

**PARTE I**

**MEMORIA**



# Capítulo 1

La localización y la navegación en exteriores es hoy día extraordinariamente popular gracias a la integración tecnológica de mapas, navegadores y satélites GPS. En interiores, sin embargo, estas tecnologías son insuficientes.

Las razones de este cierto fracaso son tanto técnicas como sobre todo económicas:

- Técnicas porque la localización en interiores plantea retos tecnológicos muy superiores a los de la localización en espacios abiertos.
- Económicas porque la mayor parte de los sistemas propuestos utilizan gran cantidad de infraestructura fija (sensores, puntos de control, estaciones base, etc), lo que hace aumentar mucho el coste.

Este apartado presenta una revisión del estado de la técnica de localización en interiores. En él se exponen de forma general las principales características que ha de tener uno de estos sistemas, las diferentes metodologías desde las que se puede abordar el problema y las tecnologías más utilizadas.

## 1. INTRODUCCIÓN

La proliferación de los dispositivos móviles, como *smartphones*, *smartwatches* o tabletas, unido al desarrollo de la microelectrónica, que ha permitido crear dispositivos embebidos sencillos para comunicarse inalámbricamente, ha ocasionado un creciente interés en los LBS (*Location Based Services*, servicios de localización).

Los sistemas de posicionamiento son interesantes y en muchos casos imprescindibles para multitud de industrias, como la logística o la hospitalaria [1]. De hecho, se prevé que para el año 2024 los sistemas de localización supongan un mercado anual de 10 billones de dólares [2].

El sistema GPS (*Global Positioning System*, sistema de posicionamiento global) ha sido masivamente utilizado fuera de edificios, debido a que es capaz de suministrar resultados aceptables en cualquier situación. El sistema AGPS (GPS asistido) [3] es capaz de obtener la posición con un error menor de 15m.

Sin embargo, en entornos interiores el sistema GPS no puede utilizarse, ya que el dispositivo a localizar no tiene línea de visión directa con los satélites.

Además, localizar dentro de edificios plantea dificultades añadidas [4], como las reflexiones múltiples de la señal (*multipath*) o la atenuación de la misma debido a paredes u otros obstáculos.

Por todo ello, durante las últimas décadas se han realizado muchos esfuerzos en este campo. Durante este tiempo se han propuesto multitud de soluciones. Algunas proponen utilizar las señales existentes en los edificios, como las redes Wi-Fi, el campo magnético terrestre o las señales de radio, para intentar determinar la posición del objeto. Otras consisten en desplegar una red específica, a la que los elementos a localizar se conectan y comunican periódicamente para ser localizados. Una tercera vía surgió con la aparición de los IMU (*Inertial Measurement Unit*, unidades de medida inerciales). Estos dispositivos incluyen acelerómetros y giróscopos que pueden determinar la dirección y la velocidad del movimiento. También han surgido numerosos algoritmos, como redes neuronales o filtros, para tratar los datos e intentar mejorar alguna de las características del sistema de localización.

## 1.1 ESTADO DE LA TÉCNICA

Al abordar una revisión del estado de la técnica de los algoritmos y tecnologías más utilizadas para localizar en interiores se deben tener en cuenta las principales características deseables de los sistemas de localización, las principales metodologías de localización existentes y las principales tecnologías utilizadas para localizar.

### I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN

Por lo general, la exactitud es considerada muchas referencias como la característica más relevante para comparar los sistemas de localización. Sin embargo, existen otras que son también importantes. [5]-[9] Tienen en común que exactitud, precisión, complejidad, robustez, escalabilidad y coste son las características que permiten clasificar y comparar diferentes sistemas. Anexo A.1.

### II. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN

El interior de los edificios es un medio muy complejo, en el que existen paredes, objetos móviles, superficies reflectoras etc. Esto ocasiona diversos efectos adversos. Por ejemplo, la reflexión de las señales en las paredes, la atenuación de las señales cuando atraviesan objetos o el ruido procedente de otros dispositivos.

Estos problemas han ocasionado la aparición de diferentes métodos de localización durante las últimas décadas. Los sistemas de localización en

interiores pueden clasificarse en tres grandes categorías según el método que utilizan para localizar: geométricos, de huella (*fingerprint*) y basados en tecnologías inerciales (*self-measurement*).

#### A. Geométricos

Generalmente, estos métodos utilizan antenas o detectores cuyas posiciones son conocidas de antemano para localizar. Pueden dividirse en dos tipos: de proximidad y de triangulación (este último comprende las técnicas denominadas en inglés *multi-lateration* y *multi-angulation*). En el Anexo A.2 se describen ambos con más detalle.

#### B. Fingerprint

En este método se utilizan las señales ya existentes dentro de los edificios para localizar. En general, cualquier señal de la que se pueda medir alguna de sus propiedades es válida para localizar por este método.

El método *fingerprint* (huella) consta de dos etapas. En la primera, denominada *offline*, se construye una base de datos. Para ello se toman valores de las características de las señales que se utilizarán para localizar en una determinada posición. Al conjunto de estos valores se le denomina *fingerprint*. Luego se guarda en una base de datos junto a la posición en la que se tomó. Este proceso se repite hasta completar la base de datos. En la segunda etapa, la denominada *online*, los dispositivos a localizar toman el *fingerprint* de la posición en la que se encuentran. Estos valores se pasan a un algoritmo que los compara con los de la base de datos para estimar la posición.

Generalmente, los algoritmos más utilizados para este tipo de localización son: métodos probabilísticos, *k-nearestneighbor*, redes neuronales, máquinas de soporte vector y *smallest M-vertexpolygon*. Algunos de estos algoritmos requieren de bastante tiempo computacional, por lo que se han desarrollado técnicas para reducirlo.

Por ejemplo, se pueden utilizar árboles de decisión para extraer en qué zona está el objeto a localizar y aplicar el algoritmo de localización solo a los datos de la base de datos referentes a esa zona [10].

### C. Dispositivos inerciales.

Buena parte de los dispositivos móviles llevan integrados IMUs. Estas unidades se componen de varios giroscopios y acelerómetros, montados ortogonalmente, que miden giros y aceleraciones. Algunos también incluyen magnetómetros y barómetro, llegando a obtener datos de hasta 10 grados de libertad.

Con los sistemas de localización con dispositivos inerciales se conocen los giros y el desplazamiento del objeto y se puede intentar determinar la posición del mismo.

Sin embargo, estos sistemas presentan dos problemas. En primer lugar no son sistemas realimentados con la posición real del objeto, por lo que los errores pueden propagarse. Por ejemplo, para obtener el desplazamiento lineal del objeto es necesario integrar dos veces en el tiempo la aceleración. Si se produjese un pequeño error en la medida de la aceleración, al cabo de un cierto tiempo, este error se habría magnificado ya que se ha ido integrando doblemente en el tiempo.

El otro problema es que el IMU posee ruido intrínseco, al igual que cualquier dispositivo electrónico que se utilice para medir. Este ruido puede deberse a factores externos, como la temperatura o la gravedad, o a factores internos [11].

Por lo tanto, este tipo de sistemas no son de utilidad por sí solos. Sin embargo, debido al bajo coste de estos dispositivos, pueden hibridarse con alguno de los anteriores métodos de localización para mejorar el funcionamiento del conjunto del sistema [12][13].

## III. TECNOLOGÍAS PARA LOCALIZAR EN INTERIORES

En la actualidad existen multitud de tecnologías para localizar en interiores: láser, visión por computador, señales infrarrojas, señales de radiofrecuencia etc. Además con el método *fingerprint*, cualquier tipo de señal de la que se pueda medir alguna de sus características puede ser utilizada para localizar. Por lo que la cantidad de tecnologías que pueden utilizarse para localizar es enorme. En la figura I presenta un breve resumen de diferentes características de los sistemas de localización. En el Anexo A.3 presentamos en qué consiste cada tipo de tecnología.

