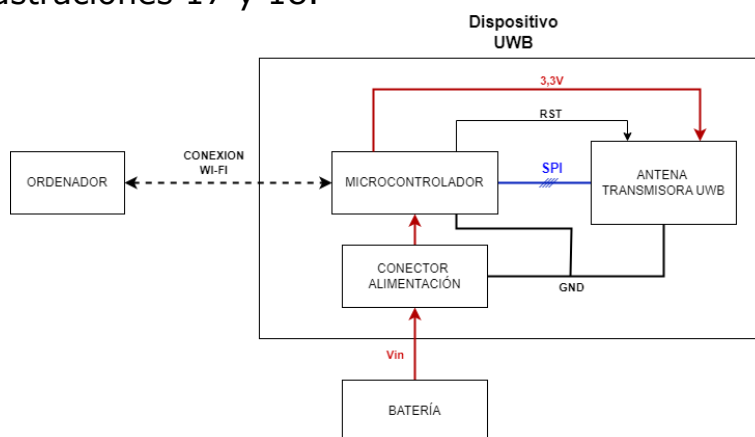


Ilustración 18 Esquema de conexión con Wi-Fi.

Finalmente, el diseño de la ilustración 17 es el elegido, ya que elimina los inconvenientes que pueden aparecer al enviar datos con una red inalámbrica, entre los que se encuentra el tiempo de envío superior y la posible pérdida de información en el proceso, aunque es una forma de enviar información a considerar en el futuro.

5.1.1. Dispositivo de integración modular.

Para poder montar físicamente el diseño presentado, conocidas las funciones a realizar en ensayo, se tienen que elegir los componentes que van a formar el dispositivo.

Tras realizar un análisis de los diferentes fabricantes de módulos y antenas transmisoras con tecnología UWB se optó por utilizar el módulo DWM1000 del fabricante Qorvo, ya que es la opción que más facilidades entrega a la hora de realizar el trabajo porque hay muchos recursos sobre este módulo, incluyendo librerías en el entorno de desarrollo Arduino IDE, el cual se utilizará durante todo el trabajo.

Para programar esta antena es necesario tener un dispositivo capaz de comunicarse con la misma. Se descartó la opción de programarlo directamente desde el PC porque finalmente el dispositivo tendría una funcionalidad muy limitada, por lo que se optó por utilizar un microcontrolador. La primera opción fue un ESP32, ya que son fácilmente programables y hay una amplia gama que se puede ajustar a las necesidades del dispositivo. Entre todos los productos, se decidió utilizar la placa de desarrollo ESP32-C3-DevkitC-02, que tiene incorporado el microcontrolador ESP32-C3.

Gracias al LDO incorporado en la placa, esta misma puede alimentar al módulo DWM1000 a la tensión adecuada de 3,3V. La placa de desarrollo se puede conectar con el módulo mediante SPI y conectarse a un PC mediante USB pudiendo programarse y mandar datos por el UART o puerto serie.

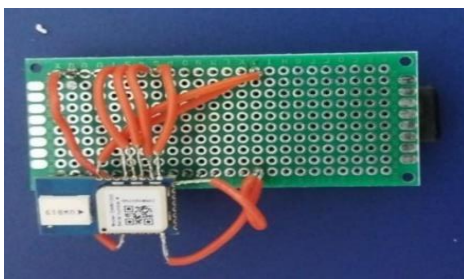


Ilustración 19 Dispositivo interconectado por soldadura de cables.

Para conectar el módulo con la placa, en una primera aproximación se optó por conectarlos entre sí mediante la soldadura de cables a los pines de la palca de desarrollo y, posteriormente, a los pines del DWM1000. El resultado de realizar la soldadura se puede ver en las ilustraciones 19 y 20.



Ilustración 20 Parte trasera del dispositivo. ESP32 y alimentación.

El montaje se realizó siguiendo las indicaciones del fabricante de la antena respecto a la conexión de esta a un microcontrolador, teniendo en cuenta que ciertos pines no era necesario conectarlos porque los programas a utilizar no necesitan enviar ni recibir información de ellos. A continuación, se muestra el esquema del fabricante.

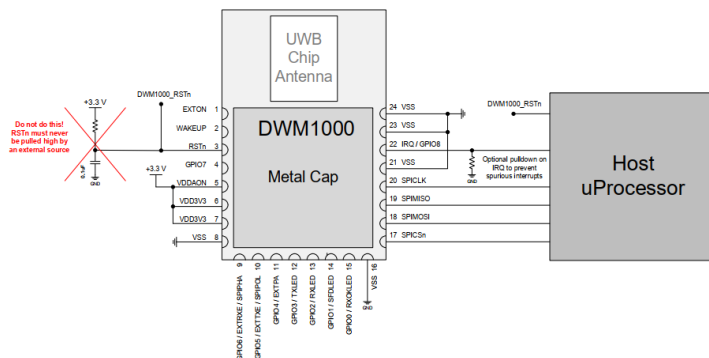


Ilustración 21 Esquema de conexión de la antena por el fabricante. [11]

Se intentó en todo momento hacer que la antena UWB tuviera espacio para evitar interferencias con la placa de desarrollo, al igual que se buscó dejar espacio a la antena Wi-Fi de la placa ESP32, pero los resultados obtenidos en diferentes pruebas de verificación no eran satisfactorios, ya que la antena sufría cambios de posición al no estar conectada rígidamente, moviéndose siempre al mínimo contacto con el dispositivo.

5.1.2. Diseño de shield para la antena DWM1000

Al ver que el montaje con soldadura de cables era complejo, teniendo que evitar cortocircuitos y falsas conexiones, además de comprobar que los resultados de pruebas hechos con estos dispositivos no eran aceptables, se buscó otro diseño alternativo para los dispositivos.

Como se tenía una placa de desarrollo, se decidió hacer un shield o escudo que incorporase la antena DWM1000 y un medio de conectar una alimentación externa a la placa. Esta opción resultó ser acertada, ya que permite conectar de forma sencilla los módulos entre sí, sin la complicación del trabajo manual, permitiendo que la antena no sufra cambios al situar el dispositivo en una posición para hacer las pruebas.

Para fabricar el shield primero se hizo un diseño electrónico en KiCad, basado en las indicaciones del fabricante y adaptándolas al uso que recibirán los dispositivos, añadiendo los medios de alimentación externa mediante un conector sencillo de dos pines. En la ilustración 22 se puede ver este diseño.

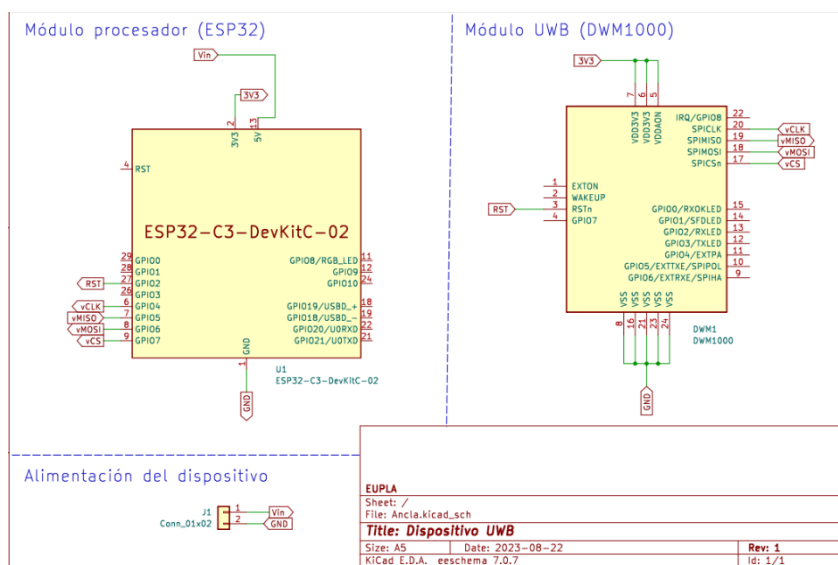


Ilustración 22 Diseño electrónico del shield.

Se prefiere alimentar la antena a través de la salida 3,3V de la placa de desarrollo, ya que la batería elegida otorga 3,7V de tensión, lo que es mayor al valor medio de alimentación que aparece en el datasheet.

Con el diseño electrónico listo, el siguiente paso es elaborar el diseño de PCB que permitirá fabricar el shield. El proceso es sencillo porque las conexiones son las necesarias para asegurar el funcionamiento de los dispositivos. Se tuvo en cuenta que la antena DWM1000 debe tener una zona libre para evitar interferencias, como se puede ver en la ilustración 23.

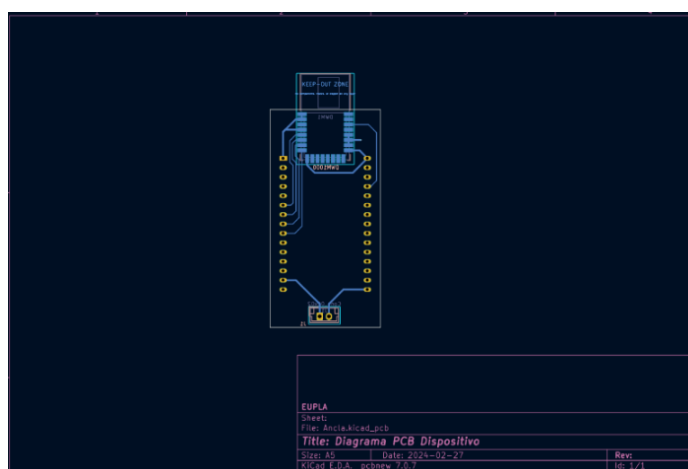


Ilustración 23 Diseño PCB. Cara frontal con DWM1000.

En cambio, y como se ve en la ilustración 24, no se consideró dejar el espacio libre para la antena Wi-Fi de la placa ESP32 porque no se pretendía utilizar conexión Wi-Fi o Bluetooth durante el ensayo. En un futuro se podría tener en cuenta el uso de otras redes inalámbricas y habilitar un espacio para esta antena.

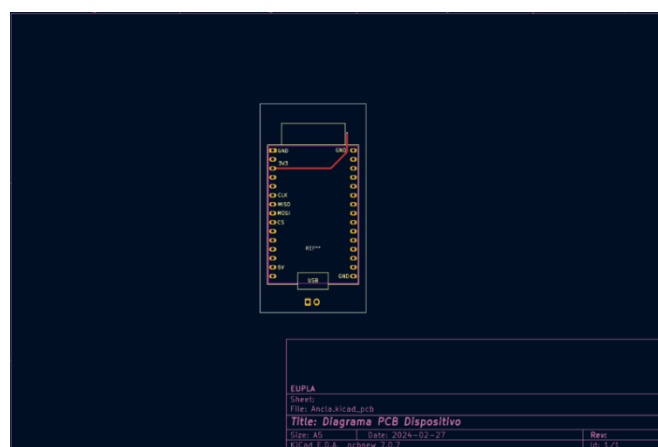


Ilustración 24 Diseño PCB. Cara trasera con ESP32.

El tamaño de las pistas utilizado en el diseño de la PCB atiende a una serie de recomendaciones de diseño elementales, teniendo un tamaño de pistas de 0,25mm para las pistas de comunicación SPI y la pista de RST. Para las pistas de alimentación se utiliza un tamaño de mayor, de 0,5mm.

Esto se debe a que la alimentación requiere de mayor tamaño de pista para que la corriente pase correctamente, mientras que la comunicación SPI no tiene un consumo de corriente tan grande, pudiendo reducir su tamaño.

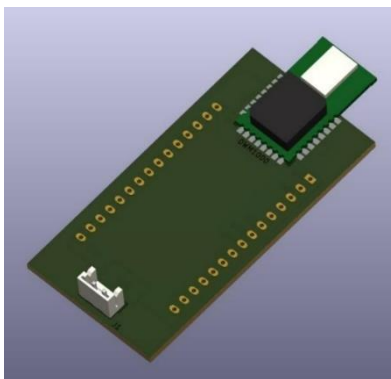


Ilustración 25 Modelo 3D del shield. Parte frontal.

Se tuvo en cuenta que la placa debe conectarse al ordenador para ser programada, por lo que el conector de alimentación se situó en la parte frontal evitando obstaculizar al cable USB en la conexión de la placa de desarrollo. En la ilustración 25 se puede ver un modelado 3D del dispositivo.

Con el diseño del shield completado se mandó a fabricar y en las siguientes ilustraciones se puede ver el resultado de conectar el shield a la placa de desarrollo, el cual tiene una conexión de la antena más fiable que el prototipo anterior, requiriendo apenas tiempo de montaje, ya que con encajar los pines de la placa de desarrollo en los orificios del shield el dispositivo funciona sin complicaciones.

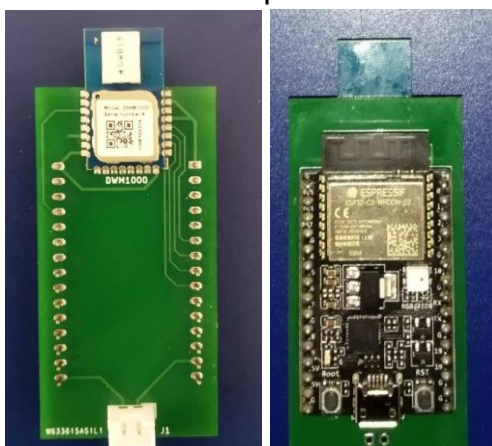


Ilustración 26 Shield montado con la placa de desarrollo.

Para evitar que el entorno perturbe los dispositivos es necesario protegerlos con alguna carcasa, pero en este caso la protección no debe interferir en la transmisión de señales UWB, por lo que el material protector debe ser permeable a las señales de radiofrecuencia. Para ello se optó por una solución sencilla, la cual es una caja de polipropileno transparente, la cual tiene una tapa que permite el acceso al interior para guardar el dispositivo y acomodarlo de la forma más sencilla posible.



Ilustración 27 Fotografías del dispositivo con la carcasa protectora.

Como se puede ver en la ilustración 27, se le realizó un pasamuros para así poder conectar el cable de USB sin tener que sacar el dispositivo de la protección. Se aplicó también una cinta de doble cara a la placa y la batería para sujetar el dispositivo a la carcasa, evitando movimientos innecesarios, que esté colgando o que se fuerce la conexión entre el dispositivo y la batería.

A todas las carcasas se les asignó un cartel indicando el puerto serie del dispositivo, que se encontró con el Arduino IDE al conectar cada dispositivo al PC, además del rol que cumplirán en el ensayo de posición. Esto permite recordar el código programado en cada dispositivo y facilitar la modificación de sus programas.

5.1.1. Consumo y autonomía de los dispositivos

La alimentación elegida para los dispositivos que no estarán conectados al PC de interés, ya que de ella depende el tiempo que estén operativos. La solución elegida ha sido utilizar baterías de litio como las que se ven en la ilustración 28, con una capacidad de 460mAh y una tensión de trabajo de 3,7V.

Ahora bien, es necesario conocer la autonomía que tendrán los dispositivos con dichas baterías para asegurar que pueden estar conectados durante todo el transcurso del ensayo de posicionamiento.



Ilustración 28 Batería recargable utilizada.

Para conocer la autonomía se atiende a los datos de consumo de cada módulo que los fabricantes aportan. En las siguientes tablas se muestran los valores de consumo de cada módulo, en diferentes modos de funcionamiento.

Tabla 6 Valores de consumo de la placa de desarrollo ESP32

Dispositivo	Modo SLEEP	Modo IDLE	Modo de operación	Modo Wi-Fi TX
ESP32-C3 Devkit-02	0,13 mA	25 mA	41,8 mA	345 mA

Tabla 7 Valores de consumo de la antena DWM1000

Dispositivo	Modo DEEP SLEEP	Modo IDLE	Modo RX	Modo TX
DWM1000	0,2 mA	13,4 mA	140 mA	160 mA

Además de la información de consumo del fabricante, se debe entender cómo funcionan los dispositivos para tener una estimación de consumo de cada uno.

En primer lugar, el dispositivo que se utilizará como objeto móvil a obtener su posición tendrá el siguiente ciclo de funcionamiento:

- La placa de desarrollo estará en reposo (IDLE) y la antena se encontrará en estado de sueño profundo (DEEP SLEEP).
- A los 200 ms la placa de desarrollo despertará a la antena, que realizará el proceso de medida TWR, transmitiendo primero una señal de contacto, después la señal de POLL y finalmente el mensaje final. Cada pulso tiene un retardo de 1,5ms para poder tomar todos los datos correctamente.
- Una vez se ha contactado con todas las anclas, se establecerá un nuevo tiempo de reposo, atendiendo a los datos de transmisión y recepción del proceso de medida.
- Finalmente la antena volverá a entrar en estado DEEP SLEEP para repetir el ciclo.

Con el ciclo de trabajo del objeto móvil y los valores de consumo del fabricante, en un periodo de tiempo de 1 segundo, se puede conocer el consumo calculando cuantos ciclos de transmisión se realizan.

- 200ms es el tiempo de reposo del dispositivo.
- 1,5ms es el tiempo de espera hasta que se vuelve a transmitir un mensaje. En el periodo de medida TWR se envían tres mensajes habiendo entonces tres tiempos de espera, o lo que es lo mismo, la medida TWR dura al menos 4,5ms.
 - Si se realiza el proceso de medida TWR con cada una de las tres anclas disponibles en el ensayo, el tiempo de transmisión pasa a ser de 13,5ms.
 - Si se estima que el proceso dura el tres veces el tiempo anterior porque se tienen que guardar los valores de cada transmisión y las respuestas antes de transmitir de nuevo, el tiempo total que pasa el dispositivo transmitiendo pasa a ser de 40,5ms.
- Por ello, un ciclo dura 200ms de reposo y 40,5ms de transmisión, siendo un total de 240,5ms. En 1 segundo, o 1000ms, entonces se llevan a cabo aproximadamente 4 ciclos de transmisión, con una duración de 162ms, o un 16% del tiempo de funcionamiento, mientras que el 84% restante se encontrará la placa en reposo y la antena en DEEP SLEEP.

Entonces, el 84% del tiempo consumirá $25\text{mA} + 0,2\text{mA} = 25,2\text{mA}$ y el 16% del tiempo consumirá $41,8\text{mA} + 160\text{mA} = 201,8\text{mA}$. Con ello se obtiene un consumo promedio de $53,46\text{mA}$, dando una autonomía de las baterías de 8h 36min.

Hay que destacar que los datos de tiempo reservados para el proceso de guardar los datos de transmisión son conservadores con el fin de encontrar la peor situación posible.

Por otra parte, los dispositivos que se mantendrán en posiciones fijas se encontrarán la mayoría de forma constante en estado de recepción (RX) hasta que el móvil les envíe una señal de contacto, donde realizarán las transmisiones necesarias hasta que termine el proceso de medida TWR.

Teniendo esto en cuenta, se puede asumir que la palca se encuentra constantemente en modo de trabajo y la antena en modo RX, teniendo un consumo de $41,8\text{mA} + 140\text{mA} = 181,8\text{mA}$ y obteniendo una autonomía de 2h 32min. En la siguiente tabla se resume el consumo teórico de los dispositivos.

Tabla 8 Resumen tiempo, consumo y autonomía de dispositivos.

Descripción	Objeto móvil	Ancla
Tiempo DEEP SLEEP	84%	0%
Tiempo IDLE	0%	0%
Tiempo RX	0%	100%
Tiempo TX	16%	0%
Consumo DEEP SLEEP	25,2 mA	
Consumo IDLE	38,4 mA	
Consumo RX	181,8 mA	
Consumo TX	201,8 mA	
Consumo total	53,46 mA	181,8 mA
Autonomía	8h 36min	2h 32min

Ahora bien, una vez realizados los cálculos de consumo y autonomía con los valores planteados por el fabricante, se tiene que comprobar que los valores de consumo en la realidad son similares, para calcular la autonomía real de los dispositivos.

Para conocer el consumo real de los dispositivos se sigue un proceso de medida con estos pasos:

- En todos los casos se mide la corriente que circula por los dispositivos con un multímetro, tal como se detalla en la ilustración 29, conectados por USB al PC.