TECNOLOGÍA	ALGORITMOS	EXACTITUD	COSTE
Ultrasonidos	RSS, TOA, TDOA, AOA, fingerprint	2-30cm	Bajo
RFID	Proximidad, RSS	Área	Bajo
UWB	RSS, TOA, TDOA, AOA, fingerprint	0.10-1m	Medio-Alto
WLAN	RSS, TOA, TDOA, fingerprint	1-5m	Bajo-Medio
Bluetooth	RSS, fingerprint	2-5m	Bajo-Medio
Campo magnético	Fingerprint	N/A	Bajo
Infrarrojos	Proximidad, RSS, fingerprint	0.05-Área	Bajo-Alto

Figura 1. Comparación de las tecnologías de localización en interiores

## 1.2. SISTEMA DE LOCALIZACIÓN

En la actualidad, el sistema de localización más usado en ámbitos hospitalarios es una solución que mediante radiofrecuencia (RF), en este caso, a 433MHz, permite controlar y ofrecer seguridad de manera individual tanto a usuarios como a trabajadores. Los usuarios del sistema portan *tags* de RF muy pequeños y compactos habitualmente en la muñeca o el tobillo. El sistema combina el uso de dispositivos para la localización, que generan un campo que define el área de cobertura para la detección de los *tags* en una zona de paso para cambio de planta, y receptores que posicionan los *tags* dentro de cada zona del centro.



Figura 2. Tag usado en el sistema de localización actual

Cuando una persona que porta un *tag* entra en una zona no permitida, el dispositivo puede generar alarmas. Su funcionamiento consiste en que el *software* recibe de cada antena la potencia de la señal de recepción de cada *tag* (RSSI) y con esa potencia y sabiendo qué antenas han recibido el mensaje y su posición en el plano, se calcula la posición estimada de cada *tag*. De la misma forma, se puede utilizar para impedir la salida no autorizada de residentes del centro (Sistema de Control de Errantes). [14]

El sistema permite la localización y monitorización de un *tag* en cualquier momento. Cada *tag* emite cada 16 segundos y toda la información es procesada desde el servidor central donde está instalado el sistema. En los puestos de control se personaliza el plano de cada centro y aparece en tiempo real la posición, el nombre y si ha existido una alarma. Una vez que se genera una alarma existen diversos métodos de aviso al personal asistencial: notificación a teléfonos inalámbricos, notificación en ordenadores de planta etc...

El sistema notifica de manera segura al personal asistencial, las situaciones potencialmente peligrosas, mientras este realiza sus tareas habituales en el centro. En el Anexo B.1 podremos observar que productos son necesarios para el funcionamiento correcto del sistema de localización.

El sistema se basa en la medida de RSSI para la localización. Sus inconvenientes son:

- El alcance de las antenas utilizadas es de tan sólo 6 metros lo que obliga a desplegar un número elevado de antenas en edificios amplios. El coste se incrementa no sólo por el propio componente sino especialmente por el cableado, tiempo de instalación, configuración y puesta en marcha.

La separación recomendada entre unidades es de 10 metros y la precisión conseguida es de alrededor de 3 metros.

- Como sabemos por la ecuación de Friis y podemos observar en su gráfica, se aprecia que en visión directa a distancias mayores es necesario alejarse más de la fuente para tener una disminución equivalente de RSSI.
- Como cualquier sistema basado en comunicaciones por radiofrecuencia, no se puede garantizar el funcionamiento preciso de este receptor en todas las situaciones.

Es posible que las interferencias, continuas o esporádicas, procedentes de distintos equipos electrónicos o de inhibidores de frecuencias, usados por los servicios de seguridad, imposibiliten la comunicación. La estructura y los elementos del interior de los edificios también pueden reducir considerablemente el alcance de la comunicación.

- La precisión en la localización de los *tags* depende de la medida de la potencia recibida durante la comunicación mediante radiofrecuencia.

Esta precisión puede disminuir por múltiples causas, como las interferencias provocadas por ruido electromagnético o emisores de radiofrecuencia (tanto en frecuencias cercanas a la utilizada para la comunicación como en sus armónicos) y la estructura del edificio y sus materiales, que puede generar

paredes con alta atenuación, superficies que provocan reflexiones en la señal de radio, etc.

Generalmente resulta muy difícil determinar las causas de una disminución en la precisión de la localización.

- El sistema calcula la ubicación de un *tag* utilizando la potencia con la que cada antena recibe el mensaje de notificación de ese *tag* (RSSI).

Hay que tener en cuenta que RSSI no es un valor lineal (no disminuye proporcionalmente a la distancia) sino que la variación es exponencial, disminuyendo muy rápido en los 2 o 3 primeros metros de distancia a la antena y más lentamente a medida que aumenta esa distancia.

Esta es la razón por la que pequeñas variaciones en la señal recibida puedan generar errores significativos en la localización de un *tag* y por ello, todos los sistemas de localización basados en RF ofrecen una precisión de varios metros.

Por todo ello, se tuvo la motivación para la búsqueda de una nueva tecnología para la implementación de un nuevo sistema de localización más eficiente, con coste inferior y consiguiendo más precisión, es decir, para la localización en interiores en entorno hospitalario y puesto que se dispone de los planos de las estancias, un error menos de 3m sería un buen resultado ya que se mejoraría el anterior sistema de localización.

La solución escogida fue UWB (*ultra wideband*) donde en el Anexo B.2 se hace una explicación sobre su historia y funcionamiento.

En la siguiente tabla se presentan las ventajas que nos ofrece esta tecnología y el beneficio que causan en el rendimiento del sistema:

<b>Ventaja</b>	<b>Beneficio</b>
Coexistencia con los actuales servicios de banda estrecha y banda ancha	Evita gastos en el pago de licencias del espectro
Gran capacidad del canal	Un gran ancho de banda puede soportar aplicaciones en tiempo real
Capacidad para trabajar con bajos niveles de SNR	Ofrece un buen rendimiento en entornos ruidosos
Baja potencia de transmisión	Facilita un alto grado de seguridad, impidiendo Intercepción y Detección
Resistencia al <i>jamming</i>	Fiable en entornos hostiles
Gran rendimiento en canales <i>multi-path</i>	Entrega un buen nivel de señal incluso en condiciones adversas
Arquitectura simple del transceptor	Proporciona potencia ultra-reducida, menores factores de forma, y mejor tiempo medio entre fallos, y todo ello con costes reducidos.

**Figura 3. Tabla de ventajas y beneficios de UWB**

En el Anexo B.3 recogemos una explicación más extensa de las ventajas y beneficios comentados en la anterior tabla.



## Capítulo 2

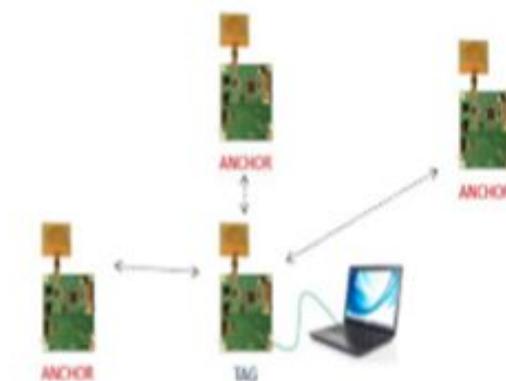
### **Kit *Decawave***

De las diferentes posibilidades que existen en el mercado actualmente para localización en interiores, nos decantamos por realizar las pruebas de viabilidad con el modelo Trek1000 de *Decawave* [15] debido a su accesibilidad, a que está bien documentado y a su precio asequible.

#### 2.1.¿QUÉ ES?

Según su fabricante, Trek1000 es la solución ideal para evaluar el rendimiento sin igual de la tecnología de *Decawave*. Es fácil y rápido de configurar. Consta de cuatro unidades que pueden funcionar como antena fija o como *tag*. Permite a los usuarios evaluar el rendimiento del circuito integrado DW1000 de banda ultra ancha (UWB) *Decawave* en aplicaciones de localización en tiempo real (*Real Time Locating Systems, RTLS*) en diversas topologías. Existen tres posibilidades:

- Seguimiento
- Contención en perímetro de seguridad
- Navegación- Utilizando 3 antenas fijas y 1*tag*. Conectado directamente a la etiqueta, el usuario será capaz de caminar y visualizar su posición actual, lo que permite poner a prueba escenarios robótica de navegación y humanos.



**Figura 4. Topología navegación**

## 2.2 COMPONENTES

El kit de evaluación consta de las 4 unidades citadas, *software* de aplicación para PC y código fuente para las tarjetas y para mostrar los resultados de localización en pantalla.

Description	Quantity	Image
EVB1000 PCB	4	
UWB Antenna	4	
EVB1000 Stands	4	
DC Power Leads	4	
1.8 m USB Cable	3	
60 cm USB Cable	1	
Quick Start Guide	1	

Figura 5. Tabla con los componentes kit *Decawave*

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DEL KIT

- 4 unidades, configurables como antenas fijas o *tags*.
- Software de aplicación PC.
- Soporta dos modos: de baja potencia o de largo alcance.
- Capaz de comunicaciones de alta velocidad de datos, de hasta 6,8 Mb / s.
- La conexión externa disponible permite la evaluación de diferentes opciones de antena.
- Puede operar en el canal UWB 2 (4 GHz) o el canal 5 (6.5GHz).
- Todas las unidades DW1000 utilizan un solo chip transceptor UWB de *Decawave*.

A continuación mostraremos todos los componentes del kit con el que haremos las pruebas:



Figura 6. Componentes de la placa EVB100

## 2.4 DECAWAVE DW1000IC

El DW1000 es una integración completa de baja potencia, es un único chip CMOS transmisor-receptor de radio compatible con el estándar IEEE 802.15.4-2011 de banda ultra ancha (UWB). En el Anexo C.1 tenemos su hoja de características técnicas.

- Se facilita la detección de proximidad con una precisión de +/- 10 cm utilizando mediciones de tiempo de vuelo (*Time of flight*, TOF) de ida y vuelta.
- Facilita la localización en tiempo real de los objetos con una precisión de +/- 30 cm en los ejes espaciales X e Y utilizando medidas de distancia bidireccionales (TOF) o mediante diferencias de tiempo entre llegadas en modos unidireccionales (TDOA).
- Se extiende por 6 bandas de RF de 3,5 GHz a 6,5 GHz.
- Es compatible con tasas de transmisión de 110 kbps, 850 kbps y 6,8 Mbps .

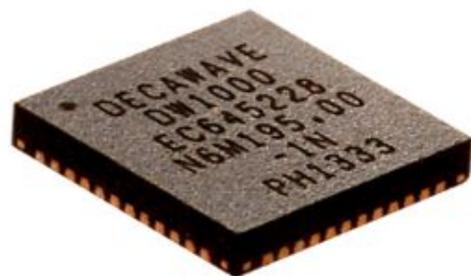


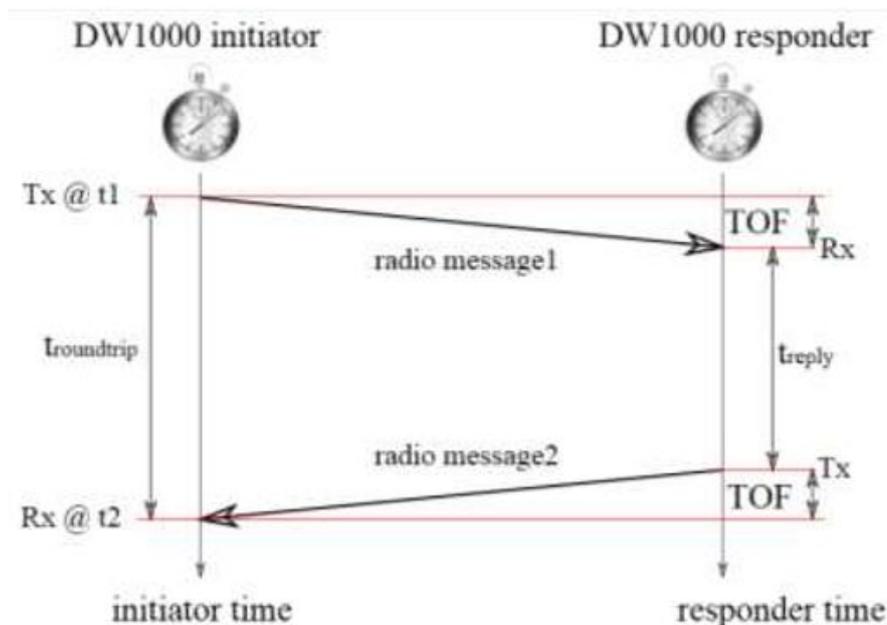
Figura7. Chip DW1000

- Estas tasas de transmisión elevadas permiten reducir el tiempo de emisión, con los consiguientes beneficios de ahorro de energía e incremento de la vida útil de la batería.
- Su robustez frente a entornos hostiles con multitrayecto lo hace ideal para entornos de RF altamente reflectantes.
- Soporta ubicación precisa y transferencia de datos simultáneamente, con alta inmunidad frente a desvanecimientos y multitrayecto.

## 2.5 CÓMO LOCALIZAN

Si usamos un par de DW1000s, designados como iniciador y como respondedor respectivamente, podemos describir el procedimiento de estimación de distancia bidireccional como sigue. [16]

El iniciador transmite un mensaje de radio al respondedor y registra su tiempo de transmisión  $t_1$ . El respondedor recibe el mensaje y transmite una respuesta (un mensaje de radio) al iniciador después de un retraso determinado. El iniciador recibe entonces esta respuesta y registra una marca de tiempo de recepción  $t_2$ . Este proceso se ilustra en la Figura 8.



**Figura 8. Trama de tiempos entre dos DW1000**

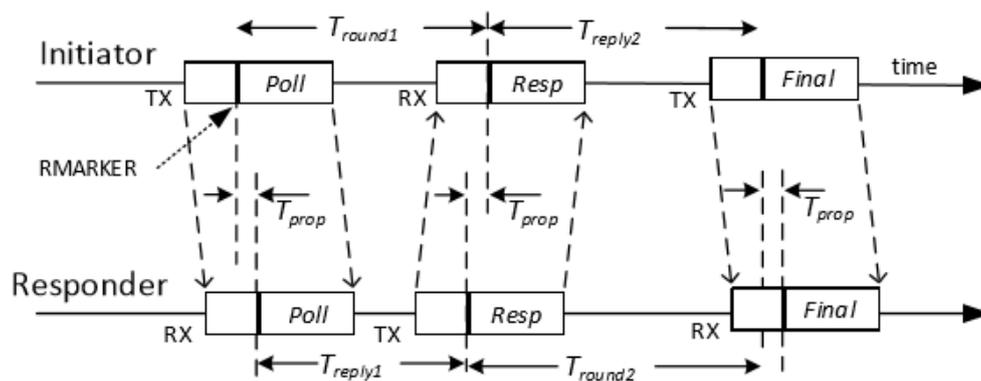
Ahora, usando las marcas de tiempo  $t_1$  y  $t_2$ , el iniciador puede calcular el tiempo de ida y vuelta  $t_{roundstrip}$  y conocido el tiempo de respuesta en la etiqueta,  $t_{reply}$ , el TOF puede ser determinado por:

$$TOF = \frac{t_2 - t_1 - t_{reply}}{2}$$

Si asumimos que la velocidad de las ondas de radio a través del aire es la misma que la velocidad de la luz  $c$ , entonces la distancia entre el iniciador y el respondedor puede ser calculada por,

$$Distance = c \times \frac{t_2 - t_1 - t_{reply}}{2}$$

En este mecanismo de estimación bidireccional de distancia existen fuentes de error asociadas a la desviación de la frecuencia de cada reloj respecto a la nominal y a la deriva de las mismas. En la implementación de *Decawave* se utiliza un método asimétrico de doble sentido TWR. Esto reduce notablemente los errores antes mencionados, a costa de alargar el proceso de determinación de la posición e incrementar el consumo de batería al precisar tres mensajes en lugar de dos. La Figura 9 muestra un método *Poll-Response-Final* para TWR y además muestra la fórmula utilizada para el cálculo de TOF.



**Figura 9. Método para el cálculo TWR**

El mensaje Final comunica los tiempos  $T_{round}$  y  $T_{reply}$  del iniciador al respondedor, que calcula el rango al iniciador de la siguiente manera:

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

En el Anexo C.2 se explica la implementación con sus respectivas fases.



# Capítulo 3

## 3.1 PUESTA EN MARCHA DEL KITDECAWAVE

En este estudio, se ha elegido un edificio de dos plantas que se encuentra en el polígono de Cogullada, en Zaragoza donde se ejecutan la mayor parte de las pruebas en la planta superior del mismo. En él se encuentran diferentes escenarios y resoluciones que se necesitan para abarcar todas las posibilidades que pueden encontrarse en el mercado hospitalario.

Como se ha comentado anteriormente, se utilizan tres antenas fijas y un *tag*. Cada antena se debe programar con unos pines indicados por el fabricante para distinguir la enumeración de las mismas ( $A_0$ ,  $A_1$  y  $A_2$ ) ya que  $A_0$  será la que mediante cable USB irá conectada al ordenador donde se ejecutarán las pruebas.