- Se realizará la medida de corriente con el dispositivo conectado durante 5 minutos seguidos.
- Primero se mide el consumo de la placa de desarrollo en reposo y en proceso de trabajo, con un programa que cada segundo pasa de realizar cálculos a estar en reposo.
- Después se mide el consumo del objeto móvil en funcionamiento.
- Finalmente, se mide el consumo del ancla en funcionamiento.

Con los valores medidos se elabora la tabla 9, en la que se muestran el valor mínimo y máximo de corriente registrados. Con el valor máximo se calcula la autonomía de los dispositivos, para tener el caso en las peores condiciones de consumo.

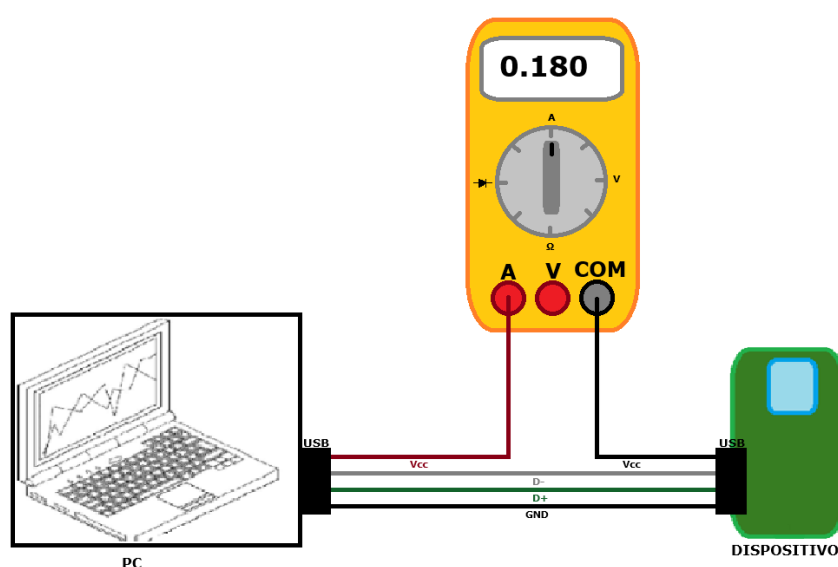


Ilustración 29 Sinóptico de la medida de consumo.

Tabla 9 Resultados de consumo y autonomía reales.

Descripción	Medida ESP32	Medida Objeto móvil	Medida Ancla
Valor mínimo de corriente	28,5 mA	28,5 mA	154,9 mA
Valor máximo de corriente	30,4 mA	41,9 mA	169,9 mA
Autonomía	15h 08min	10h 58min	2h 42min

Se puede ver que las estimaciones de consumo de la tabla 8 varían respecto a la tabla 9, siendo los datos reales de consumo inferiores, a consecuencia de que los supuestos de tiempo son incorrectos, teniendo mayor tiempo de DEEP SLEEP para el caso del objeto móvil y apareciendo tiempo de reposo en el caso del ancla.

Para conocer el valor de consumo de la antena UWB se tendría que restar el valor de consumo de la placa de desarrollo a los dispositivos. En el caso del objeto móvil, que prácticamente está en reposo todo el tiempo, el consumo sería de $33,4\text{mA} - 30,2\text{mA} = 3,2\text{mA}$ de consumo, mientras que, en el ancla, que permanece todo el tiempo en modo RX, sería de $163,8\text{mA} - 30,2\text{mA} = 133,6\text{mA}$.

Finalmente, para conocer el tiempo de autonomía real de la batería utilizada en los dispositivos se realiza la medida de descarga de la batería. Para ello, se carga por completo la batería y después se conecta a una de las anclas, midiendo cada 5 minutos la tensión que suministra la batería al dispositivo, hasta la descarga.

Los resultados se pueden comprobar en la gráfica que se encuentra a continuación, obteniendo unos valores de descarga constantes, hasta que, al llegar a los valores de 3,3V el dispositivo comenzaba a tener problemas de transmisión, llegando al punto de que no funcionaba al llegar la batería a tener 3,2V.

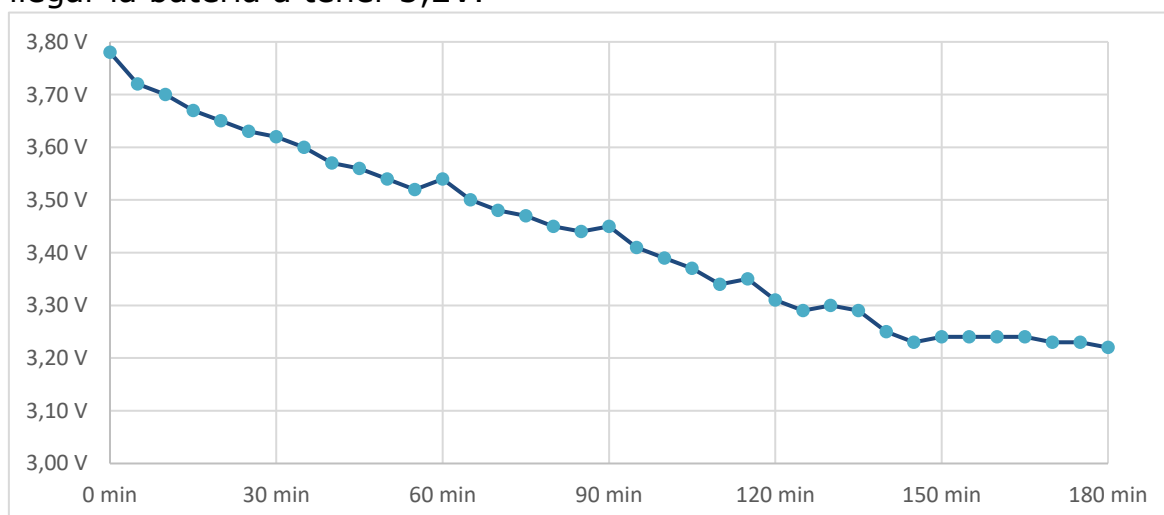


Ilustración 30 Gráfica de tensión de la batería.

Que el dispositivo deje de cumplir su cometido al llegar solamente a los 3,2V se debe a que se alimenta conectando la batería al LDO SGM2212 [14] de la placa de desarrollo, el cual tiene una tensión de dropout de 0,24V cuando regula tensiones de 3,3V. Si la tensión que se recibe es inferior a la de salida y el dropout, siendo esta los 3,2V obtenidos, no se suministra energía a la antena, dejando de transmitir.

Por ello, estos dispositivos no terminan de aprovechar completamente las baterías, pero se ha comprobado que el tiempo de funcionamiento conseguido es suficiente para realizar el ensayo. Además, el objeto móvil tendrá más autonomía que el ancla, porque su consumo es menor, pero igualmente no aprovechará al completo la batería con el diseño actual.

5.2. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL FIRMWARE

Con los dispositivos listos se deben realizar una serie de pruebas para comprobar que el funcionamiento de estos es el esperado y se puede continuar con el ensayo de posicionamiento.

En todo momento se utilizará el entorno de desarrollo Arduino IDE para programar los dispositivos teniendo como base de trabajo la librería "DW1000Ng.h", que brinda ejemplos y funciones para que un μC pueda comunicarse con el módulo DWM1000. Esta librería se encuentra en el repositorio de GitHub de la referencia [15], donde puede descargarse.

Para instalar la librería, dentro del entorno de desarrollo se debe seleccionar en la barra de tareas "Sketch" → "Include library" → "Add .zip Library" y finalmente acceder a la carpeta contenedora de la librería. Si se desea, se puede reiniciar el IDE para asegurar que la instalación es correcta y ya se puede utilizar la librería. En la ilustración 31 se puede ver la pestaña Sketch abierta con la ruta descrita.

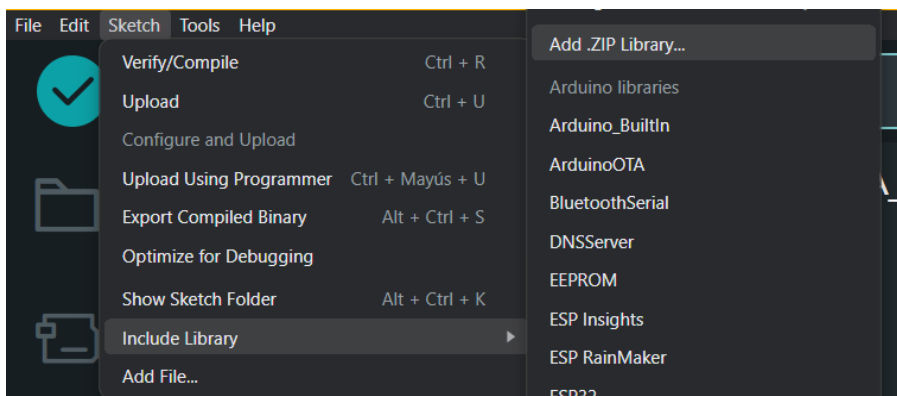


Ilustración 31 Ruta de instalación de librerías

En los siguientes apartados se verá el proceso de pruebas llevado a cabo para conseguir un firmware capaz de medir distancias entre dispositivos, las cuales se almacenarán para poder analizar los resultados obtenidos.

5.2.1. Funcionamiento intra-módulo y extra-módulo

Primero se tiene que asegurar que el propio dispositivo puede programarse y que la placa de desarrollo es capaz de comunicarse con la antena DWM1000 para poder configurarla y recoger los datos que envía y recibe.

Para ello se carga el programa de ejemplo "BasicConnectivityTest.ino", en el cual se configuran parámetros de identificación del dispositivo, como el identificador único extendido (EUI por sus siglas en inglés Extended Unique Identifier) o la dirección corta, los cuales se muestran por pantalla junto a los parámetros UWB de velocidad de transmisión, PRF y preámbulo que tiene la antena configurados por defecto.

Al realizar la prueba con los dispositivos montados mediante soldadura de cable, en algunos casos la conexión por SPI no estaba bien realizada, obteniendo errores como los que se pueden ver en la ilustración 32, donde se muestra un EUI incorrecto, ya que debería ser de FF:FF:FF:FF:FF:FF:00:00 como se programó. En este caso aparecen los datos del modelo de la antena, además de haber otros errores en los parámetros identificativos.

```
### DWM1000-arduino-receiver-test ###  
DWM1000 initialized ...  
Committed configuration ...  
Device ID: DECA - model: 1, version: 3, revision: 0  
Unique ID: 00:00:00:DE:CA:01:30:FF  
Network ID & Device Address: PAN: CA01, Short Address: 30FF  
Device mode: Data rate: 110 kb/s, PRF: 16 MHz, Preamble: 2048 symbols (code #4), Channel: #5
```

Ilustración 32 Resultado erróneo de la configuración del dispositivo.

En la ilustración 33 se pueden ver los resultados correctos de la prueba, donde aparece el modelo del DWM1000, el EUI y los parámetros identificativos configurados, además del resto de parámetros UWB por defecto del módulo. Estos resultados se dieron tanto en los dispositivos con montaje de soldadura, una vez resueltos los errores, como en los dispositivos con el shield.

```
18:34:54.657 -> Device ID: DECA - model: 1, version: 3, revision: 0  
18:34:54.657 -> Unique ID: FF:FF:FF:FF:00:00:00:00  
18:34:54.693 -> Network ID & Device Address: PAN: 0A, Short Address: 09  
18:34:54.693 -> Device mode: Data rate: 6800 kb/s, PRF: 16 MHz, Preamble: 128 symbols (code #4), Channel: #5
```

Ilustración 33 Verificación del funcionamiento del dispositivo.

Al comprobar que varios dispositivos funcionan correctamente al mostrar los datos del módulo DWM1000 y asegurarse que se pueden modificar datos de este, se continua con el proceso de pruebas para verificar el funcionamiento entre dispositivos, asegurando que son capaces de enviar y recibir datos entre sí.

Para ello se programa un dispositivo como receptor, utilizando el ejemplo "BasicReceiver.ino", y otro dispositivo como transmisor, utilizando el ejemplo "BasicSender.ino". Con estos ejemplos se puede ver por pantalla diferentes valores dependiendo del programa.

Los resultados por puerto serie que envía el transmisión son, acorde con la ilustración 34, los siguientes:

- Número del mensaje transmitido (Empieza en el 0).
- Tempo de retardo programado en el μ C para realizar el envío (en ms).
- Confirmación de que el mensaje se ha enviado.
- Marca de tiempo del envío (en μ s).
- Tiempo de transmisión del DWM1000 (en ms).

```
17:19:48.414 -> Transmitting packet ... #0
17:19:48.441 -> ARDUINO delay sent [ms] ... 12
17:19:48.441 -> Processed packet ... #0
17:19:48.441 -> Sent timestamp ... 54030.52
17:19:48.441 -> DW1000 delta send time [ms] ... 54.03
17:19:48.441 -> Transmitting packet ... #1
17:19:48.441 -> ARDUINO delay sent [ms] ... 12
17:19:48.441 -> Processed packet ... #1
17:19:48.441 -> Sent timestamp ... 77050.62
17:19:48.441 -> DW1000 delta send time [ms] ... 23.02
```

Ilustración 34 Resultado por pantalla de BasicSender.

Se puede ver que el primer mensaje tarda más que enviarse que el resto porque el dispositivo está en busca del receptor. Una vez que se ha hecho contacto con el receptor es más facil enviar mensajes, teniendo un tiempo de envío de 23 ms.

Si se mira el puerto serie del receptor aparecen, acorde con la ilustración 35, los siguientes datos:

- Número del mensaje recibido (Empieza en el 0).
- El mensaje recibido en cuestión.
- La potencia de transmisión (en dBm o dB/mW).
- La potencia de recepción (en dBm).
- La calidad de la señal.

Se puede comprobar que la potencia es muy reducida, siendo menor que la del ruido ambiental (-41 dBm). Algunas tecnologías no podrían transmitir la información correctamente, pero UWB solo transmite paquetes de datos de tamaño limitado, siendo muy útil tener poca potencia.

```
18:50:47.047 -> Received message ... #1
18:50:47.047 -> Data is ... Hello DW1000, it's #0
18:50:47.047 -> FP power is [dBm] ... -72.10
18:50:47.047 -> RX power is [dBm] ... -58.79
18:50:47.047 -> Signal quality is ... 145.90
```

Ilustración 35 Resultado por pantalla de BasicReceiver.

5.2.2. Calibración de parámetros de los módulos

A partir de los resultados del apartado anterior se asegura que los dispositivos funcionan correctamente por sí mismos y pueden comunicarse entre ellos a través de UWB.

Ahora se pueden tomar medidas de distancia entre ellos, pero los resultados obtenidos pueden no ser los esperados, como en el caso de la ilustración 36, en la que se puede ver una gráfica de medida de distancia entre dos dispositivos situados a 0,9m de distancia entre sí.

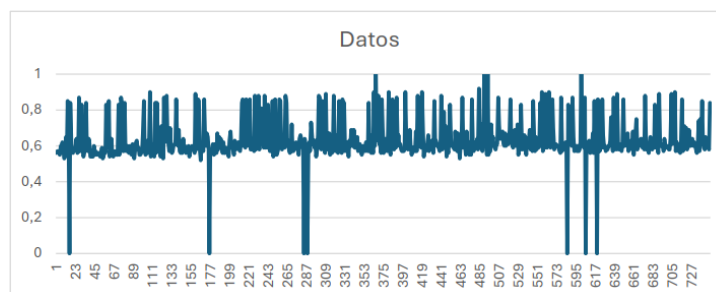


Ilustración 36 Medida de distancia con errores.

Esta gráfica muestra en su eje de ordenadas la medida de distancia obtenida, mientras que en el de abscisas se encuentra el número de muestras tomadas. Los resultados no son aceptables porque el valor promedio se encuentra por debajo del valor real, a 0,6m, además de que aparecen aberraciones en las que la medida de distancia es nula.

Para corregir que las medidas de distancia obtenidas en las siguientes pruebas no tengan aberraciones, o que los valores obtenidos no disten de los valores reales, se deben calibrar los parámetros UWB de los dispositivos.

El primer parámetro que se calibra es el retardo de la antena UWB. Al guardar las marcas de tiempo de transmisión y recepción pueden darse desvíos en las medidas, por lo que el parámetro de retardo de antena corrige estos desvíos con un valor estimado.

Por defecto, para un dispositivo UWB con canal 5 y PRF de 16MHz se toma un retardo de antena de 16.436.

Para calibrar este parámetro se tienen que situar dos dispositivos UWB a una distancia concreta según la configuración UWB de estos, donde uno es el transmisor con el valor de retardo de antena por defecto y otro es el receptor y en este último se calibra el retardo.

Entonces se realiza el proceso de medida de distancia a través del método TWR, como se puede ver en la ilustración inferior, encontrando dos posibles resultados:

- La distancia medida es la correcta, entonces se repite la prueba hasta obtener el resultado esperado cinco de veces seguidas. En este caso se guardará el valor de retardo obtenido.
- La distancia medida no es la correcta, entonces se cambia el retardo de la antena, aumentándolo si el valor obtenido de distancia es mayor al real y disminuyéndolo en el caso contrario. Este proceso se repite hasta dar con el valor correcto.

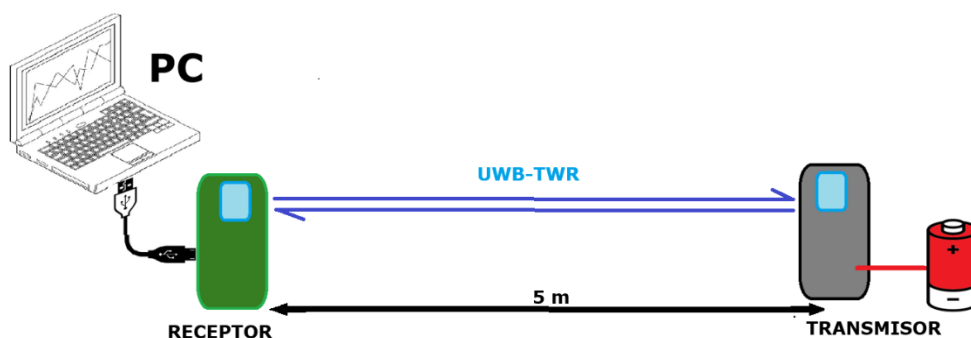


Ilustración 37 Esquema representativo del proceso de calibración.

Este proceso de calibración se encuentra en un ejemplo de la librería "DW1000Ng.h", llamado "SimpleAntennaCalibration.ino", el cual se modifica ligeramente para ir marcando los pasos que sigue el proceso y adecuarlo para calibrar dispositivos en el canal 5 y con un PRF de 64MHz.

Para realizar la calibración se sigue la siguiente metodología:

- Uno de los dispositivos es el transmisor, y se programa con el ejemplo de la librería "StandardRTLSTag_TWR.ino".
- El otro dispositivo es el receptor, y se carga en el el código modificado del programa "SimpleAntennaCalibration.ino".
- El receptor se conecta mediante USB al PC para recoger los resultados de la calibración por pantalla. También se configura de tal forma que tenga un retardo inicial de 12.000, un PRF de 64MHz, una longitud de preámbulo de 256 símbolos, una velocidad de transmisión de 850Kbps y en el canal UWB 5 con código 10.
- El transmisor se configura de la misma forma que el receptor, excepto que el retardo es el valor por defecto. Además, se sitúa a cinco metros del receptor, distancia de calibración estipulada por el fabricante utilizando estos parámetros, y se conecta a la batería externa.

Tras seguir los pasos preparativos, el programa de calibración se ejecuta y, como se ve en la ilustración 38, se obtiene un resultado de retardo de la antena de 16.482 puntos, además de ver la distancia correcta de 5,03m.

```
[L-1] -> Mensaje del tag recibido. Guardar datos.  
[L-2] -> Comenzando proceso TWR.  
[L-3] -> Resultado obtenido. Finalizar transmisión.  
[L-4] -> Medida tomada. Resultado:  
Range (Raw - Adj: 5.05 - 5.05 m RX power: -77.63 dBm Sampling rate: 0.00 Hz.  
[L-6] -> Datos de potencia del ancla.  
FP power is [dBm]: -78.69RX power is [dBm]: -77.63  
Receive quality: 208.83  
[L-1] -> Mensaje del tag recibido. Guardar datos.  
[L-2] -> Comenzando proceso TWR.  
[L-3] -> Resultado obtenido. Finalizar transmisión.  
[L-4] -> Medida tomada. Resultado:  
Range (Raw - Adj: 5.03 - 5.03 m RX power: -78.62 dBm Sampling rate: 0.00 Hz.  
[L-5.2] -> Delay de antena calibrado, resultado: 16482
```

Ilustración 38 Resultado por puerto serie de la calibración.