El software sólo funcionará cuando la antena  $A_0$  esté conectada al ordenador. Este software permite determinar automáticamente la posición relativa en que se encuentran las antenas mediante un botón de auto posicionamiento o alternativamente se puede introducir la posición en la que se encuentran (siempre la antena  $A_0$  se encontrará en la posición 0:0:0 y será la referencia). No obstante, en la pantalla se visualizan con un punto y su respectivo orden dónde se ubican las mismas. El *tag* también se encuentra en la pantalla y se irá moviendo en la misma conforme el individuo lo haga. Además nos marcará la distancia del *tag* con respecto a las tres antenas fijas. Todo lo comentado, se observa en las siguientes figuras.

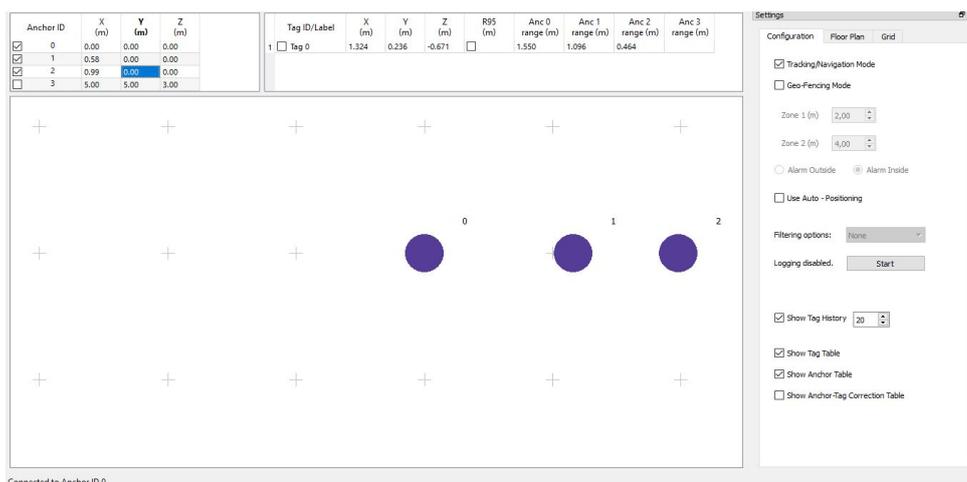
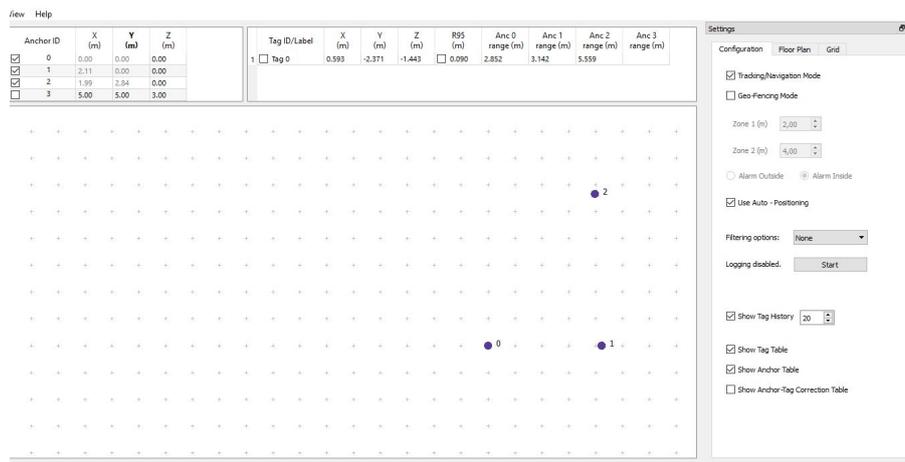


Figura 10. Captura de pantalla con las antenas en disposición lineal



**Figura 11. Captura de pantalla con las antenas en disposición de triangulación**

Desde el momento en que se pulsa *start* se almacenan en un archivo .txt las distancias (en metros) desde el *tag* a las 3 antenas fijas hasta que se pulsa el botón *stop* con una tasa fija cada 280ms. Esto quiere decir que en cada medición que se vaya tomando se adquiere una serie de valores en la misma posición y a partir de la estadística sobre ellos se determina la posición del *tag* y la precisión estimada para la misma.

En el Anexo 3.1 podemos visualizar como son esos archivos txt y que mediciones contienen.

Como se observa, la puesta en marcha y el modo de utilización es muy sencillo, junto con la robustez del equipo y la sencillez del despliegue, estas son las razones que llevaron a seleccionarlo para las pruebas. [17].



**Figura 12. Puesta en marcha del kit**

## 3.2 MEDICIONES

### I. MEDICIONES EN EXTERIOR

La primera prueba que se realizó fue la puesta en marcha del sistema de localización en exteriores, ya que aunque este proyecto trata sobre la viabilidad de la tecnología UWB en interiores, el edificio tiene una longitud limitada, y de esta manera se podía comprobar el alcance máximo total que se podía obtener con el kit.

Se pusieron las antenas en triangulación y se repitieron dos veces las mediciones para cerciorar el alcance que se obtenía, una de ellas tomando medidas cada 1,5 metros desplazando en línea el *tag* con la  $A_0$  y otra repitiendo el mismo caso pero en línea respecto de  $A_1$ .

En ambos casos se obtuvo el mismo alcance, en el entorno de 80 metros, que se redujo a 35 metros si el cuerpo de una persona se interponía entre el *tag* y las antenas.

En nuestra aplicación, se debe de tener en cuenta el caso máximo de 35 metros ya que el *tag* será siempre portado por personas y no sabemos cómo se encontrarán las antenas respecto al *tag*.

### II. MEDICIONES EN DESPLAZAMIENTOS LINEALES EN INTERIOR

Para poder tratar y mostrar los datos, se hizo un script en Matlab que nos permitirá saber la media de todo el conjunto de mediciones que se guardan en los archivos .txt y su covarianza. En el anexo 3.2 podemos ver la programación del mismo.

En la siguiente figura se muestran los tres escenarios diferentes que planteamos para determinar la capacidad de localización del kit *Decawave*, uno más favorable en desplazamiento lineal con visión directa entre el *tag* y las antenas localizadoras y dos más desfavorables en desplazamiento lineal con obstáculos interpuestos.