Al realizar la calibración del retardo de antena se hace una prueba de medida de distancia, aplicando este valor nuevo a los dos dispositivos, y situándolos a una distancia de 0,9m para replicar las condiciones de la prueba fallida.

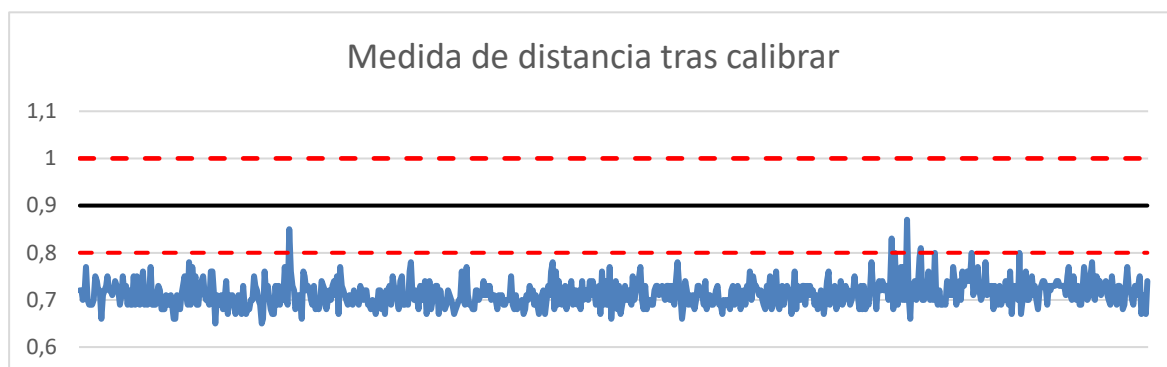


Ilustración 39 Resultados de medida de distancia con calibración.

En la ilustración 39 se puede ver el resultado de aplicar los parámetros de calibración en una gráfica, pudiendo ver que se eliminan las aberraciones pero que se mantiene el desvío en la medida de distancia, obteniendo una media de 0,7m, estando fuera de los máximos y mínimos esperados de 0,8m y 1m, mostrados en línea discontinua.

Si se tiene una medida de distancia con valor por debajo de lo esperado, como se ha explicado en el proceso de calibración, se debe reducir el valor de retardo para adecuarla al resultado normal.

Por eso se repite la prueba de medida de distancia, esta vez se cambian todos los parámetros a los parámetros de la calibración, dejando en este caso el retardo de antena con su valor por defecto.

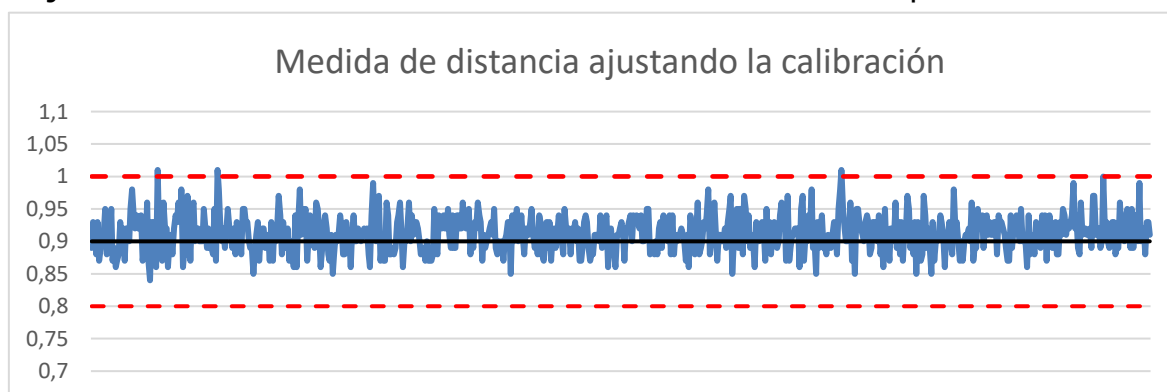


Ilustración 40 Resultados de medida tras ajustar la calibración

La ilustración 40 muestra el resultado de esta prueba, donde se encuentra que ahora no hay ni aberraciones y tampoco hay ese desvío en las medidas, teniendo un valor muy preciso.

5.2.3. Medida de distancia entre dispositivos

Tras calibrar los dispositivos y obtener unos resultados de medida adecuados, se prepara una prueba de medida de distancia siguiendo las siguientes pautas:

- Uno de los dispositivos actuará como ancla, estando en una posición fija en todo momento. Estará conectado por conexión USB a un PC, al que le enviará los datos obtenidos de medida de distancia.
- El otro dispositivo actuará como objeto móvil, cambiando de posición cada cierto tiempo y poder medir diferentes distancias durante la prueba. Estará alimentado por una batería externa.
- Ambos dispositivos se situarán en el suelo, enfrentados entre sí, con línea de visión directa entre las antenas, además de estar apoyados en un soporte de PVC de 10cm de alto, para evitar rebotes de señal por contacto con el suelo y mejorar la precisión.
- El objeto móvil comenzará a una distancia del ancla de 0,3m y, cada 5 minutos se alejará en línea recta del ancla otros 0,3m, hasta alcanzar una distancia de 3,0m.
- En todo momento, los dispositivos se estarán comunicando entre sí con UWB y se realizará el cálculo de distancia utilizando el modelo TWR.



Ilustración 41 Prueba de medida a 0,3m

Con la metodología de la prueba establecida, se tiene que el código del ancla parte del ejemplo "StandardRTLSAnchorMain_TWR.ino", modificándolo para eliminar el código que busca los resultados de las anclas B y C, además de enviar únicamente su medida de distancia por el puerto serie.



Ilustración 42 Prueba de medida a 1,2m.

En el PC se encontrará ejecutándose un código de MATLAB, que se conecta al puerto serie del ancla para recoger las medidas de distancia y guardarlas en un vector de datos para su posterior revisión, que se encuentra en el apartado de resultados.

El código del objeto móvil es el del ejemplo "StandardRTLSTag_TWR.ino", el cual se modifica para eliminar las impresiones de valores por puerto serie, ya que este dispositivo no va a estar conectado a ningún sistema de visualización de datos.



Ilustración 43 Prueba de medida a 2,1m.

Durante este apartado, en las ilustraciones 41, 42 y 43 se puede ver los dispositivos durante el proceso de medida de distancia para diferentes fases del proceso, asegurando que siempre hay línea de visión directa entre los dispositivos y se encuentran en línea recta, corroborado por la separación entre baldosas del suelo.

5.3. ENSAYO DE POSICIONAMIENTO

Con los resultados de la prueba de medida, que son satisfactorios, se puede asegurar que los dispositivos pueden medir distancias mediante UWB y se podría calcular la posición de un objeto móvil si se utilizan varios dispositivos como ancla.

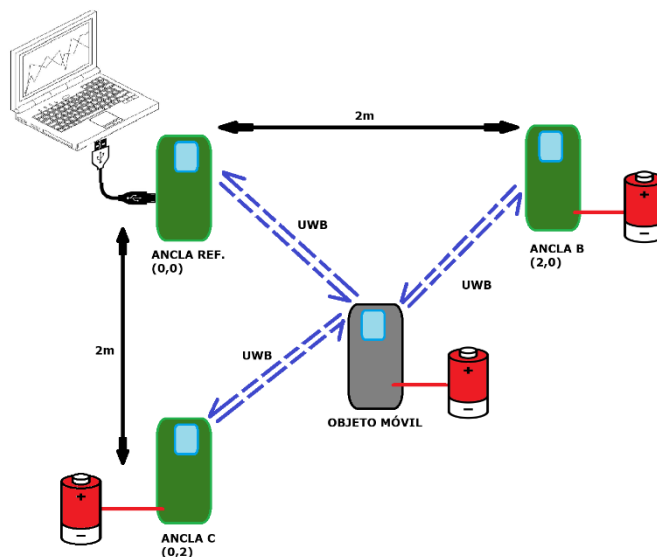


Ilustración 44 Representación sinóptica del ensayo.

Entonces se puede realizar ya el ensayo de posicionamiento del objeto móvil, planteando en primer lugar la metodología de este ensayo, la cual se plasma en la representación de la ilustración 44:

- El área en la que se realiza el ensayo es una parte del suelo de un espacio interior, que ocupa 2m^2 , en el que no hay elementos que puedan interponerse en la línea de visión de los cuatro dispositivos a utilizar.
- Los dispositivos se encuentran apoyados en el soporte de PVC utilizado en las pruebas de verificación y calibración.
- Tres de los dispositivos actuarán como anclas, situándose de forma fija en diferentes puntos del área. Esta será la situación de las anclas:
 - Una de las anclas actuará como dispositivo de referencia, tomando su posición como las coordenadas $(0,0)$ del área de ensayo.
 - Las otras dos anclas se situarán en las esquinas adyacentes a esta, siendo estas las anclas B y C, con posiciones en coordenadas $(2,0)$ y $(0,2)$ respectivamente.
 - El ancla de referencia se conectará mediante cable USB al PC, siendo la encargada de recoger todos los datos de

medida de distancia que tomen los dispositivos y enviarlos al PC para procesarlos y obtener la posición.

- Las anclas B y C no estarán conectadas a ningún otro elemento más que a su batería de alimentación externa.
- El ancla de referencia utiliza el código de ejemplo "StandardRTLSAnchorMain_TWR.ino", modificado para que envíe los datos al ordenador en el formato concreto que pueda leerlos fácilmente.
- A las anclas B y C utilizan los códigos de ejemplo "StandardRTLSAnchorB_TWR.ino" y "StandardRTLSAnchorC_TWR.ino", modificados para eliminar todo lo relacionado con mostrar por pantalla resultados, ya que no van a estar conectadas a ningún dispositivo de visualización de datos.

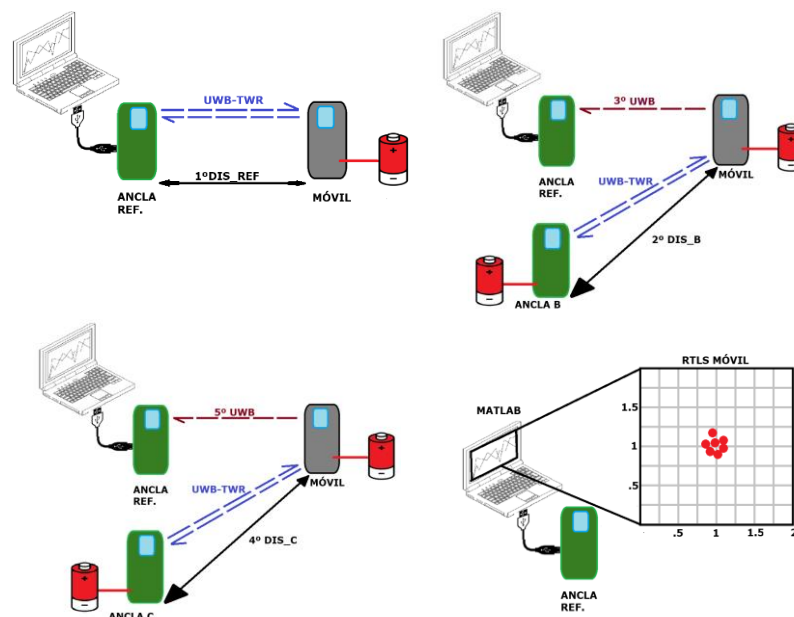


Ilustración 45 Desarrollo sinóptico del ensayo.

- El dispositivo restante actuará de objeto o dispositivo móvil, siendo el encargado de comenzar el proceso TWR de medida de distancia entre las anclas. Este proceso sigue el siguiente orden, que se representa en el conjunto de diagramas de la ilustración 45:
 - Primero se toma la medida de distancia con el ancla de referencia.
 - Después se toma la medida de distancia con el ancla B y el objeto móvil envía este valor al ancla de referencia.
 - Finalmente se toma la medida de distancia con el ancla C y el objeto móvil envía este valor al ancla de referencia.

- El ancla de referencia envía los datos de medida de distancia al PC con un formato que pueda entender para calcular la posición del objeto móvil.
- El objeto móvil llevará el código de ejemplo "StandardRTLSTag_TWR.ino" modificado que se utilizó en las pruebas de verificación y calibración.
- Una vez con los datos de medida de distancia enviados al PC, este los guarda y con ellos calcula la posición del objeto móvil, la cual muestra por pantalla en una gráfica y luego guarda los datos. El funcionamiento del código propio de MATLAB que se utiliza en el PC es el siguiente:
 - Primero, se conecta al puerto serie del ancla de referencia.
 - Una vez recibe medidas de distancia por parte del ancla, almacena los datos en un vector.
 - Después calcula la posición del objeto móvil, utilizando un modelo de trilateración que se resuelve a partir de matrices.
 - Finalmente, guarda los datos de posición obtenidos y los muestra por pantalla para ver en tiempo real el desarrollo del ensayo.
- El ensayo comenzará tras seguir estos pasos:
 - Primero, se sitúan las anclas en sus posiciones designadas y encienden las anclas B y C conectando las baterías.
 - Después se sitúa el objeto móvil en una posición fija del área de ensayo durante 5 minutos y se enciende.
 - Por último, se conecta el ancla de referencia al PC y se ejecuta el programa del mismo para comenzar a tomar medidas.
- Al finalizar los 5 minutos, se para el programa, se desconecta el ancla de referencia y se cambia la posición del objeto móvil para continuar con el ensayo al conectar de nuevo el ancla de referencia y volver a ejecutar el programa del PC. En todo momento el objeto móvil y el ancla tendrán sus anclas apuntándose la una a la otra.
- Las posiciones que ocupará el objeto móvil durante el ensayo, atendiendo a las coordenadas del área, son (1,0), (0,1), (1,1), (2,1), (1,2) y (2,2).

Con la metodología clara, se prepara el área de ensayo, asegurando que no haya objetos en ella más que los dispositivos y se realiza el ensayo. Se puede ver una fase del ensayo, donde se mide la posición del móvil en (1,1), en la ilustración 46.

En mitad de este, al revisar los datos en tiempo real se comprueba que no están saliendo los resultados esperados y hay bastante imprecisión en la posición calculada del objeto móvil.



Ilustración 46 Ensayo de posicionamiento 1, posición (1,1).

Por ello, al terminar el ensayo se modifica el código de MATLAB, haciendo que en la obtención de la posición del objeto móvil se utilice el algoritmo de Newton-Raphson para comprobar resolver la falta de precisión, ya que las medidas de distancia eran correctas.

En la ilustración 47 se puede ver la fase del ensayo donde el móvil se encuentra en la posición (1,1) para el caso donde se aplica Newton-Raphson. Esta vez se cambia de posición las anclas, ya que era más cómodo tener el PC conectado en la zona izquierda del área.



Ilustración 47 Ensayo de posicionamiento 2, posición (1,1)

Ahora, al necesitar unas condiciones iniciales de posición para poder resolver la expresión de Newton-Raphson, antes de ejecutar el programa de MATLAB se modifican los valores iniciales del vector de posición con los valores de posición del objeto móvil en cada momento, para así empezar a realizar los cálculos de manera correcta.

El código de MATLAB que recoge los datos enviados por puerto serie se asegura de la siguiente forma a qué dispositivo corresponde cada medida de la siguiente forma:

```
buffer = readline(PSerie);
data = strsplit(buffer, ",");
switch data(1)
case "M" %Distancia entre ancla maestra y tag
    Distancia(1,cM) = data(2);
    cM = cM + 1;
case "B" %Distancia entre ancla B y tag
    Distancia(2,cB) = data(2);
    cB = cB + 1;
case "C" %Distancia entre ancla C y tag
    Distancia(3,cC) = data(2);
    cC = cC + 1;
otherwise
    data = zeros;
end
```

Una vez terminado el ensayo, todos los datos se traspasan a un documento Excel para analizar los resultados obtenidos. A continuación se muestra el extracto de código que realiza el cálculo de posición por Newton-Raphson.

```
syms x y t %Variables simbólicas para resolver las ecuaciones.
F = [
t-2*posM(1)*x-2*posM(2)*y+posM(1)^2+posM(2)^2-Distancia(1,i-1)^2;
t-2*posB(1)*x-2*posB(2)*y+posB(1)^2+posB(2)^2-Distancia(2,i-1)^2;
t-2*posC(1)*x-2*posC(2)*y+posC(1)^2+posC(2)^2-Distancia(3,i-1)^2
];
J = jacobian(F,[x, y, t]);
posTag(:,i) = posTag(:,i-1) -
subs(J,[x,y,t],transpose(posTag(:,i-1)))
\ subs(F,[x,y,t],transpose(posTag(:,i-1)));
```

Siendo $\text{pos}(M, B \text{ o } C)$ el vector de posiciones de las anclas, posTag el vector de posición del objeto móvil en todo momento y Distancia el vector donde se almacena la medida de distancia de las anclas.

6. RESULTADOS

6.1. PRUEBA DE MEDIDA DE DISTANCIA

A continuación, se muestran los resultados de la prueba de medida de distancia entre dos dispositivos UWB, los cuales permitieron continuar con el proceso del trabajo para realizar el ensayo de posicionamiento. Para cada medida de distancia se expone una gráfica junto a un histograma. Finalmente se muestra una tabla con valores medios de cada medida de distancia y otros cálculos.

En la ilustración 48 se puede ver cómo los resultados a 0,3m se encuentran por debajo del valor real, habiendo bastantes medidas por debajo del umbral de error de 0,2m.

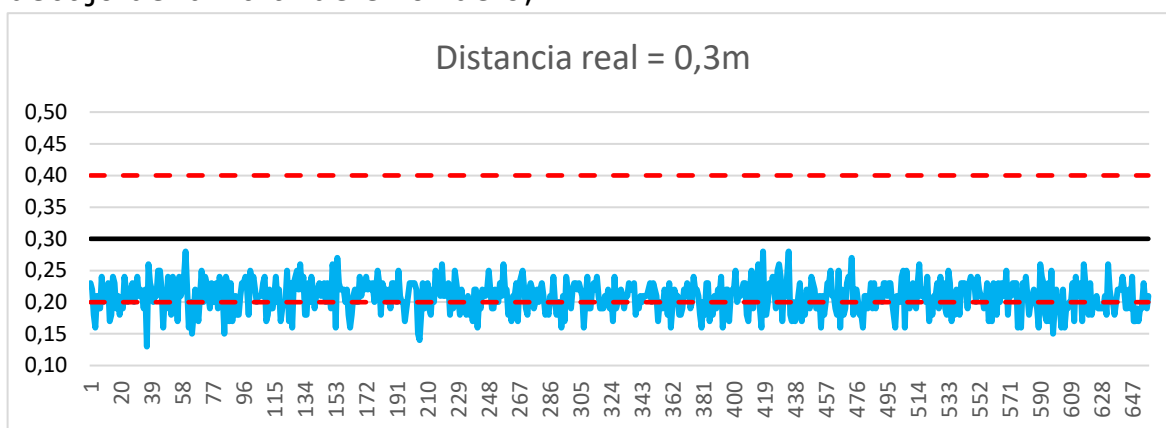


Ilustración 48 Gráfica de medida de distancia 0,3m

Revisando la ilustración 49, 278 de las medidas (representadas en color rojo) de las 657 muestras tomadas en total se encuentran por debajo del umbral de error, casi la mitad de los datos (42,01%). La distribución parece atender a una normal, con el centro en los 0,21m.