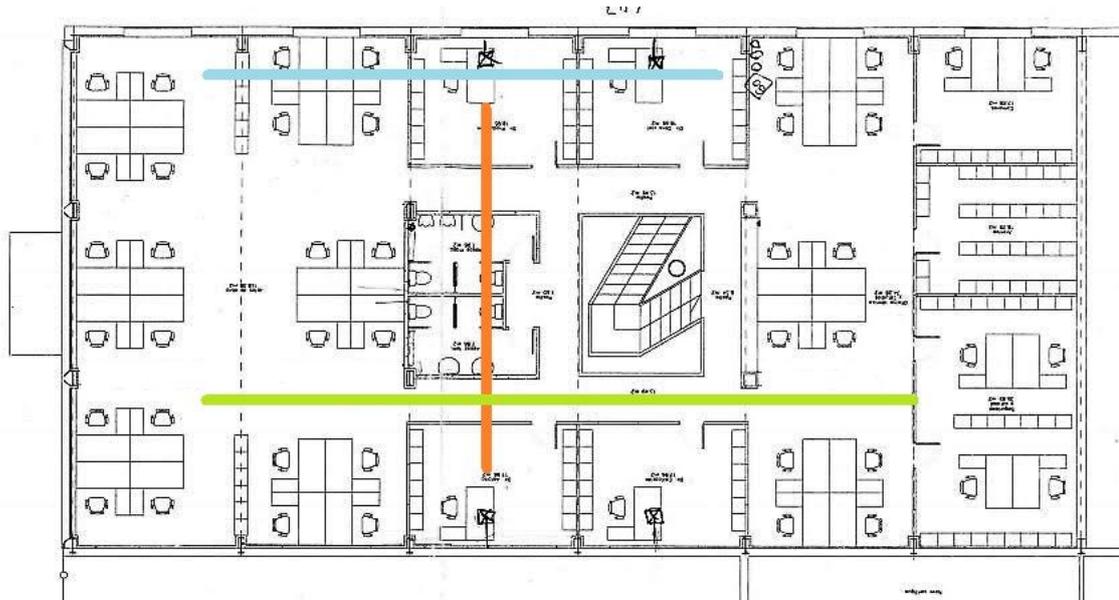


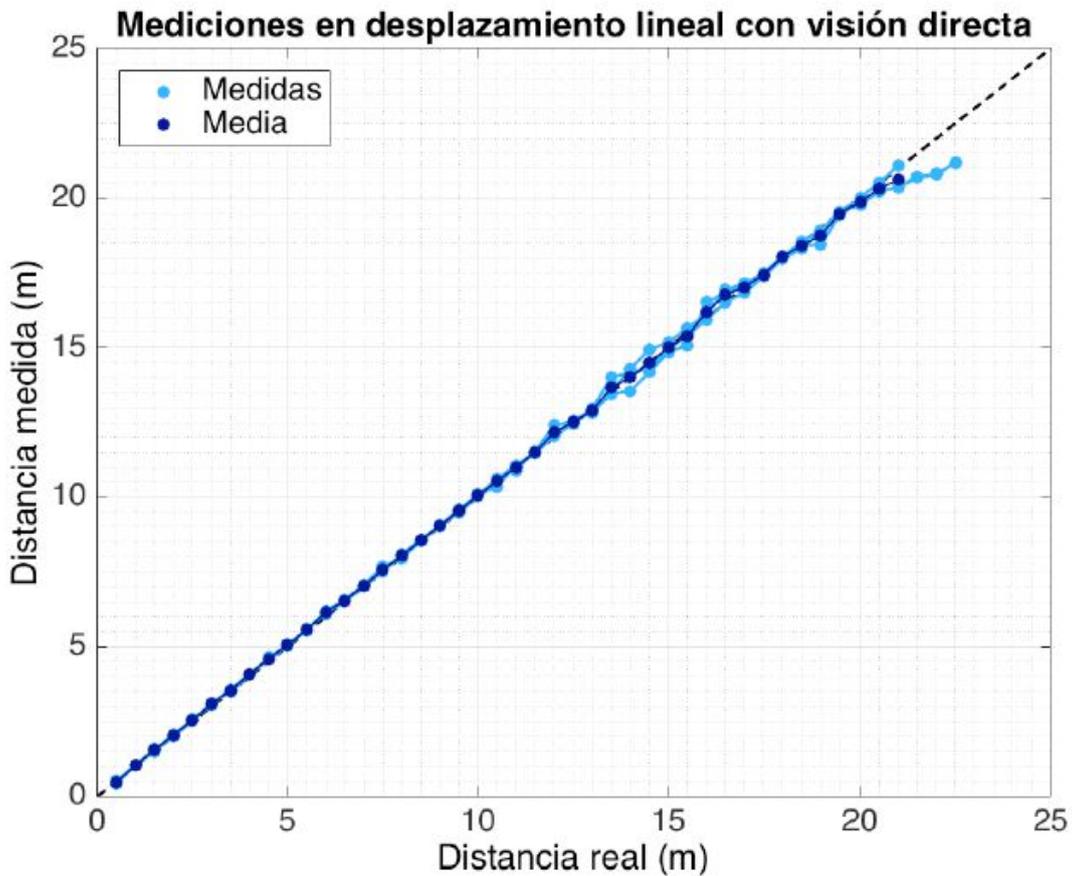
Figura 13. A) ————— Desplazamiento lineal en visión directa

B) ————— Sala tipo 1

C) ————— Sala tipo 2

El primer escenario en la planta superior del edificio (localización en interior), consistió en realizar desplazamientos lineales manteniendo la visión directa con el kit *Decawave*. Se pusieron las antenas fijas en modo lineal cada 0,5m para poder tomar en una única medición 3 valores y así obtener medidas para 1,5 metros que es lo que se va desplazando el *tag*.

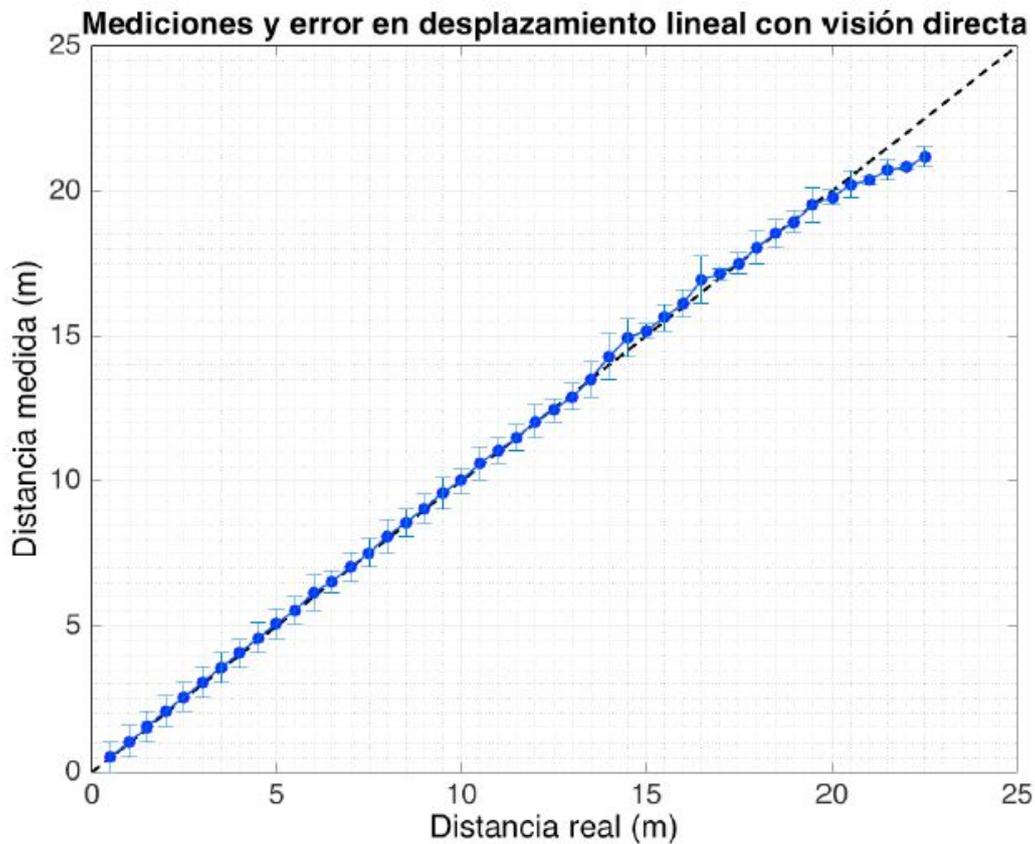
Para contrastar la reproducibilidad de las medidas obtenidas, realizamos estas mismas mediciones en diferentes días varias veces. Los resultados se muestran a continuación.



**Figura 14. Mediciones en desplazamiento lineal con visión directa**

Como se observa en la gráfica, en interiores se tiene un alcance en visión directa de al menos 22 metros, que es la distancia máxima sin obstáculos de la que podemos disponer en la planta de pruebas. No obstante, es un alcance suficiente ya que en un edificio de entorno hospitalario no encontraremos habitualmente zonas de visión directa de longitud superior a 20 metros. Se obtienen unas mediciones muy precisas y aunque conforme el *tag* se aleja de las antenas se pierde un poco de precisión, en ningún momento se pierde la conexión con ninguna antena. La merma en precisión puede deberse a una ligera perturbación por multitrayecto.

En la siguiente gráfica se muestra superpuesto el error estimado en una de las mediciones realizadas.

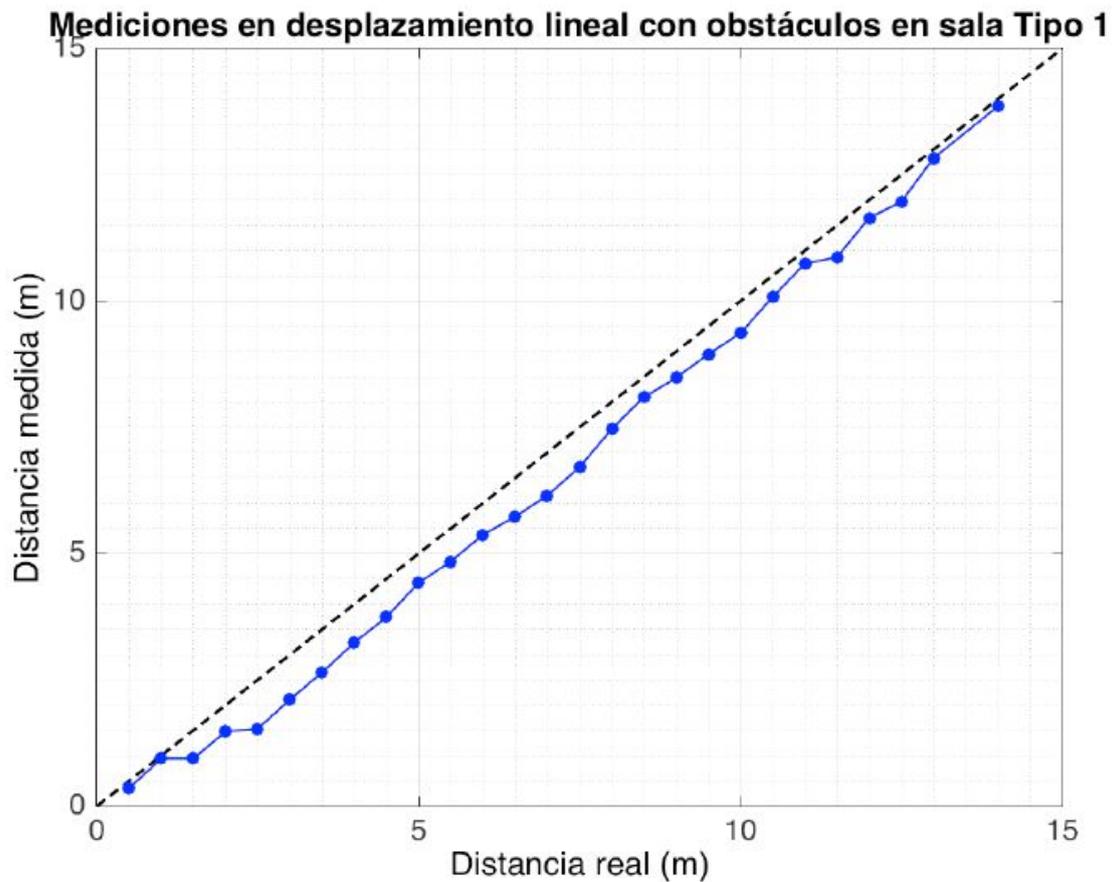


**Figura 15. Mediciones y error en desplazamiento lineal con visión directa**

En cuanto a la precisión, se puede apreciar que cuando el *tag* está cerca de las antenas, hasta prácticamente unos 14 metros, su comportamiento es aproximadamente ideal. Desde ahí y hasta la distancia máxima disponible en visión directa la precisión se degrada progresivamente, pero queda bien dentro del margen de error deseado inferior a 1m.

La segunda prueba importante era comprobar el comportamiento del sistema de localización sin visión directa, con los obstáculos que se pueden encontrar en un edificio. Se plantearon dos escenarios como se indicaba en la figura 13.

En la sala tipo 1, realizamos las mediciones desplazándonos en la vertical del plano del edificio, atravesando los baños donde nos encontramos con forjados y paredes de ladrillo.

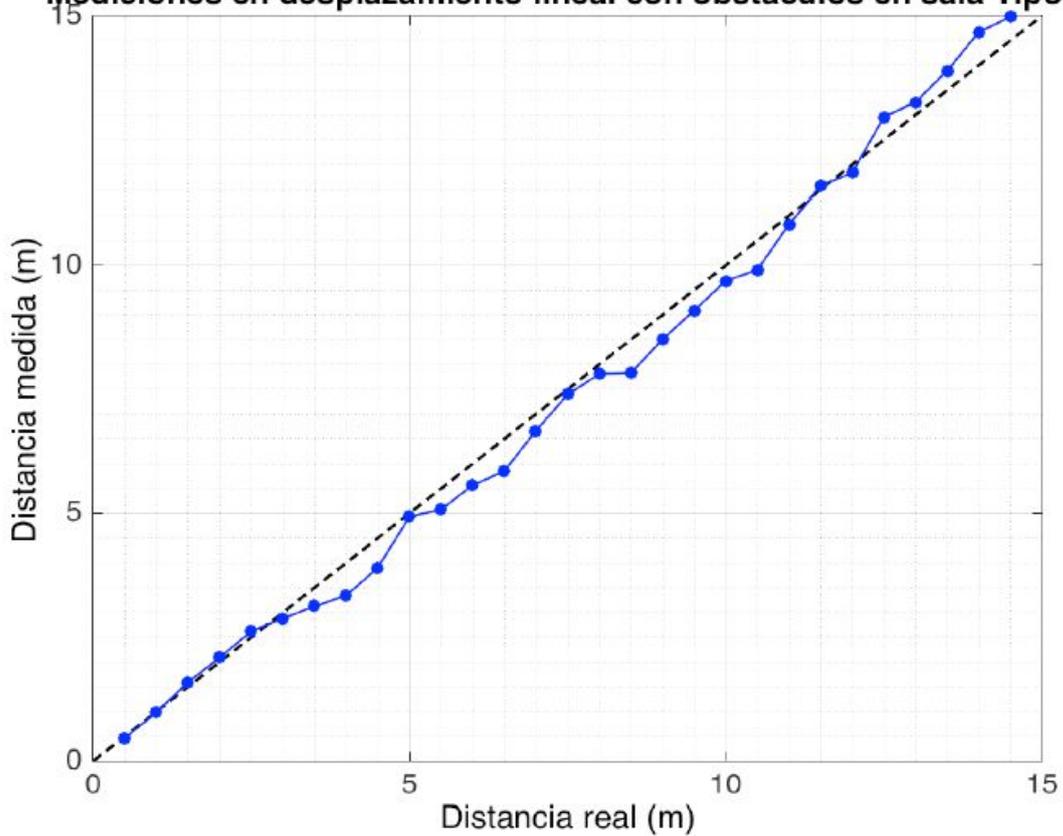


**Figura 16. Mediciones en desplazamiento lineal con obstáculos en sala tipo 1**

El primer efecto que se aprecia en la gráfica es la reducción del alcance a 14 metros, no obstante, se observa que en todo momento las antenas detectan al *tag* y que el error sistemático en la estimación de distancia queda acotado por debajo de 0,4m.

En la sala tipo 2, realizamos las mediciones desplazándonos en horizontal en el plano del edificio, atravesando diversas salas con tabiques de pladur y mobiliario fabricado con diferentes materiales.

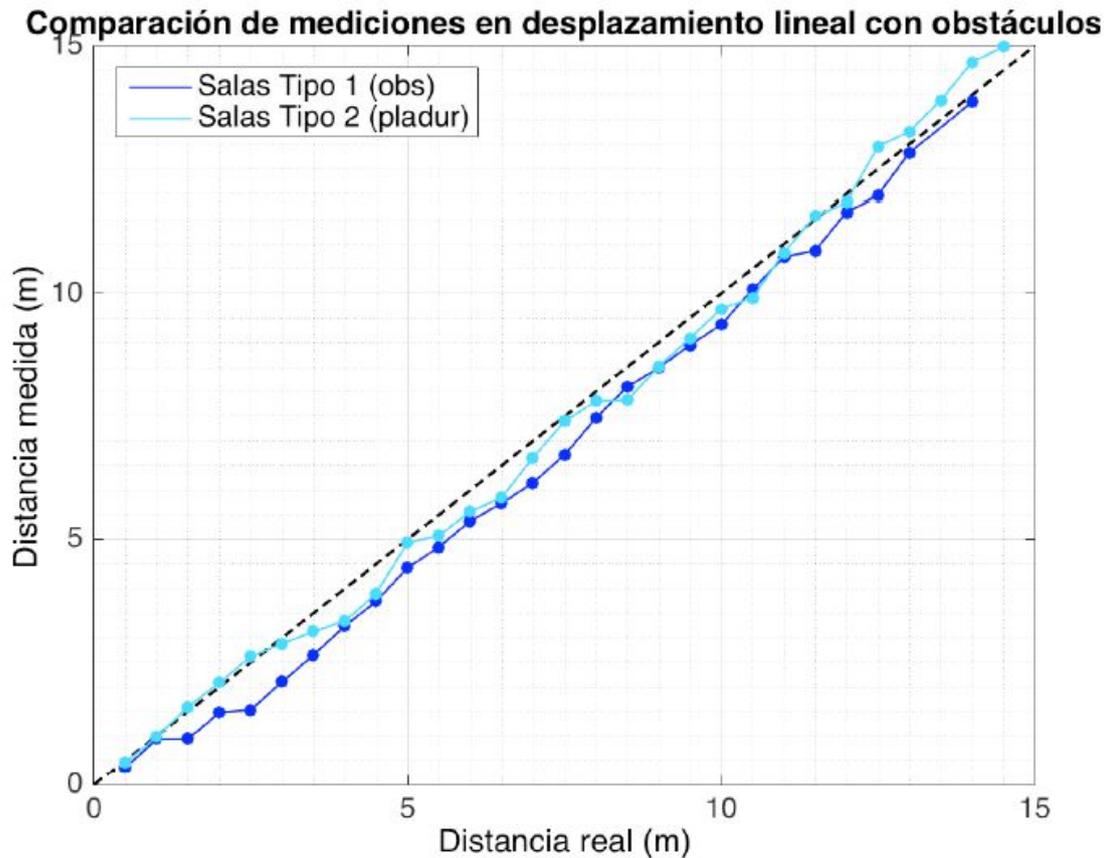
### Mediciones en desplazamiento lineal con obstáculos en sala Tipo 2