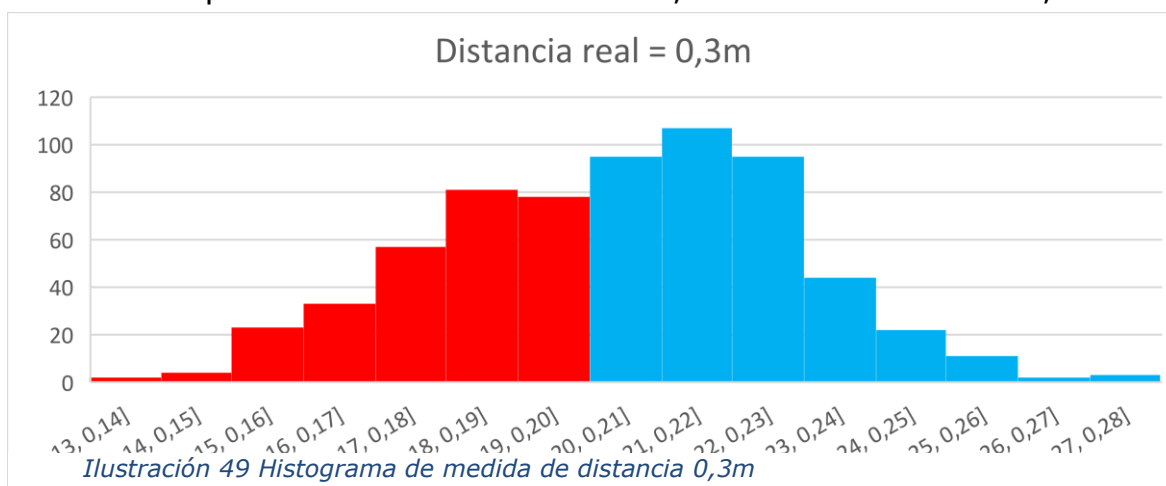


Ilustración 49 Histograma de medida de distancia 0,3m

Revisando la ilustración 50 se puede ver como los resultados al medir una distancia de 0,6m, aunque siguen estando por debajo del valor real, apenas aparecen puntos por debajo del umbral de error de 0,5m.

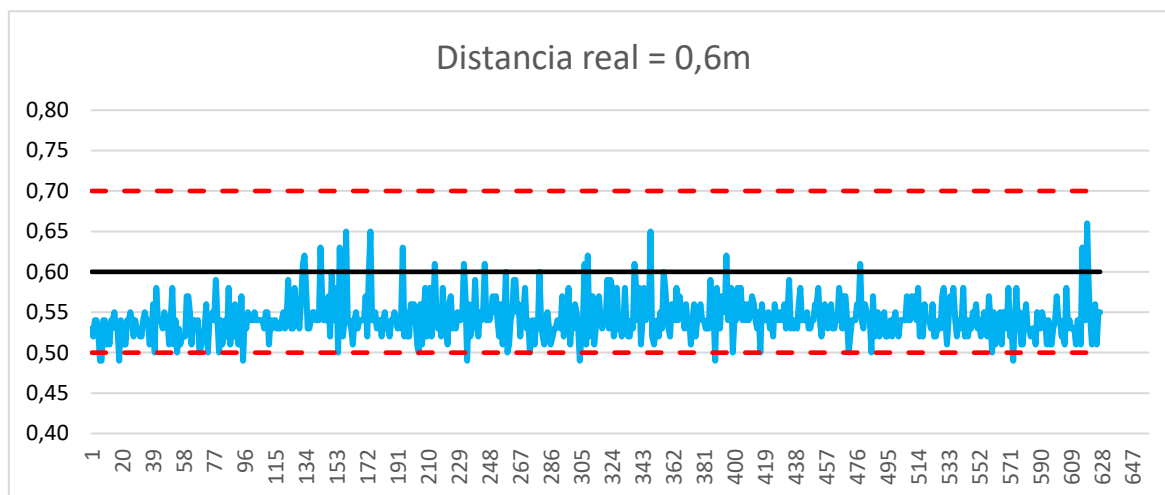


Ilustración 50 Gráfica de medida de distancia 0,6m

Como se puede ver en el histograma de la ilustración 51, estos datos por debajo del umbral son únicamente 22 de las 627 muestras, menos del 3,51% de valores. La distribución de resultados tiene gran cantidad de muestras en la medida de distancia de 0,54m (194 de 627), marcando una tendencia de medida.

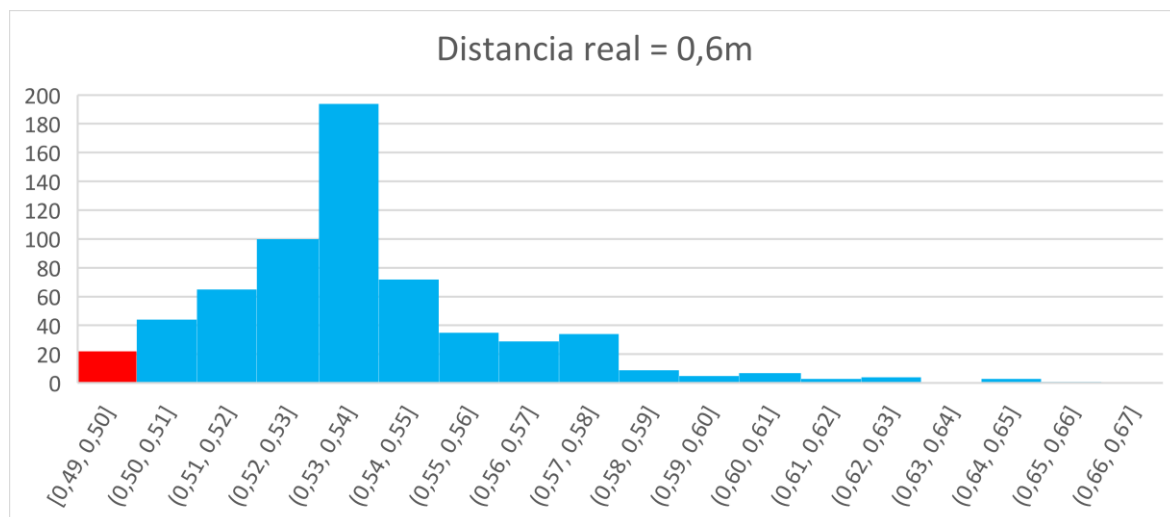


Ilustración 51 Histograma de medida de distancia 0,6m

Los resultados de medir la distancia de 0,9 metros se pueden ver en la ilustración 52, los cuales son los mejores ya que la mayoría de los datos se encuentran en el valor real y ninguno pasa los umbrales de error.

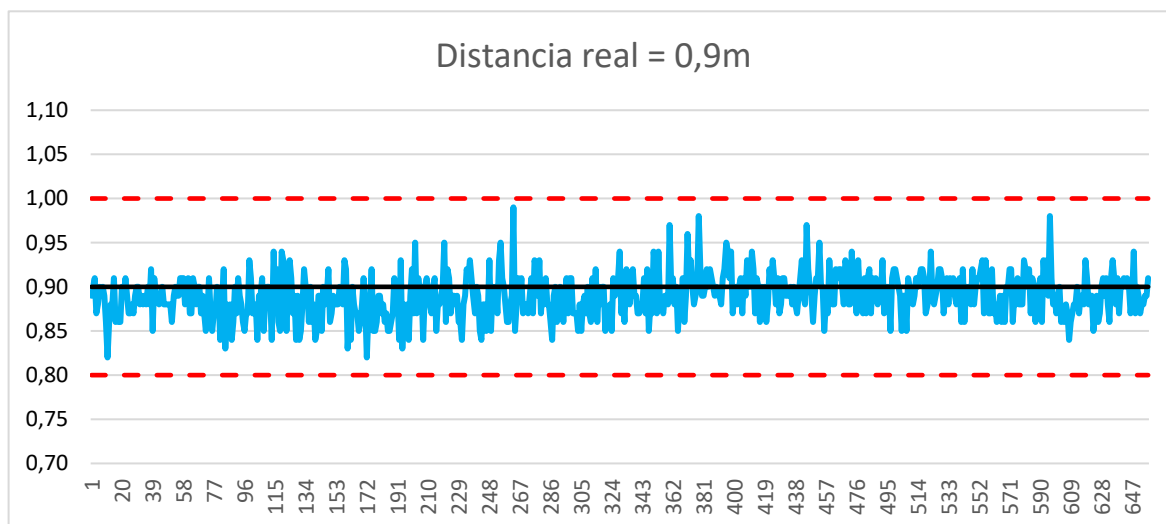


Ilustración 52 Gráfica de medida de distancia 0,9m

Revisando el histograma queda más claro todavía, sin haber ningún valor de las 657 muestras tomadas fuera del umbral de error, siendo lo más cerca una muestra con valor de 0,98m. También se puede ver claramente que los resultados forman una distribución normal, con centro en los 0,9m.

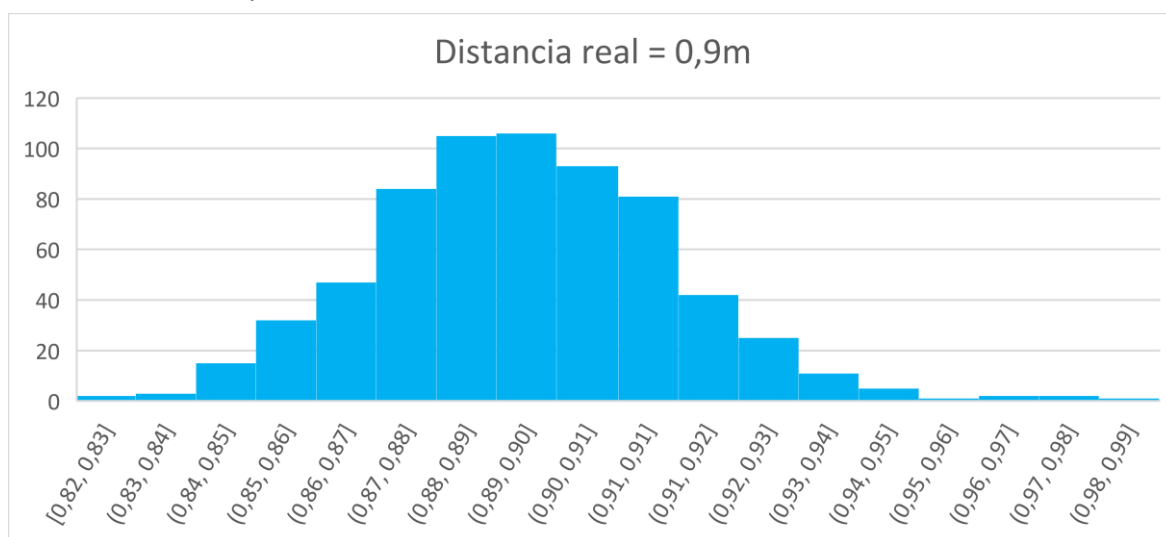


Ilustración 53 Histograma de medida de distancia 0,9m

En la ilustración 54 se encuentran las muestras de medida de distancia a 1,2m. Los resultados están por encima del valor real, encontrando algunas muestras por encima del umbral de error de los 1,3m.

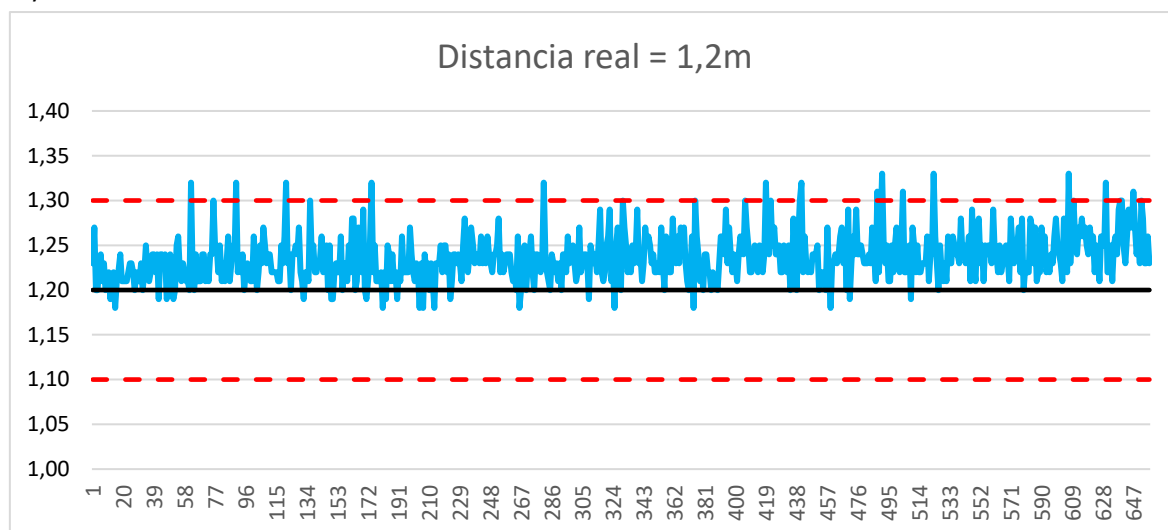


Ilustración 54 Gráfica de medida de distancia 1,2m

El histograma de la ilustración 55 muestra que estos datos por encima del umbral de error son 14 de 657 muestras (2,13%) únicamente, siendo solo casos puntuales. Se mantiene la distribución normal en este caso también, con los datos centrados en 1,23m.

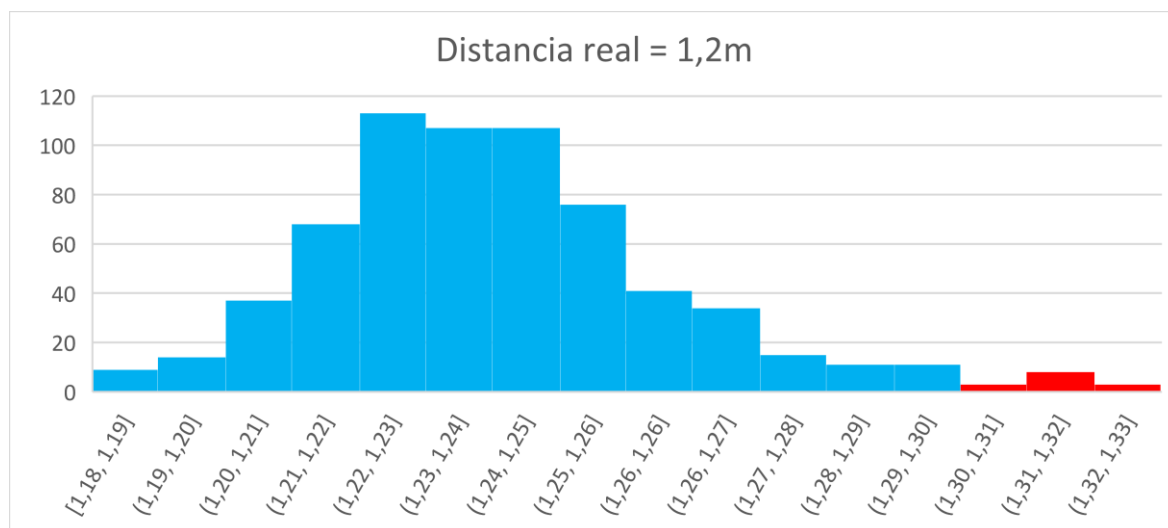


Ilustración 55 Histograma de medida de distancia 1,2m

La gráfica de la ilustración 56 se compone de los resultados de la medida de distancia de 1,5m. En este caso parece que los resultados están ligeramente por encima del valor real y vuelven a aparecer valores por encima del umbral de error, aunque aparentemente menos que en el caso de 1,2m.

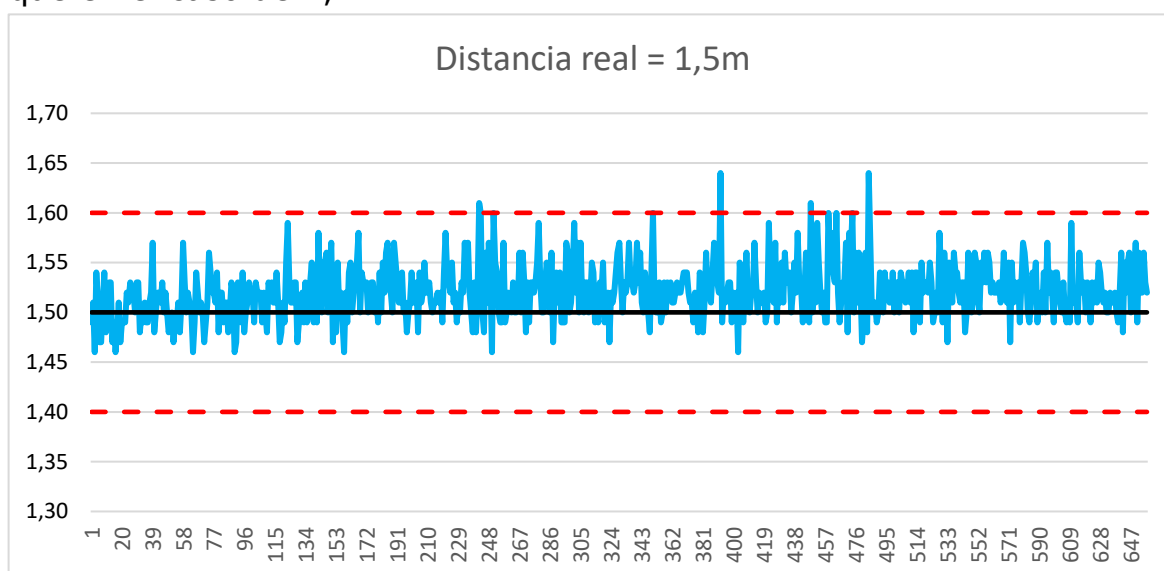


Ilustración 56 Gráfica de medida de distancia 1,5m

Revisando el histograma de estas muestras, en la ilustración 57, se puede comprobar que son menos medidas por encima del umbral que el caso anterior, siendo en este caso solo 4 de 657 (0,61%). Junto a los resultados de medida de distancia de 0,9m, este es el valor más bajo de muestras fuera del umbral de error.

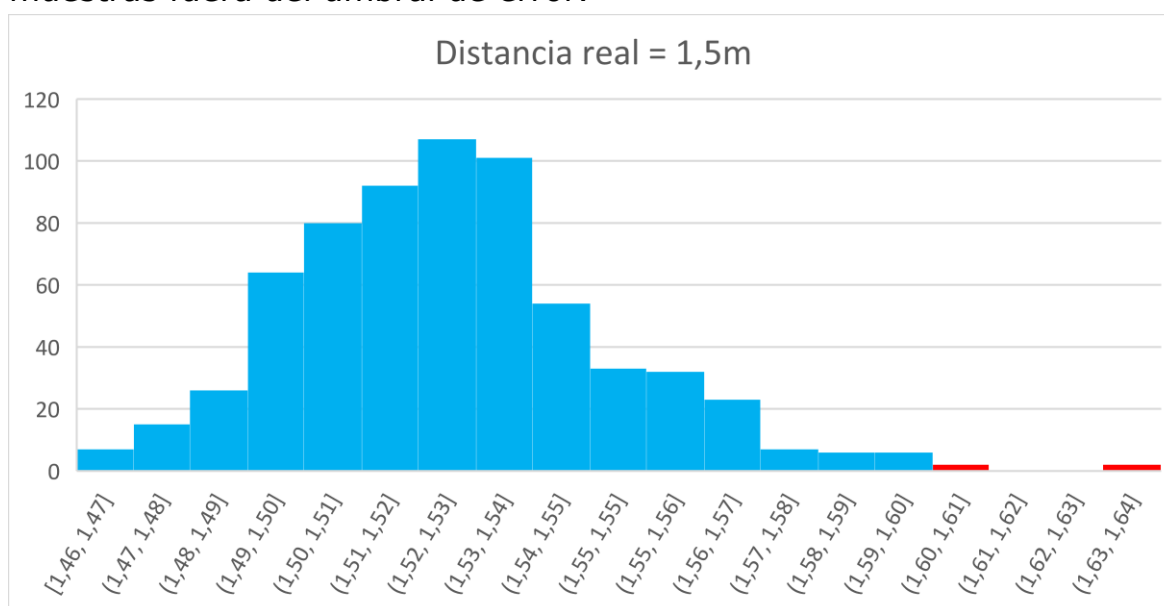


Ilustración 57 Histograma de medida de distancia 1,5m

Los resultados de medida de distancia de 1,8m se encuentran representados en la gráfica de la ilustración 58. Estos valores se encuentran por encima del valor real en su mayoría y, a diferencia de los casos de 1,2 o 1,5 no parece haber un valor de muestra muy estable, teniendo bastantes picos en toda la gráfica, donde algunos superan el umbral de error de 1,9m.