**Figura 17. Mediciones en desplazamiento lineal con obstáculos en sala tipo 2**

En este caso, el valor del alcance se encuentra también alrededor de 15 metros y se obtiene un error que aun siendo similar al anterior caso ya no es sistemático, probablemente debido a que dependiendo de la posición del *tag*, es posible que el pulso no sufra efectos de multitrayecto apreciables porque no se interponga mobiliario entre él mismo y las antenas.

En la gráfica siguiente se muestran datos de los dos escenarios en conjunto:



**Figura 18.** Comparación de mediciones en desplazamiento lineal con obstáculos

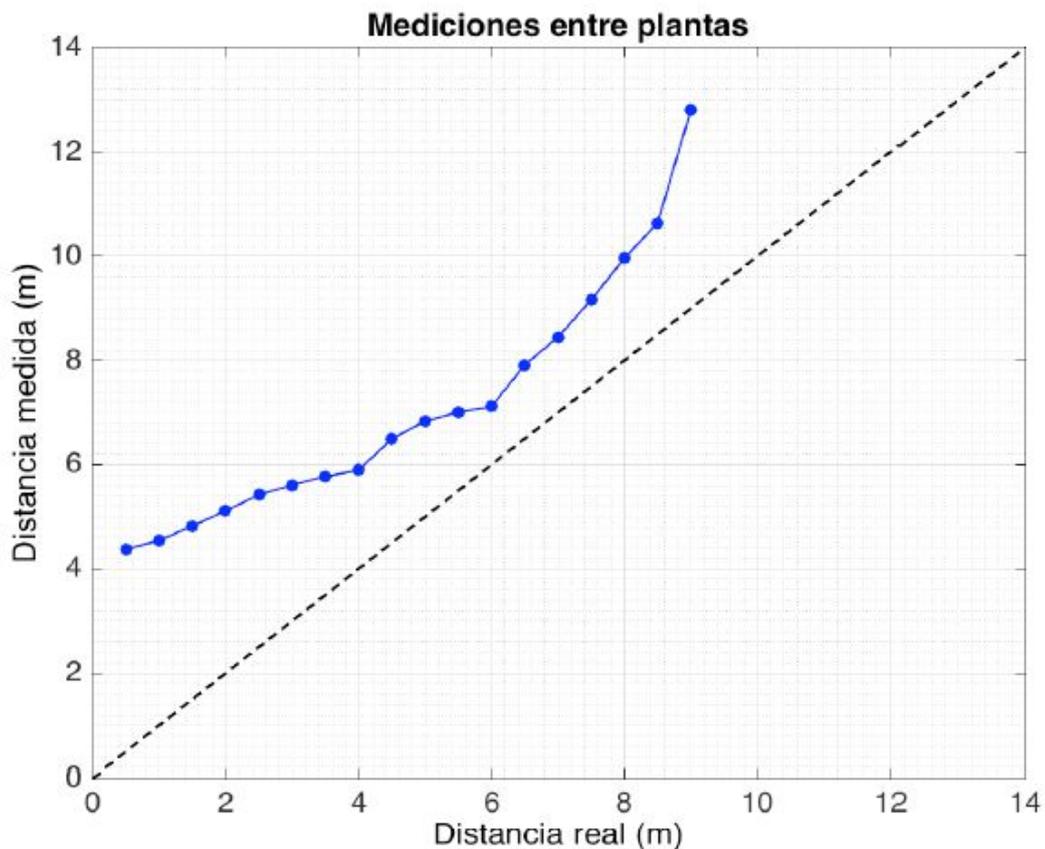
Como se comentaba, ambos escenarios dan resultados satisfactorios. En el caso de la sala tipo 2 se encuentra más cerca de idealidad y el alcance es un poco mayor debido a que los obstáculos presentes son menos intrusivos y en consecuencia dan menos problemas que en el caso de la sala tipo 1. Después de todas las pruebas, podemos asegurar que el alcance esperado para el sistema de localización es en el peor de los casos de unos 14 metros considerando el caso más restrictivo debido a los obstáculos del escenario 1.

Como se observa, en la sala tipo 1 dependiendo de dónde esté situado el *tag* la precisión fluctúa, aunque sistemáticamente la distancia se infravalora. En la sala tipo 2, la fluctuación es más aleatoria. En ambos casos, la precisión es suficientemente buena.

### III. MEDICIONES ENTRES PLANTAS

Para finalizar las mediciones en desplazamientos lineales, se abordó un tercer escenario con las antenas localizadoras en una planta y el *tag* desplazándose en la planta superior. El sistema de localización actual precisa un dispositivo que se ubica en escaleras y ascensores (cambios de planta).

La siguiente figura que nos ofrece una clara visión de lo que sucede con el sistema *Decawave*.



**Figura 19. Mediciones entre plantas**

Se observa que el pulso UWB detectado está fuertemente influenciado por multicamino. La distancia se sobreestima apreciablemente, la señal directa se verá muy atenuada por el forjado metálico de la entreplanta. Los valores de distancia estimados se corresponden con reflexiones de la señal compatibles con la geometría de la zona en la que se realizó la prueba. El análisis detallado de todas las posibles trayectorias multicamino permitirá explicar con más exactitud la señal detectada, pero queda fuera del alcance de este trabajo.

El problema de cambio de planta por tanto no se resuelve directamente mediante el uso de tecnología UWB. Seguirá siendo necesario desplegar detectores de cambio de planta específicos.

### 3.2.3 MEDICIONES MEDIANTE TRIANGULACIÓN

Una vez que se ha establecido el alcance máximo admisible en interiores para obtener la precisión deseada en la localización, incluso mediando obstáculos para estimar la densidad de antenas detectoras que debería desplegarse, pasamos a realizar pruebas de localización mediante triangulación.

Para ello en primer lugar se comprobó la precisión y el correcto funcionamiento del kit, realizando pruebas en la sala más grande de la planta superior sin obstáculos. Fijamos las antenas de forma que quedaron en triangulación y se hicieron varias series de medidas siguiendo una trayectoria alrededor de las antenas emisoras.

En la imagen se observa la posición de las antenas fijas, la posición real de la antena móvil durante el recorrido y las posiciones estimadas por el kit.



**Figura 20a. Plano de mediciones con antenas en triangulación**

Como se observa en el plano, en todo momento las antenas no pierden el tag, pero se aprecia que en los puntos más alejados y donde se atraviesan más obstáculos (puntos

3, 4, 5, 6 y 7) la precisión es menor llegando a casi 2m. En la siguiente tabla recogemos a la distancia que se encuentra nuestra antena  $A_0$  con respecto al *tag* y el error que se comete.

Antena	Distancia a $A_0$	Error	Antena	Distancia a $A_0$	Error
1	4,1	2	6	11,4	0,8
2	7	0,2	7	7,4	1,7
3	14,2	1,5	8	3,5	0,3
4	16,3	2,3	9	4,7	0,3
5	15,2	1,7	10	5,4	2,2

**Figura 20b. Tabla con las distancias del *tag* con respecto a antena  $A_0$  y su error**

El efecto del multirayecto es mucho más importante en medidas de triangulación que en disposición lineal, donde sólo se mide distancia. En el caso de la aplicación real del sistema de localización UWB hay dos estrategias que permiten paliar esta dificultad. Por un lado, la densidad de antenas fijas será superior a la que hemos podido desplegar con el kit. Y en segundo lugar es posible calibrar la sensibilidad en recepción de las antenas y ajustar la longitud de los preámbulos en los mensajes, de acuerdo con un procedimiento recomendado por el fabricante, una vez desplegada la red, para minimizar el error por interferencia multicamino.