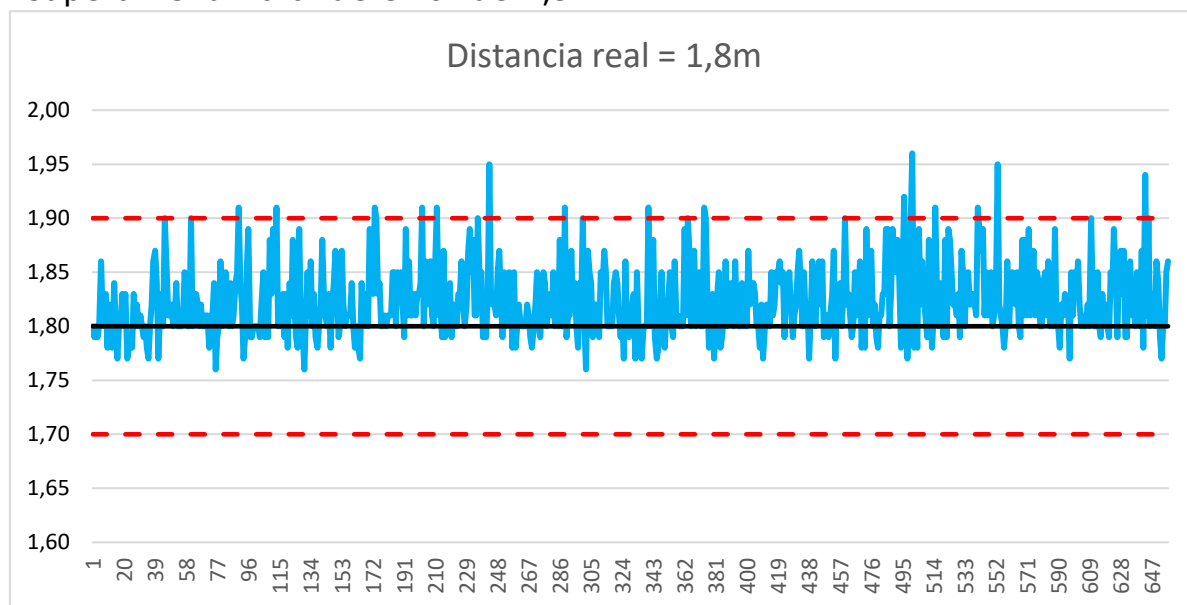


Ilustración 58 Gráfica de medida de distancia 1,8m

Revisando su histograma de la ilustración 59, se puede comprobar que la distribución de muestras parece atender a una distribución normal, pero hay picos de valores en 1,78m (135 muestras) y 1,85m (59 muestras). Respecto a las muestras de error, suponen un 3,81% del total (25 de 657).

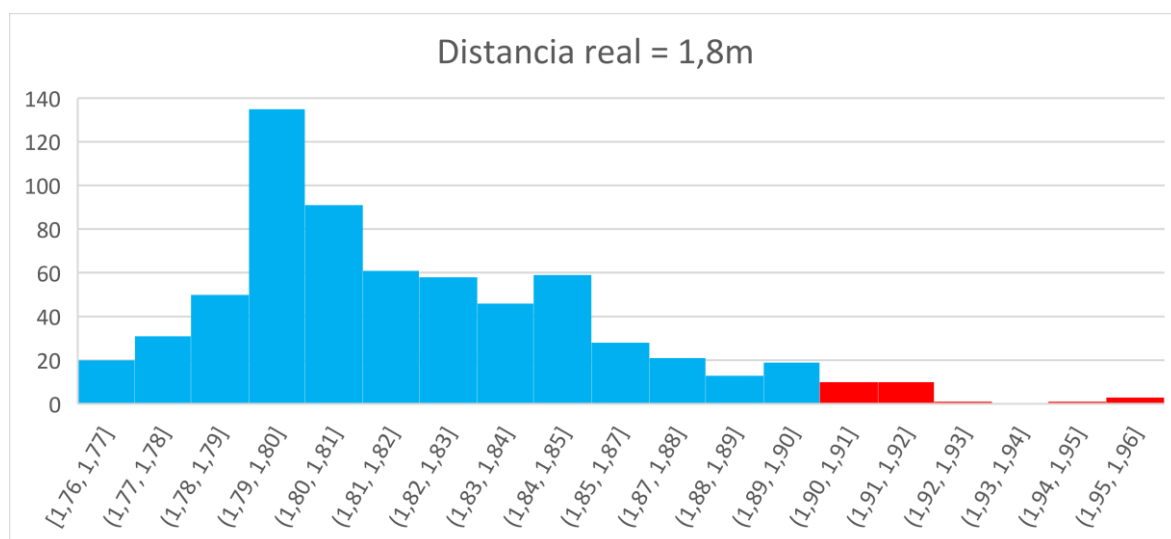


Ilustración 59 Histograma de medida de distancia 1,8m

La gráfica de valores de la ilustración 60 muestra los resultados de la medida de distancia de 2,1m, los cuales están por encima del valor real en su gran mayoría, además de tener un muestreo inestable con muchos picos y bastantes valores por encima del umbral de error.

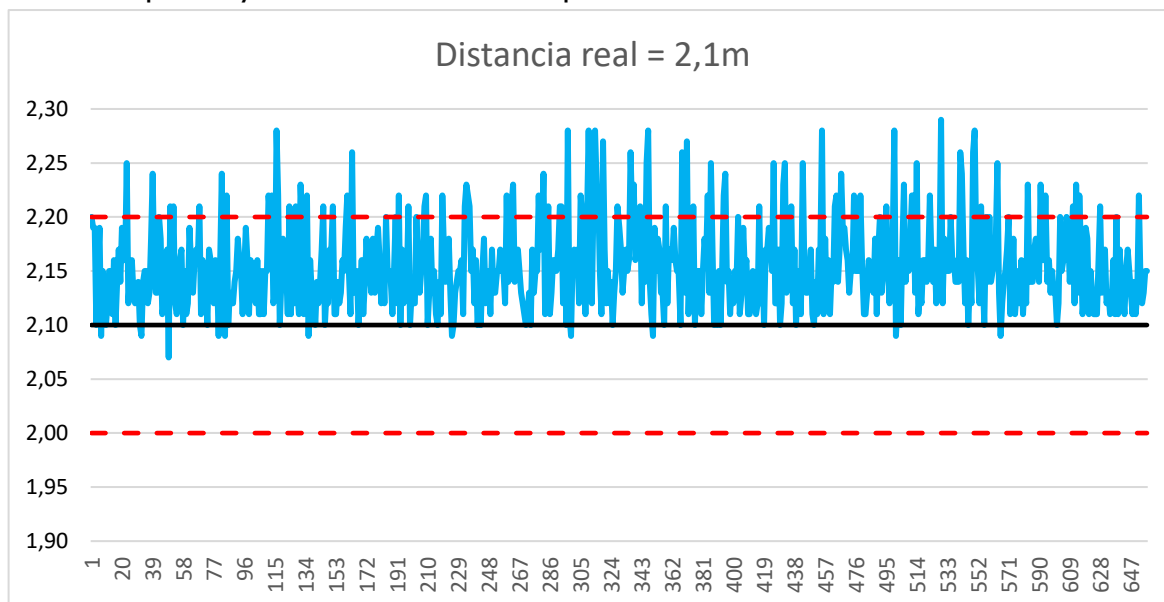


Ilustración 60 Gráfica de medida de distancia 2,1m

Revisando el histograma de estos resultados en la ilustración 61, hay que destacar que las muestras se reparten homogéneamente entre los valores entre 2,09m y 2,17m, habiendo aproximadamente 60 muestras en cada valor. Además, se encuentran 92 muestras de 657 por encima del umbral de error (14%) y cabe destacar que a partir de esta medida no se van a encontrar muestras que estén por debajo del valor real, habiendo en este caso solo 11 muestras.

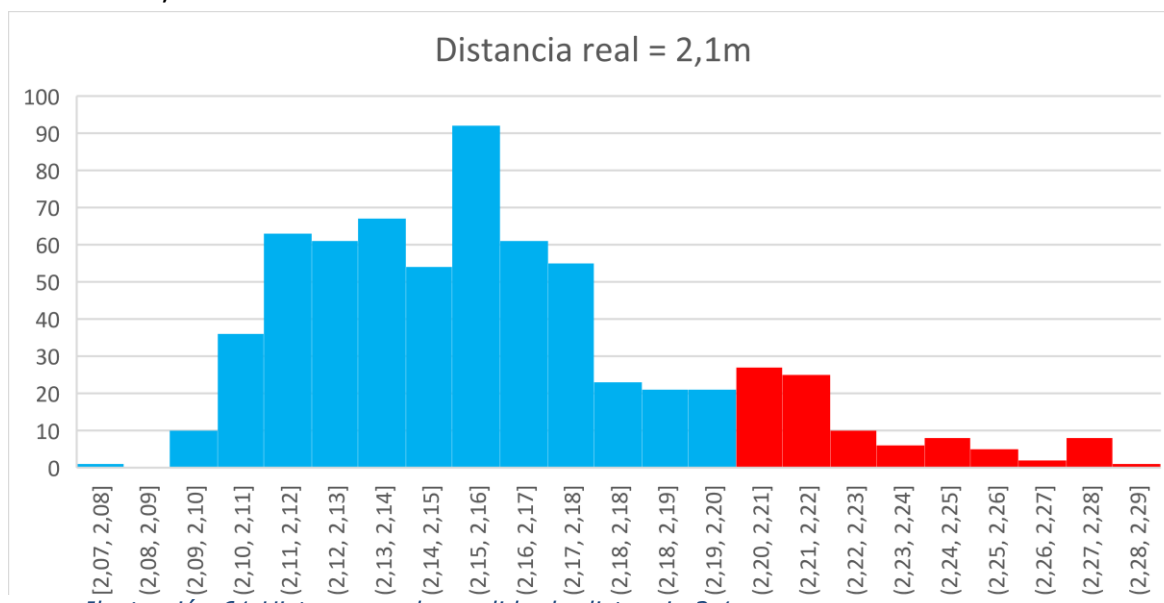


Ilustración 61 Histograma de medida de distancia 2,1m

La gráfica con los resultados de medida de distancia de 2,4m muestra unos valores donde parece que el valor real sea el valor del umbral superior de error, 2,5m, encontrando pocos valores que se acerquen al valor real de 2,4m y bastantes valores por encima del umbral de error.

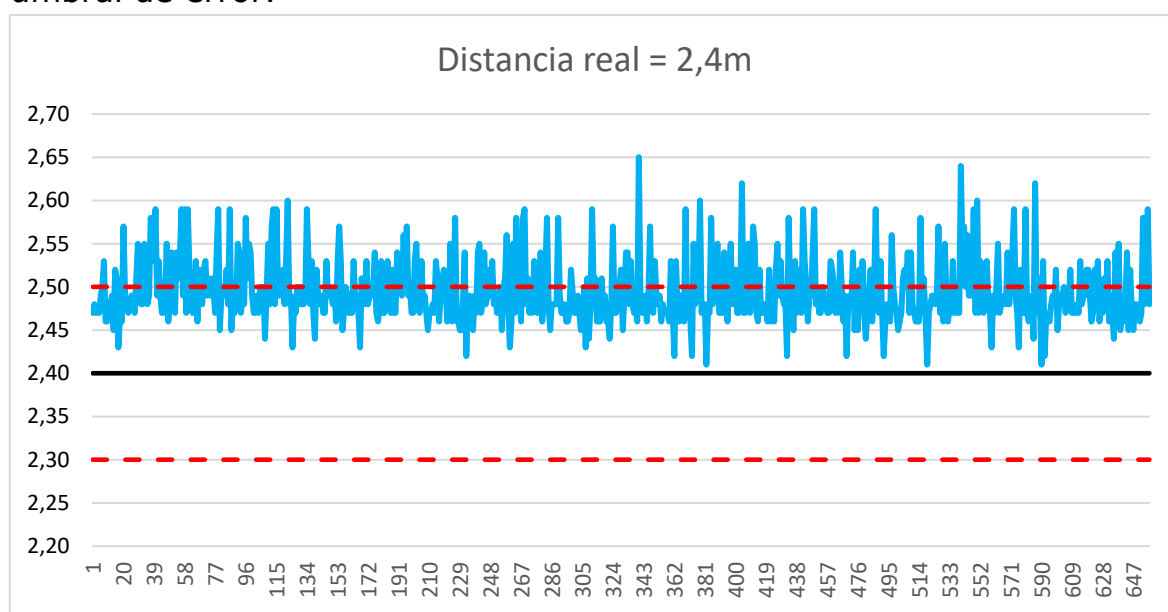


Ilustración 62 Gráfica de medidas de distancia 2,4m

Revisando el histograma de estos resultados se comprueba que la mayoría de los valores se encuentran entre los 2,46m y los 2,48m, siendo 329 de 657 muestras (50,08%), mientras que 193 de las muestras (29,38%) superan el umbral de error. En este caso no se encuentra una distribución normal en los resultados.

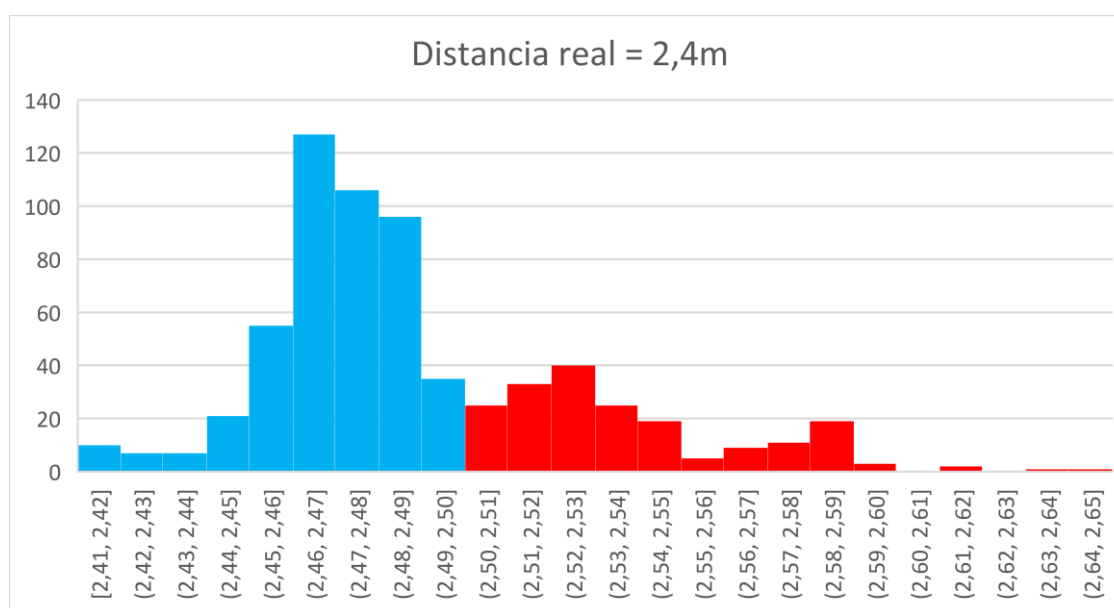


Ilustración 63 Histograma de medidas de distancia 2,4m.

Respecto a los resultados de medida de distancia de 2,7m, como se puede ver en la gráfica, se repite el caso anterior, donde gran parte de los datos oscilan en el valor de 2,8m, umbral de error superior. Esto hace que muchos datos sobrepasen este valor, alejándose del valor de medida real.

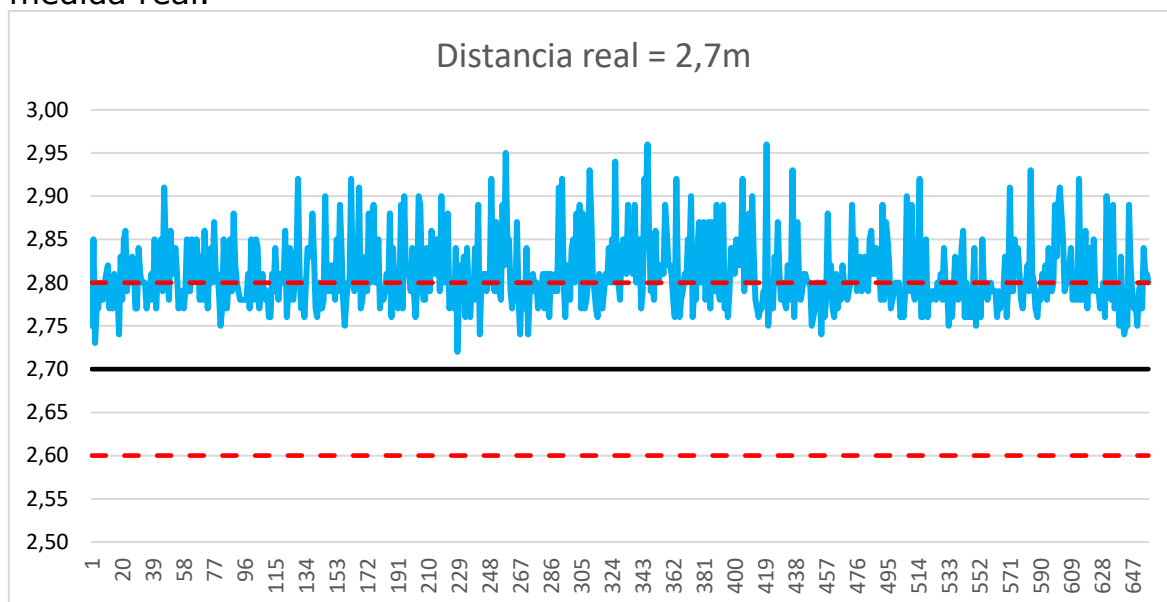


Ilustración 64 Gráfica de medida de distancias 2,7m

En el histograma de estos resultados se puede ver que más de la mitad de las muestras superan el umbral de error, siendo 369 de 657 muestras (56,16%), superando el error obtenido en la medida de distancia de 0,3m.

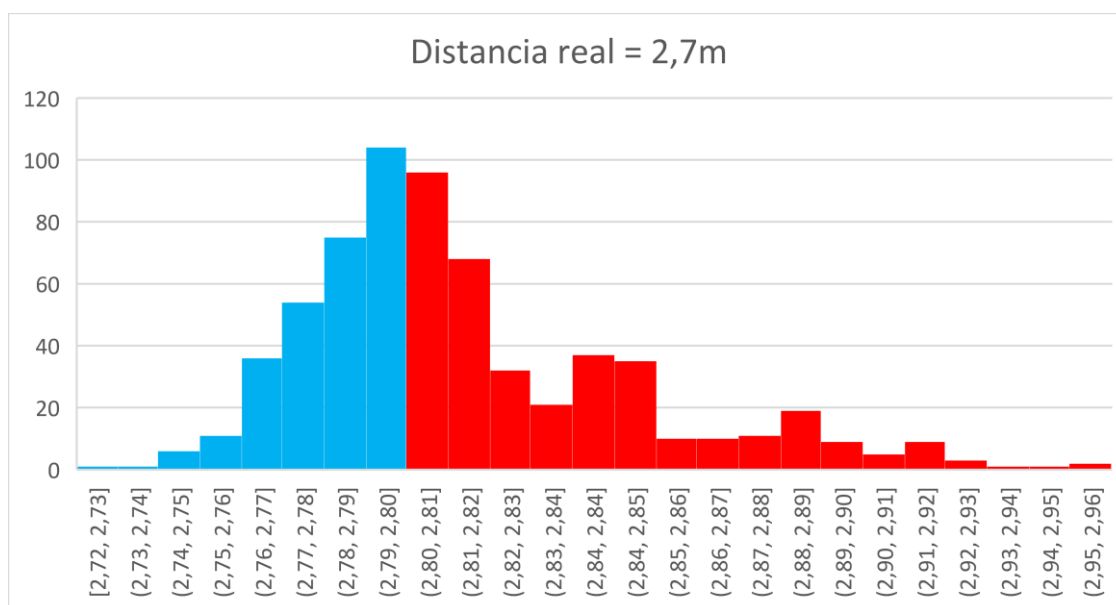


Ilustración 65 Histograma de medida de distancias 2,7m

Finalmente, la gráfica de resultados de medida de distancia de 3,0m muestra valores parecidos a los últimos casos. Las muestras están centradas en el umbral de error superior (3,1m) y la mayoría lo superan, habiendo pocas muestras que se acerquen al valor real.

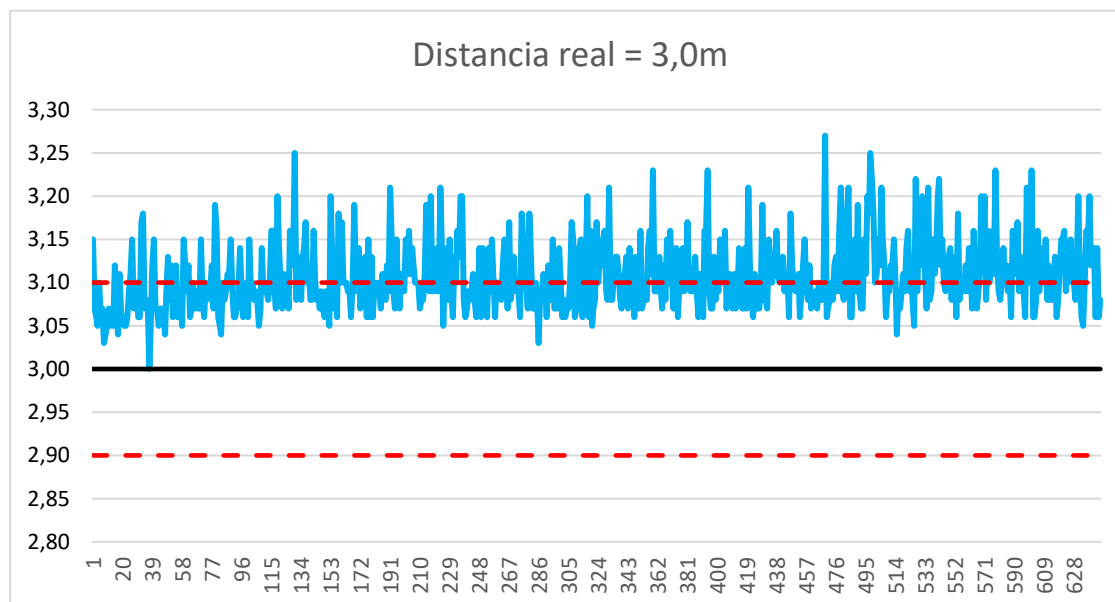


Ilustración 66 Gráfica de medida de distancia 3,0m

En el histograma se vuelven a corroborar los resultados de la gráfica, siendo este muy parecido al de la medida de distancia de 2,7m, extrapolando que las medidas son diferentes. Ahora las muestras por encima del umbral de error son 334 de las 645 muestras totales (51,78%), haciendo del resultado anterior el que mayor número de muestras fuera del umbral de error tiene.

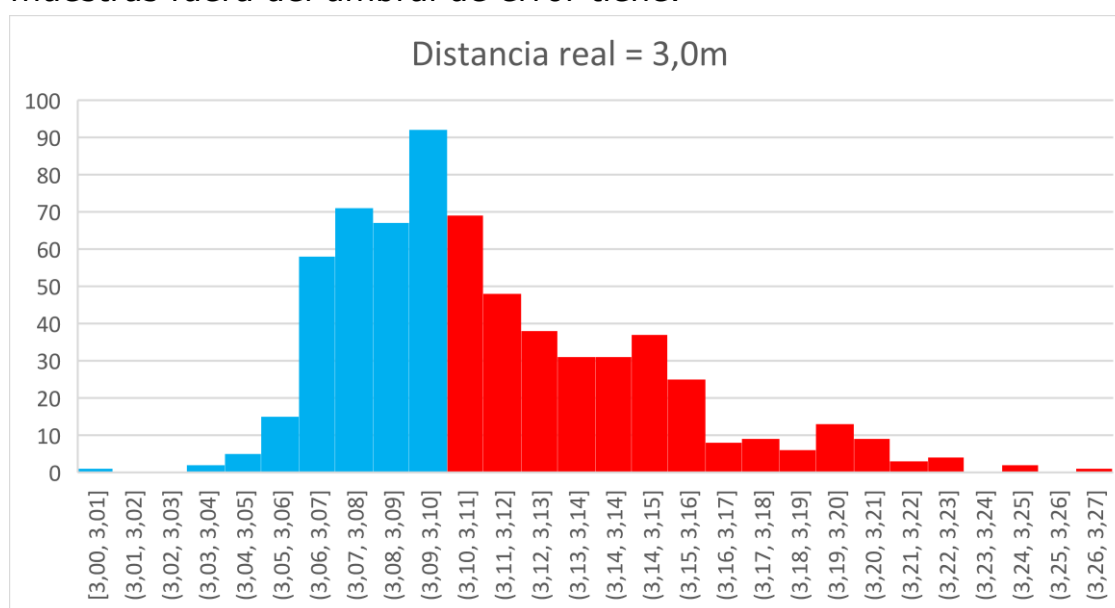


Ilustración 67 Histograma de medidas de distancia 3,0m.

Tabla 10 Análisis de error de las muestras.

Valor Real (m)	Valor Medido promedio (m)	Error Absoluto promedio (m)	Desviación típica (%)
0,3	0,21	0,09	2,47%
0,6	0,54	0,06	2,51%
0,9	0,89	0,01	2,48%
1,2	1,24	0,04	2,68%
1,5	1,52	0,02	2,79%
1,8	1,82	0,02	3,36%
2,1	2,15	0,05	4,09%
2,4	2,49	0,09	3,79%
2,7	2,81	0,11	4,04%
3	3,11	0,11	4,11%

Al revisar la tabla 10 se puede ver que el valor promedio de las muestras en cada una de las medidas de distancia no dista de lo obtenido analizando las gráficas e histogramas.

Respecto al error absoluto, se ve que los resultados entre 0,9m y 1,8m son los mejores y los peores casos se encuentran en las medidas de distancia más altas.

Los valores de desviación típica nos muestran que en la mayoría de los casos los datos se agrupan sobre el valor promedio. Esto se pudo ver en las gráficas e histogramas, pero es buena idea comprobarlo en todo momento con un valor numérico.

En resumen, los resultados por debajo de 1m de distancia entre dispositivos muestran valores medidos por debajo del valor real, siendo el peor de los casos cuando la distancia real es de 0,3m con un 42% de las muestras fuera del umbral de error.

Por el contrario, al tener una distancia entre dispositivos superior a los 2m los resultados comienzan a encontrarse por encima del valor real, siendo el peor de los casos de toda la prueba de medida el de 2,7m con un 56% de las muestras fuera del umbral de error.

Los resultados obtenidos entre uno y dos metros son muy buenos, teniendo en todo momento menos del 5% de las muestras fuera del umbral de error. Como el área del ensayo es de 2m², la mayoría de las veces los dispositivos se encontrarán a una distancia dentro de este rango, siendo unos resultados favorables para realizar el ensayo.

6.2. ENSAYO DE POSICIONAMIENTO

Los resultados que se muestran en este apartado corresponden al ensayo de posicionamiento en el que para obtener la posición del objeto móvil se utiliza la trilateración con la resolución de matrices de Newton-Raphson, ya que es el ensayo de mayor interés como se comprobará.

Por cada posición en la que se situó el objeto móvil durante el ensayo se muestra una gráfica de dispersión con las muestras tomadas, además de una tabla que toma el valor promedio de los resultados y lo analiza. Se revisan las distancias tomadas y los valores x e y de posición calculados.

La primera posición tomada es la de las coordenadas $(0,1)$ y, como se puede ver en la gráfica de la ilustración 68, la mayor parte de los resultados calculados de posición se encuentran dentro de los márgenes de error, aunque en general los resultados en el eje x tienen principalmente valor negativo. Esto no es muy adecuado, y modificando el código los valores negativos podrían transformarse en valores nulos.

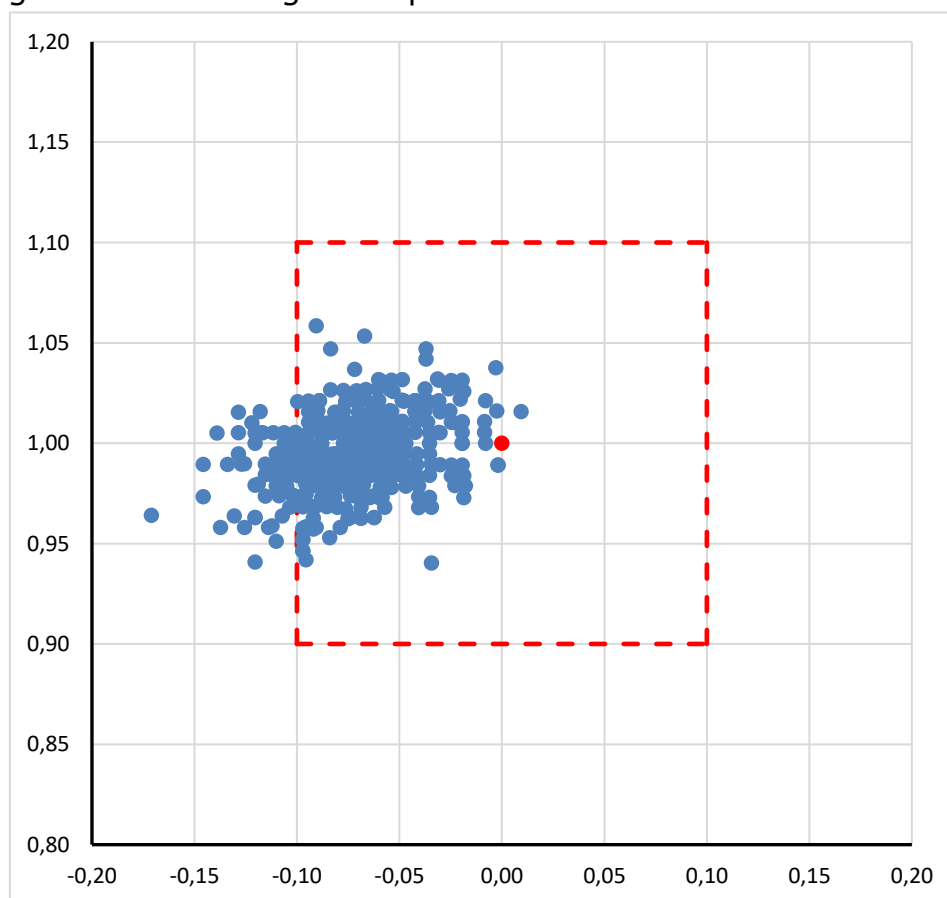


Ilustración 68 Gráfica de ensayo de posición (0,1).

Revisando los histogramas de los parámetros de posición, tanto de X como de Y, se puede ver que de las 381 muestras de posición calculada, solo 57 están por debajo del umbral, siendo un 14,96% del total.

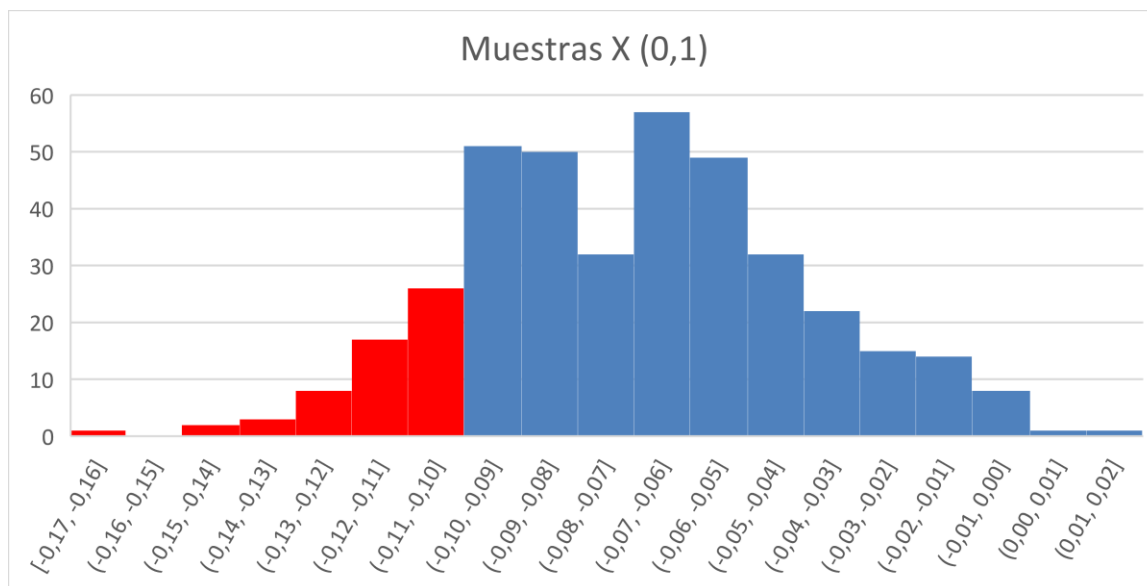


Ilustración 69 Histograma posición X (0,1)

Además, solo hay muestras por debajo del umbral en el eje X, la posición en Y del objeto móvil se calculó correctamente. Como se puede ver en ambos histogramas, la distribución es normal, al igual que con las medidas de distancia.

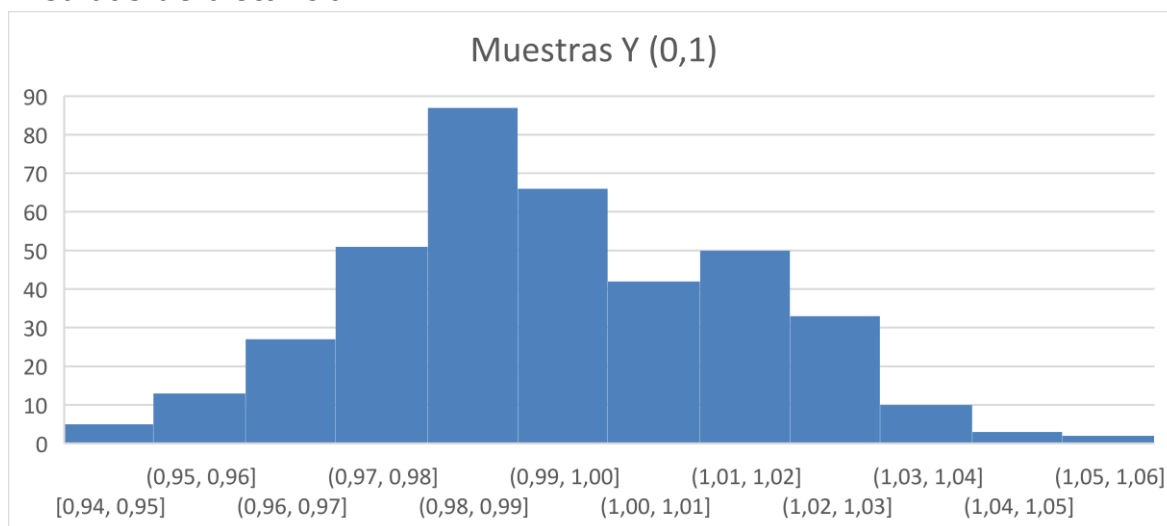


Ilustración 70 Histograma posición Y (0,1)

Como se puede ver en la tabla de resultados promedio, el valor que peor resultado muestra es el de la distancia del objeto al ancla B, ya que es la que más alejada se encuentra, haciendo que aparezcan esos

resultados por debajo del umbral en el eje X. La desviación muestra una agrupación de muestras en los valores promedio.

Tabla 11 Análisis de valores promedio en (0,1)

(0,1)	DisAR	DisAB	DisAC	X	Y
Valor Real (m)	1,00	2,24	1,00	0	1
Valor medido promedio (m)	1,05	2,32	1,07	-0,07	0,99
Error absoluto promedio (m)	0,05	0,08	0,07	0,07	0,01
Desviación típica (%)	2,84%	1,74%	2,25%	0,81%	0,96%

En este caso, los resultados recogidos del posicionamiento del objeto en las coordenadas (1,0) muestran un resultado diferente, teniendo que no hay error esta vez en el eje X, sin tener muestras fuera del umbral de error.

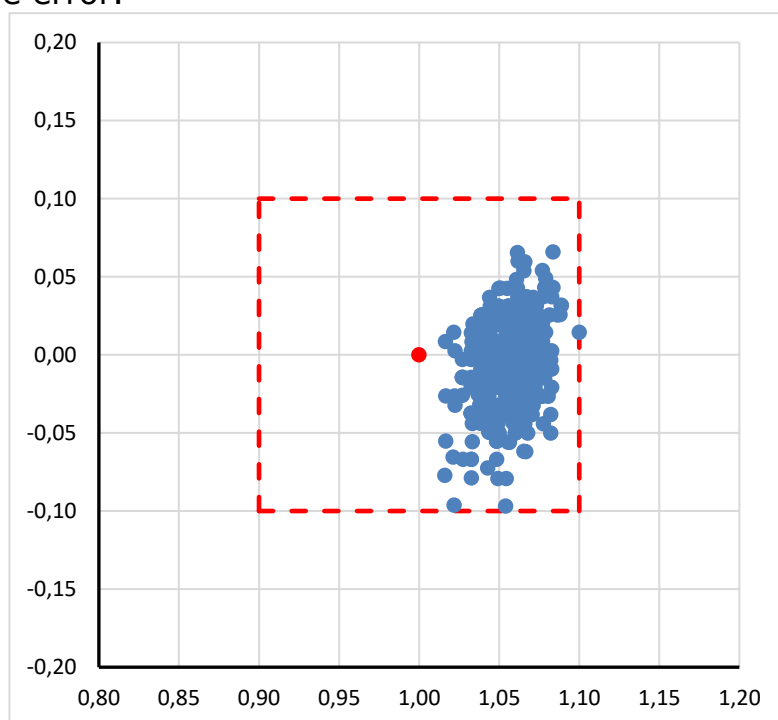


Ilustración 71 Gráfica de ensayo de posición (1,0)

Al revisar los histogramas se corrobora que ninguna de las posiciones calculadas está fuera de los márgenes de error.

En el eje X se ve mejor la distribución normal porque en el histograma del eje Y el valor central de -0,1m está algo descompensado respecto al valor de 0m, teniendo 80 y 25 muestras, respectivamente.

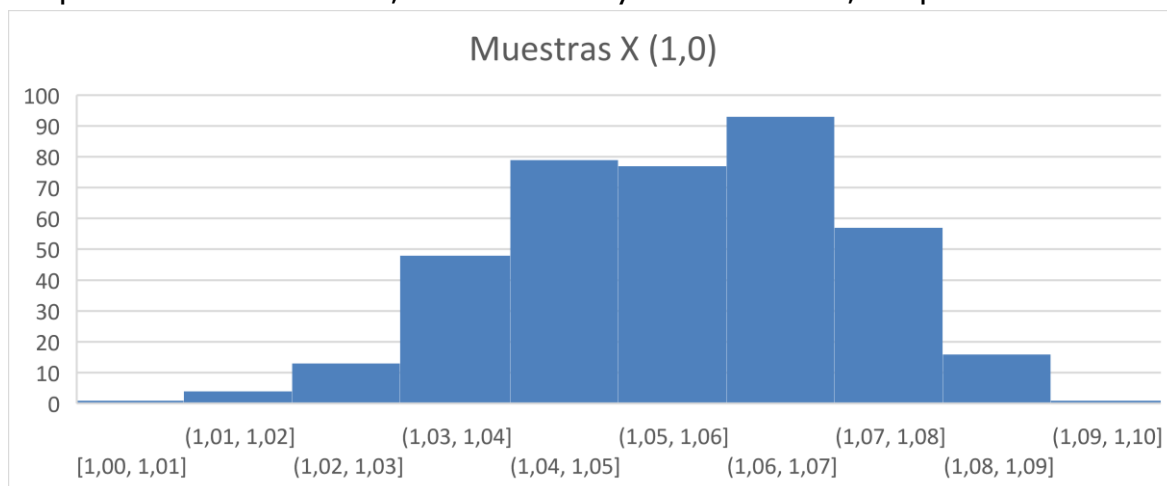


Ilustración 72 Histograma posición X (1,0)

Tabla 12 Valores promedio posición (1,0)

(1,0)	DisARef	DisAB	DisAC	X	Y
Valor Real (m)	1,00	1,00	2,24	1	0
Valor medido promedio (m)	1,15	1,05	2,31	1,06	0,00
Error absoluto promedio (m)	0,15	0,05	0,07	0,06	0,00
Desviación típica (%)	3,40%	1,83%	2,00%	0,95%	0,93%

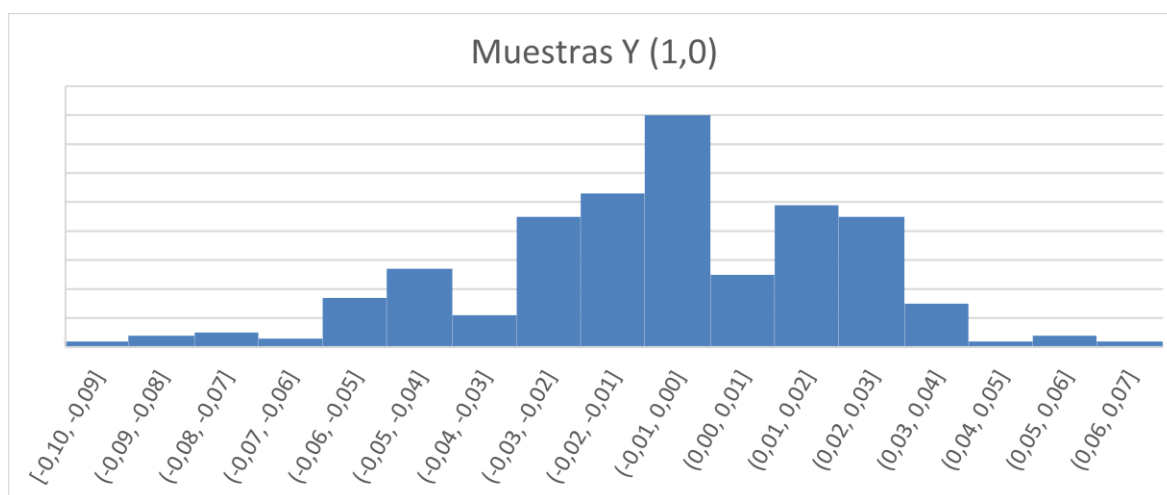


Ilustración 73 Histograma eje Y (1,0)

En este caso, al revisar los valores promedio se ha vuelto a encontrar que el ancla que más alejada está del objeto móvil es la que ha influenciado en las muestras. Que el valor de distancia del ancla de referencia sea peor que en la posición (0,1) ha permitido compensar el

error del ancla C, porque de lo contrario se habrían obtenido resultados similares a la posición (0,1), pero en el eje Y en vez del eje X.

Los resultados del cálculo de posición en las coordenadas (1,1) al revisar la gráfica parece que son igual de acertados que en el caso anterior, sin tener muestras fuera del umbral de error.

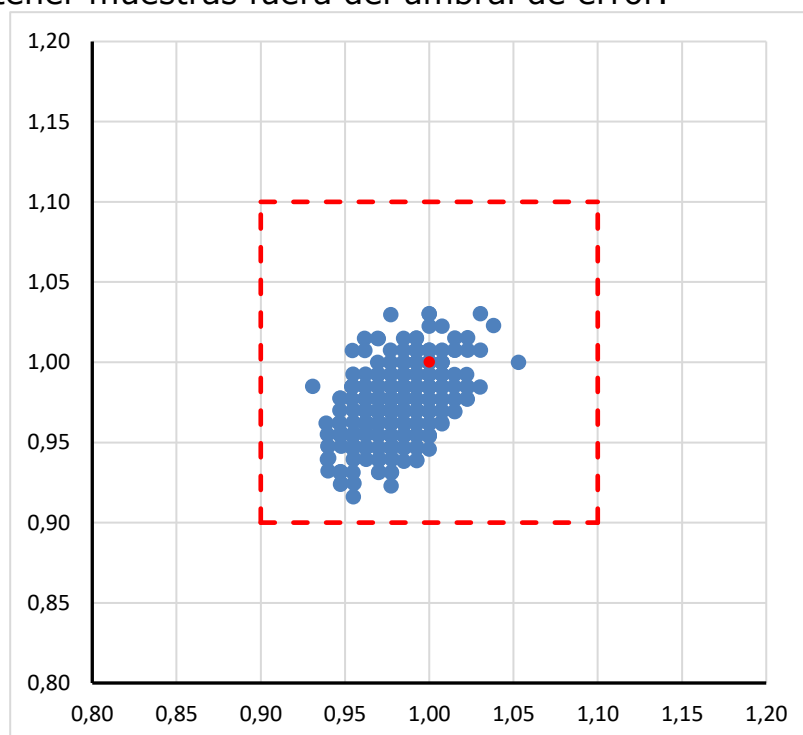


Ilustración 74 Gráfica de ensayo de posición (1,1)

Revisando los histogramas de esta posición se encuentra que los resultados están agrupados, para ambos ejes, entre los 0,95m y los 0,99m, haciendo que el cálculo de posición sea preciso, pero por debajo del valor real.

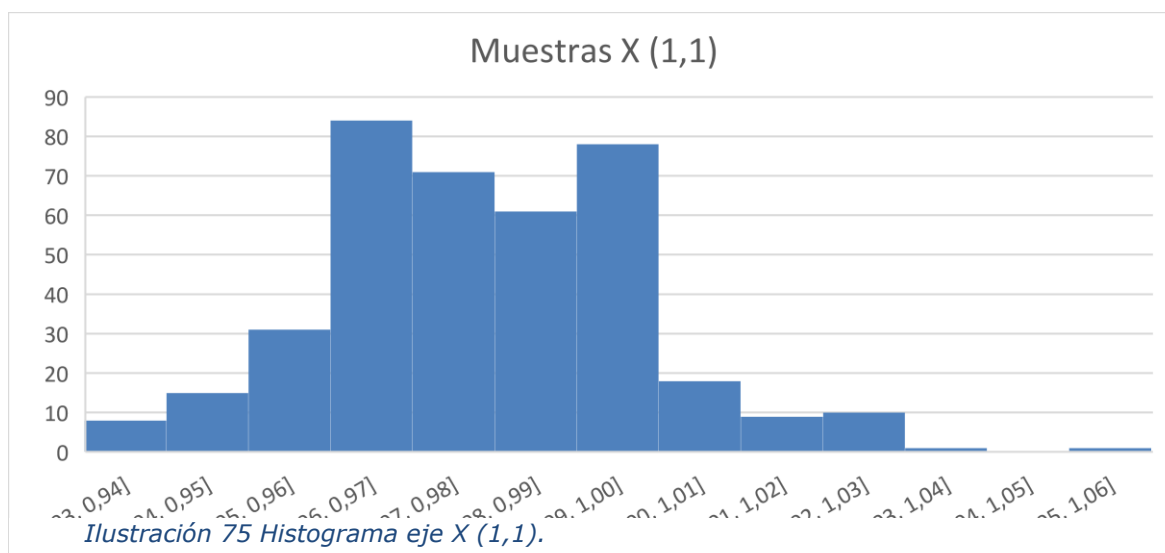


Ilustración 75 Histograma eje X (1,1).

Al revisar la tabla con los valores promedio, se puede ver que el error absoluto promedio de las anclas B y C supera los umbrales de error de 0,1m indicados por el fabricante, pero como tienen resultados parecidos, al calcularse la posición se compensan por estar en puntos diametralmente opuestos.

Tabla 13 Valores promedio posición (1,1)

(1,1)	DisAR	DisAB	DisAC	X	Y
Valor Real (m)	1,41	1,41	1,41	1	1
Valor medido promedio (m)	1,49	1,52	1,53	0,98	0,97
Error absoluto promedio (m)	0,08	0,11	0,12	0,02	0,03
Desviación típica (%)	1,66%	2,90%	2,44%	0,83%	0,69%

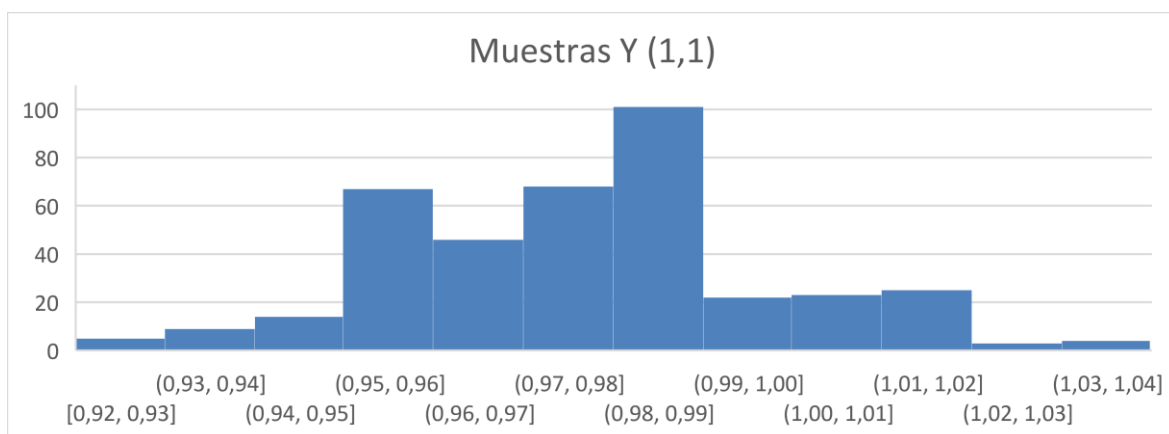


Ilustración 76 Histograma eje Y (1,1).

Respecto a los resultados de calcular la posición del objeto en (2,1), como se ve en la gráfica de dispersión, se tiene que los valores respecto al eje X se encuentran por encima del valor real, haciendo que varias muestras superen el umbral de error.

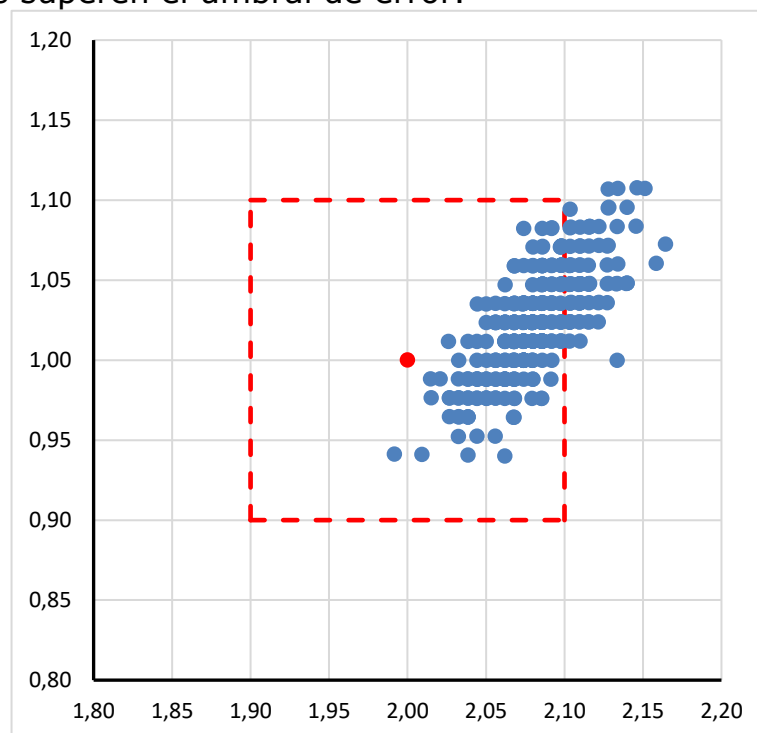


Ilustración 77 Gráfica de posición (2,1).

Si se revisan los histogramas se confirma que son 44 muestras de 365 totales (12,05%) las que se encuentran fuera del umbral de error.

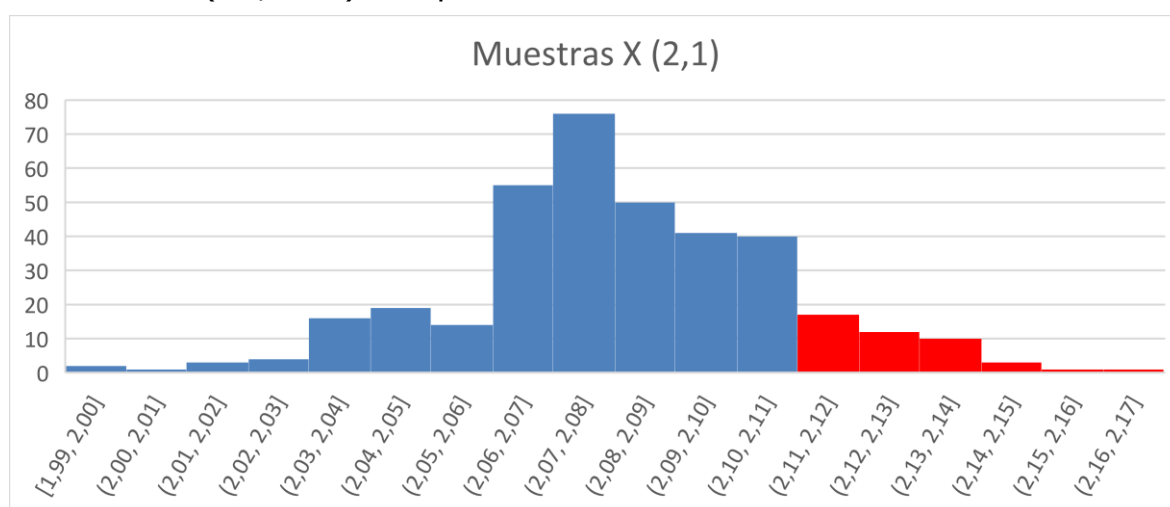


Ilustración 78 Histograma eje X (2,1)

Ambos histogramas muestran una distribución normal, como ya se ha comprobado que sigue el ensayo al revisar las medidas de distancia. Como dato curioso, no hay valores en el eje Y de 1m, valor real de posición en este caso del ensayo.

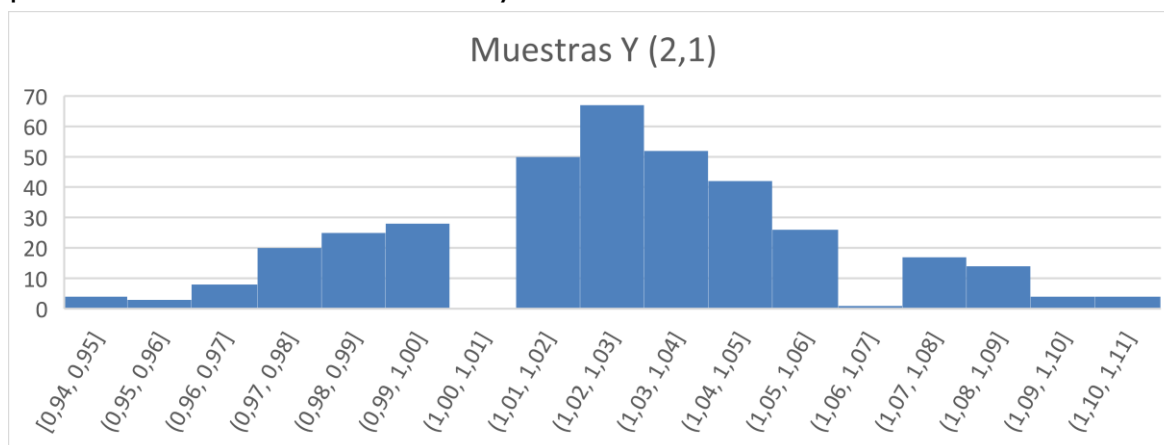


Ilustración 79 Histograma eje Y (2,1)

Tabla 14 Valores promedio posición (2,1)

(2-1)	DisAR	DisAB	DisAC	X	Y
Valor Real (m)	2,24	1,00	2,24	2	1
Valor medido promedio (m)	2,39	1,17	2,36	2,08	1,03
Error absoluto promedio (m)	0,15	0,17	0,12	0,08	0,03
Desviación típica (%)	1,90%	2,55%	2,35%	0,87%	0,78%

Respecto a los valores promedio de distancia, al haber ahora dos anclas más alejadas aumenta el error, superando el umbral. Pero en el caso de la posición se acaban obteniendo buenos resultados.

En el caso de los resultados de posición en (1,2) se tiene una situación similar al caso de la posición (2,1), pero ahora los datos son peores, estando la mayoría de los datos fuera del umbral, teniendo un valor del eje Y superior al real.

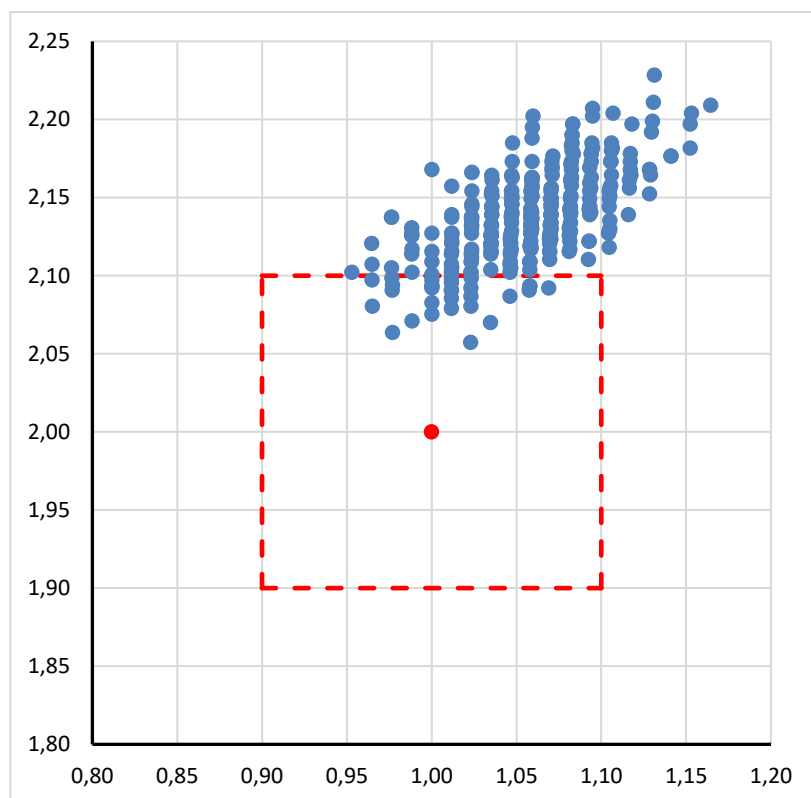
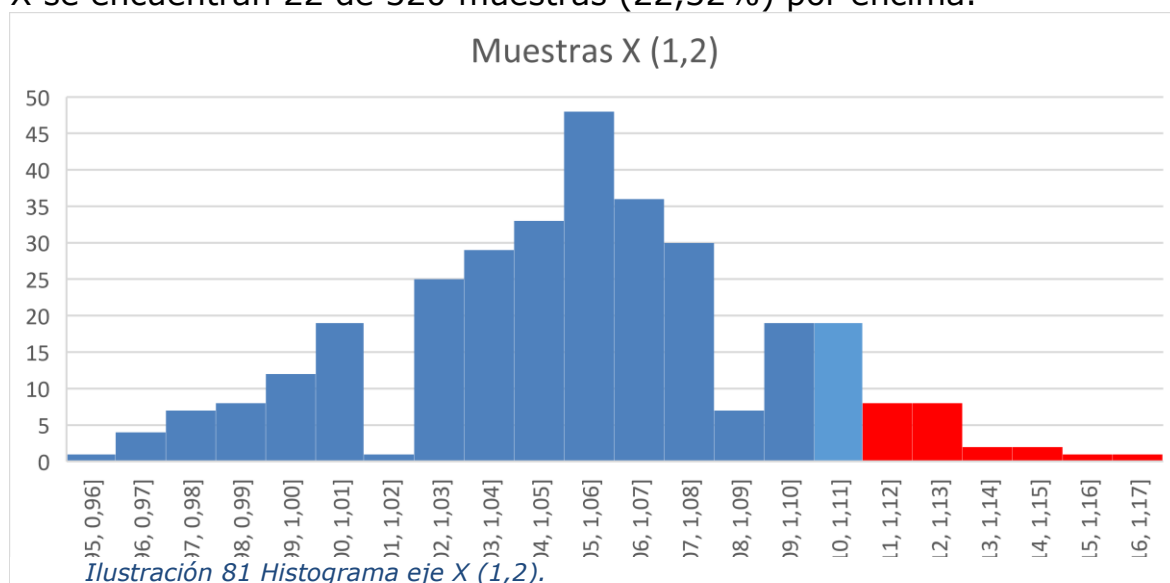


Ilustración 80 Gráfica ensayo de posición (1,2).

Revisando los histogramas se puede ver que hay muestras por encima del umbral tanto en el eje X como en el eje Y. En el caso del eje X se encuentran 22 de 320 muestras (22,32%) por encima.



En cambio, en el eje Y la mayoría de las muestras se encuentran fuera del umbral del error, siendo esta vez el 83,13% (266 de 320), valor extremadamente alto y que debería revisarse.

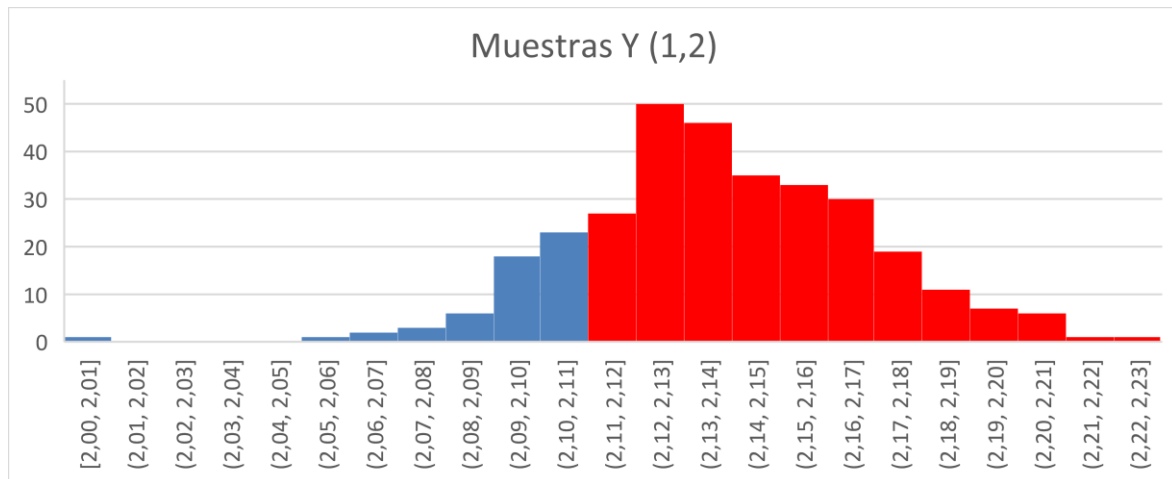


Ilustración 82 Histograma eje Y (1,2)

Tabla 15 Valores promedio posición (1,2)

(1-2)	DisAR	DisAB	DisAC	X	Y
Valor Real (m)	2,24	2,24	1,00	1	2
Valor medido promedio (m)	2,37	2,32	1,02	1,06	2,14
Error absoluto promedio (m)	0,13	0,08	0,02	0,06	0,14
Desviación típica (%)	2,37%	2,03%	2,23%	0,77%	0,79%

En la tabla 15, comparándola con el caso de posición (2,1) que es homólogo, se puede ver que ahora la posición en Y en promedio supera el umbral de error de 0,1m, pero las distancias tienen valores más acertados respecto a los valores reales. Es posible que, al estar solamente la distancia al ancla de referencia con error no se compensen entre sí y, a la hora de hacer el cálculo de la posición, esta genere el aumento de muestras fuera del umbral de error.

Finalmente, la última posición del ensayo es la de las coordenadas (2,2). En este caso prácticamente ninguna de las muestras se encuentra en los valores aceptables respecto al valor real. También es el punto más alejado de todas las anclas.

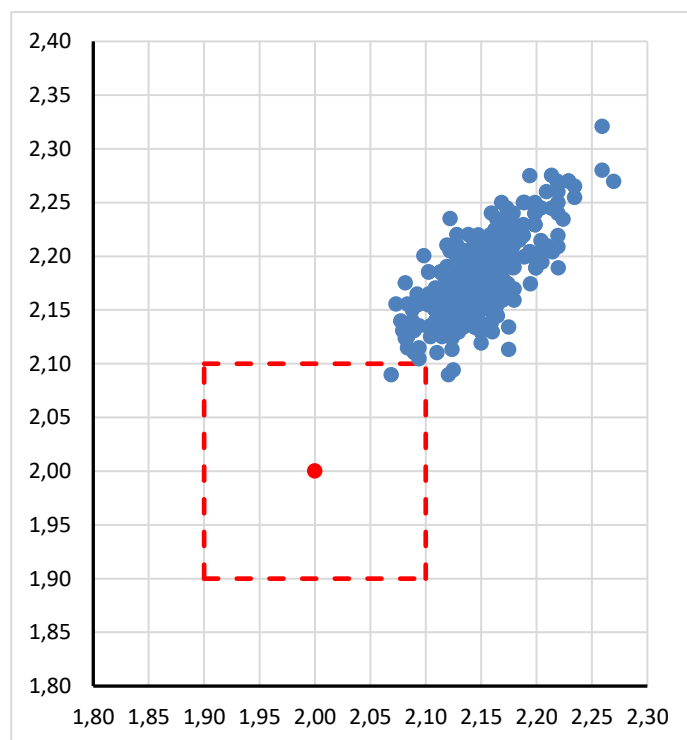


Ilustración 83 Gráfica de ensayo de posición (2,2)

Revisar los histogramas no hará más que corroborar lo evidente al revisar la gráfica, teniendo en el eje X 341 muestras fuera del umbral de las 384 que hay, correspondiendo al 88,88% de muestras totales.

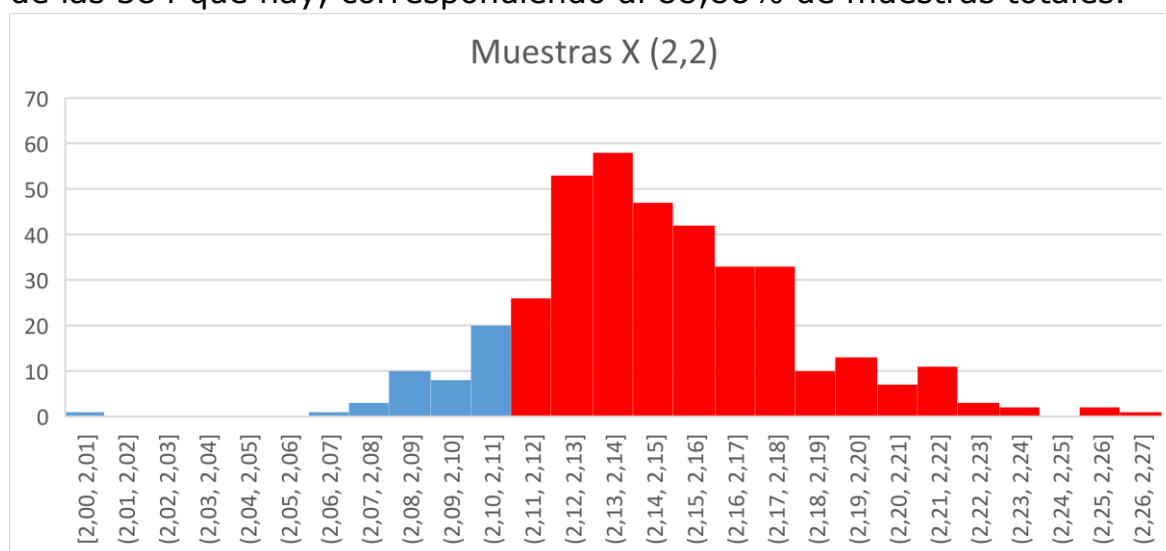


Ilustración 84 Histograma eje X (2,2)

En el caso de las muestras en el eje Y estos valores incluso son peores, teniendo 379 de 384, un 98,70% del total, de muestras fuera del umbral, que en la práctica es la totalidad de las muestras.

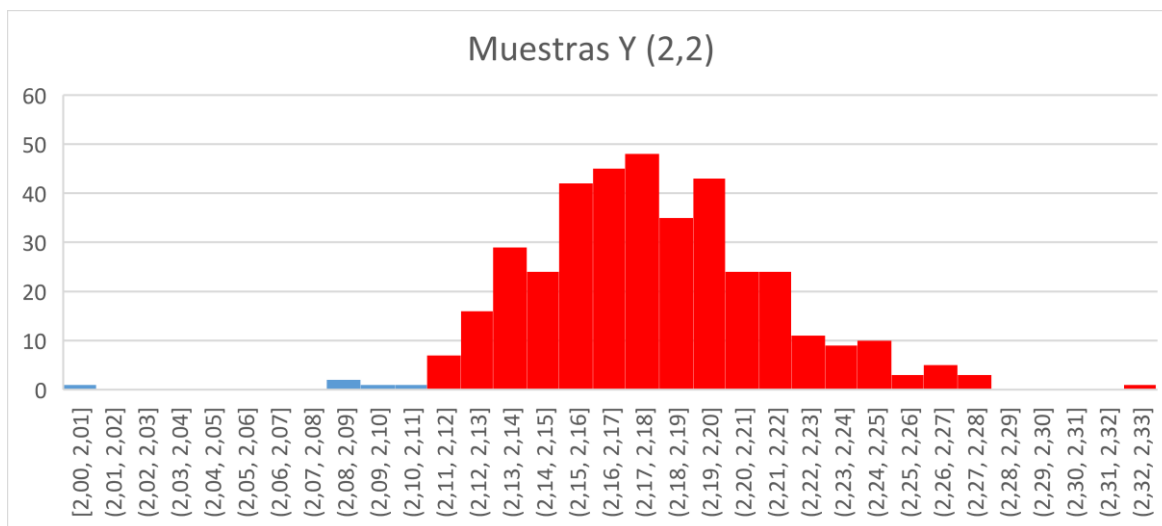


Ilustración 85 Histograma eje Y (2,2)

Tabla 16 Valores promedio posición (2,2)

(2-2)	DisAR	DisAB	DisAC	X	Y
Valor Real (m)	2,83	2,00	2,00	2	2
Valor medido promedio (m)	2,98	2,07	2,04	2,15	2,18
Error absoluto promedio (m)	0,15	0,07	0,04	0,15	0,18
Desviación típica (%)	1,90%	2,55%	2,35%	0,87%	0,78%

Si se revisa la tabla de valores promedio, aparece curiosamente una situación similar a los casos donde una de las posiciones está más alejada que las otras, y es que la distancia real al ancla de referencia es la mayor, teniendo un error superior al del umbral de 0,1m. Esto vuelve a descompensar los cálculos de posición, haciendo que todos los valores sean superiores a los reales.

Resumiendo, la sensibilidad de los resultados es alta debido a que influyen tres medidas de distancia diferentes en donde una sola puede variar la posición calculada en gran medida, generando errores no aceptables.

A su vez, si hay varias medidas de distancia con errores, los cálculos pueden llegar a compensarlas, dependiendo de la disposición de las anclas, porque puede darse el caso

7. CONCLUSIONES

Gracias al desarrollo de este trabajo se ha conseguido realizar el objetivo principal del mismo, llevar a cabo un ensayo de posicionamiento utilizando la tecnología en alza de banda ultra ancha.

También se ha comprendido la utilidad del uso de una metodología rigurosa y bien definida, ya que en las pruebas y pasos del proceso que se ha utilizado se han llegado a conseguir resultados de interés y en los momentos que han aparecido complicaciones, ya sea a la hora de realizar una prueba o en el mismo ensayo de posicionamiento, se ha podido reflexionar sobre el proceso y dar un paso atrás para corregir lo que fuera necesario.

Durante la fase de montaje se ha entendido también la utilidad del shield, el cual ha cumplido una función esencial al otorgar firmeza al dispositivo, necesario para que la antena UWB funcione en óptimas condiciones. Además, se ha aprendido acerca de la adaptabilidad que brindan a las placas de desarrollo, añadiendo funcionalidades para todo tipo de proyectos.

Respecto a los resultados obtenidos de consumo y autonomía, aunque no se llegue a aprovechar por diseño al completo las baterías, el tiempo obtenido de autonomía es más que suficiente para que se pueda realizar el ensayo. Además, en futuras iteraciones las anclas, al estar fijas en una posición, pueden alimentarse a una toma de corriente, mientras que la autonomía del objeto móvil es mucho mayor, ya que se encuentra menos tiempo transmitiendo.

Los resultados obtenidos otorgan un modelo de cálculo de posición básico y ajustable para resolver la imprecisión que aparece cuando el objeto móvil se aleja demasiado de las anclas fijas.

Destacar sobre los resultados obtenidos que, aunque aparecen errores al estar los dispositivos muy cerca o lejos, el error obtenido es consistente y no supera los 20cm. Esto hace a la tecnología UWB una opción a considerar para muchas aplicaciones que no necesiten de una precisión extremadamente alta, como podría dar una tecnología como LiDAR, pero tampoco requiera de unas condiciones de trabajo específicas, pudiendo adaptarse a gran cantidad de entornos interiores con un coste de implementación relativamente asequible.

7.1. TRABAJOS FUTUROS

El ensayo realizado puede servir de punto de partida a cualquier persona interesada en el desarrollo de esta tecnología que cada vez se trata de implementar más en nuestro día a día y en entornos de trabajo

Hay muchas líneas de desarrollo a partir de este trabajo, desde la implementación de más dispositivos a la constelación, estudiar casos con línea de visión no directa o la implementación de un algoritmo que corrija los errores de precisión de la medida de distancia a la hora de calcular la posición.

8. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los objetivos de este Trabajo Fin de Grado están alineados con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y metas, de la Agenda 2030:

- Objetivo 4 - Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos
- Meta 4.4 De aquí a 2030, aumentar considerablemente el número de jóvenes y adultos que tienen las competencias necesarias, en particular técnicas y profesionales, para acceder al empleo, el trabajo decente y el emprendimiento
- Objetivo 8 - Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos
- Meta 8.2 Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra



9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diaz, J. (2003). Tecnología Ultra-Wideband (UWB): La revolución a corto alcance. Buran, 52-56.
<https://raco.cat/index.php/Buran/article/view/178854>
- [2] Elsanhoury, M. et al. (2022). Precision Positioning for Smart Logistics Using Ultra-Wideband Technology-Based Indoor Navigation: A Review. IEEE Access, 10, 44413-44445.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169267>
- [3] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). (2011). IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006), 1-314.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.6012487>
- [4] The History of Ultra-Wideband (UWB). FiRa Consortium. (2024, enero 18). <https://www.firaconsortium.org/resource-hub/blog/the-history-of-ultrawideband-uwbb>
- [5] Qorvo. (2021). Getting Back to Basics with Ultra-Wideband. <https://www.qorvo.com/resources/d/qorvo-getting-back-to-basics-with-ultra-wideband-uwbb-white-paper>
- [6] Mohammadmoradi, H., Heydariaan, M., & Gnawali, O. (2018). UWB Physical Layer Adaptation for Best Ranging Performance within Application Constraints. Proceedings of the 2nd International Conference on Smart Digital Environment, 119-126.
<https://doi.org/10.1145/3289100.3289120>
- [7] Garcia, E. (2008). Técnicas de Localización en Redes Inalámbricas de Sensores. Universidad de Castilla-La Mancha. Recuperado de <https://www.dsi.uclm.es/personal/EvaMariaGarcia/docs/2008-Curso%20Verano.pdf>
- [8] Gman. (2017, diciembre 30). Find X location using 3 known (X,Y) location using trilateration [Forum post]. Mathematics Stack Exchange. <https://math.stackexchange.com/q/884807>
- [9] Poulouse, A., & Han, D. (2020). UWB indoor localization using deep learning LSTM networks. Applied Sciences, 10, 6290.
<https://doi.org/10.3390/app10186290>
- [10] Giraldo, G (1998). Análisis Numérico J. Douglas Faires y Richard L. Burden (Métodos Numéricos). Recuperado 2 de mayo de 2024, de https://www.academia.edu/30466412/An%C3%A1lisis_Num%C3%A9rico

[co J Douglas Faures y Richard L Burden M%C3%A9todos Num%C3%A9ricos](#)

[11] DWM1000 Datasheet. Version 1.8. Decawave Ltd., 2016.
Recuperado de: <https://www.qorvo.com/products/d/da007948>

[12] DW1000 User Manual. Version 2.18. Decawave Ltd., 2017.
Recuperado de: <https://forum.qorvo.com/uploads/short-url/7L9oQ2xtK1vuT9VHRzTWeis2KLF.pdf>

[13] ESP32-C3 Wi-Fi & BLE 5 SoC. Espressif Systems. Recuperado 6 de mayo de 2024, de <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-c3>

[14] SGM2212-3.3XKC3G/TR by SG Micro Corp | Linear Regulators. Arrow. Recuperado 29 de mayo de 2024, de <https://www.arrow.com/en/products/sgm2212-3.3xkc3gtr/sq-micro-corp>

[15] F-Army/arduino-dw1000-ng. (2024). [C++]. F-Army. <https://github.com/F-Army/arduino-dw1000-ng> (Obra original publicada en 2018)

[16] Dowsett, B. (2022, noviembre 22). The World Cup's New High-Tech Ball Will Change Soccer Forever. FiveThirtyEight. <https://fivethirtyeight.com/features/the-world-cups-new-high-tech-ball-will-change-soccer-forever/>

[17] Martínez García, H., Bueno, V., & Pol Fernández, C. (2011). Plataforma docente para el aprendizaje de microcontroladores «PIC» de microchip. 645-650. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/14420>

[18] Pérez, C. (2014). Sistemas Embebidos (ES). Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control UNED. Recuperado de [http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion de referencia ISE5 3 1.pdf](http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE5_3_1.pdf)

[19] Hewlett Packard Enterprise. ¿Qué es OEM? | Glosario. Recuperado 22 de mayo de 2024, de <https://www.hpe.com/es/es/what-is/oem.html>

[20] Kostak, J. UWB RTLS Tags for Indoor Location Tracking. Sewio RTLS. Recuperado 22 de mayo de 2024, de <https://www.sewio.net/uwb-tags/>

[21] Marker, G. (2018, agosto 23). Todos los tipos de conexiones a Internet. Tecnología + Informática. <https://www.tecnologia-informatica.com/tipos-conexion-internet/>

[22] ¿Qué es el Espectro Radioeléctrico? | Generalidades. Agencia Nacional del espectro. Recuperado 23 de mayo de 2024, de

https://portalespectro.ane.gov.co/Style%20Library/ane_master/que-es-el-espectro-radioelectrico.aspx

[23] Staudinger, M. (1999). A Cost Oriented Approach to Geodetic Network Optimisation. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2762.4484>

[24] Trilateración. (2022). En Wikipedia, la enciclopedia libre. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Trilateraci%C3%B3n&oldid=146465977>

[25] Arduino® UNO R4 WiFi (2024). Arduino Official Store. Recuperado 22 de mayo de 2024, de <https://store.arduino.cc/products/uno-r4-wifi>



Relación de documentos

(X) Memoria 80 páginas

(_) Anexos 116 páginas

La Almunia, a 03 de 06 de 2024

Firmado: Borja Blanco Moreno