# Capítulo 4

## 4.1 ELECCIÓN DE LAS ANTENAS PARA EL TAG

Sabiendo que el comportamiento del kit es suficientemente bueno para su aplicación en entorno hospitalario, lo idóneo sería encontrar una antena más pequeña para poderla usar como *tag* sin pérdida de prestaciones. Para ello se buscaron antenas comerciales en la práctica totalidad de suministradores de material electrónico. La realidad constatada es que al ser una tecnología reciente y no muy desarrollada no hay muchas opciones posibles. Los puntos más importantes para la elección fueron:

- Rango de frecuencia
- Tipo de antena
- Tipo de montaje
- Precio

Otras características menos relevantes consideradas fueron:

- Potencia máxima
- Ganancia
- Nivel de sensibilidad a la humedad
- Plazo estándar del fabricante

El tamaño reducido de la antena fundamental para que permita montar la electrónica en un soporte tipo “reloj” que puedan llevar cómodamente los enfermos y el personal sanitario. Debido a la previsible necesidad de compra de gran número de unidades, el precio es un factor que también influye en la decisión.

Después de analizar las características de las veintitrés posibles antenas con aplicación UWB localizadas en el mercado, se eligieron las tres opciones más prometedoras para estudiarlas en detalle y probarlas montadas en las tarjetas del kit para posteriormente tomar la decisión de cuál es la mejor opción para equipar los *tag*. Estas antenas son las siguientes [18]:

➤ AH086M555003-T

- Fabricante: *Taido Yuden*
- Frecuencia (centro/banda): 3.5GHz, 5.6GHz
- Rango de frecuencia: 3.2 GHz ~ 7.2 GHz
- Ganancia: 2.6dBi, 0.7dBi
- Montaje en superficie
- Altura máxima: 0.047" (1.20mm)
- Dimensiones: 8\*6\*1 mm
- Antena multicapa
- Tipo de antena: Chip
- Precio: 1.88€
- Impedancia: 50Ω
- UWB según lo definido por el UIT-R y FCC



**Figura 21. Antena Taido**

➤ 3100AT51A7200E

- Fabricante: *Johanson Technology*
- Frecuencia (centro/banda): 6.7GHz
- Rango de frecuencia: 3.1 GHz ~ 10.3 GHz
- Frecuencia (centro/banda): 6.7GHz
- Ganancia: 1.5dBi
- Montaje en superficie
- Altura máxima: 0.047" (1.20mm)
- Dimensiones: 10\*6\*1.2 mm
- Tipo de antena: Chip
- Precio: 2.11€
- Impedancia: 50Ω
- UWB según lo definido por el UIT-R y FCC



**Figura 22. Antena Johanson**

➤ Antena ACA-107-T

- Fabricante: *Abracon*
- Frecuencia (centro/banda): 5.2GHz
- Rango de frecuencia: 3.1 GHz ~ 8 GHz
- Ganancia: 4.16dBi
- Montaje en superficie
- Altura máxima: 0.039" (1.00mm)
- Dimensiones: 8\*6\*1.2 mm
- Tipo de antena: Chip
- Precio: 1.46€
- Impedancia: 50Ω
- Polarización lineal
- Construido en material cerámico dieléctrico sólido
- UWB según lo definido por el UIT-R y FCC



**Figura 23. Antena *Abracon***

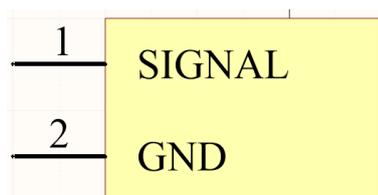
La caracterización de estas antenas consistió en comprobar los resultados obtenidos cuando se le someta a las distintas series de mediciones en los mismos escenarios en los que hemos estado comprobando el correcto funcionamiento del kit.

## 4.2 DISEÑO DEL PCB PARA LAS ANTENAS ELEGIDAS

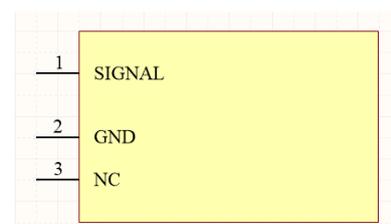
Una vez seleccionadas las antenas, resulta necesario diseñar para cada una de ellas, una placa de circuito impreso para montarla, junto con un conector SMA para su conexión al kit EVB1000. Para ello usaremos el programa *Altium*.

El procedimiento seguido en los tres casos es el mismo:

- Primero se crea un esquemático. En este caso será el mismo para el conector SMA, las antenas *Taido* y *Abracon*. En las siguientes figuras veremos cómo son ambos casos.



**Figura 24. Esquemático *Taido*, *Abracon* y *SMA***



**Figura 25. Esquemático *Johanson***

- El segundo paso es crear el PCB de los 4 items, cumpliendo con los procedimientos de sus fichas técnicas. En el Anexo D.1 se recoge el procedimiento recomendado por cada fabricante.
- Por último, crearemos el proyecto de cada una de las antenas y del conector. Para ello, tendremos que adaptar las impedancias con una línea de transmisión de  $50 \Omega$ , procedimiento que se explica en el Anexo D.2 con más detalle.

Finalmente los PCB quedan de la siguiente forma:

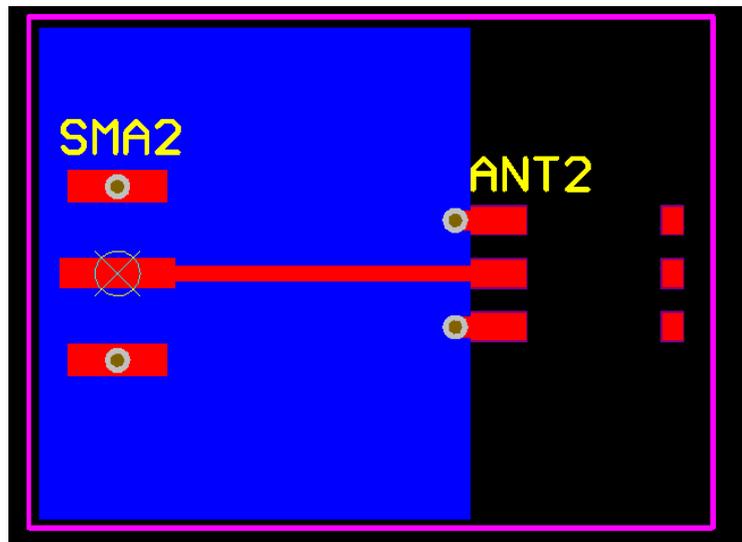


Figura 26. PCB de antena *Johanson*

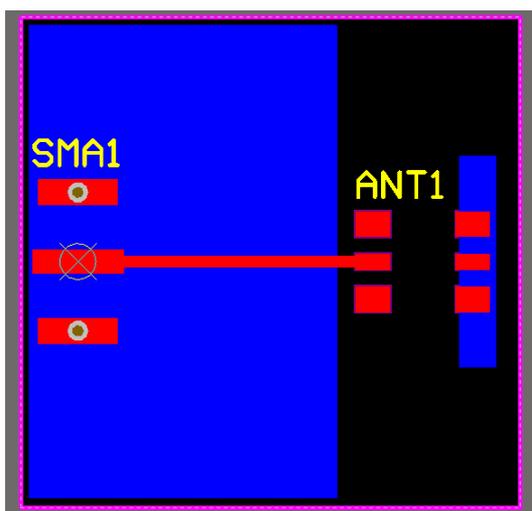


Figura 27. PCB de antena *Taido*

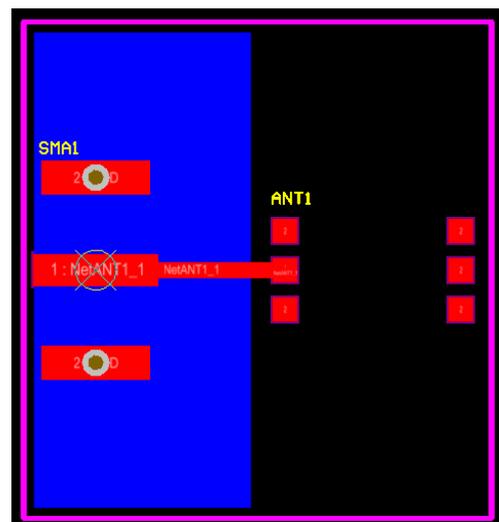
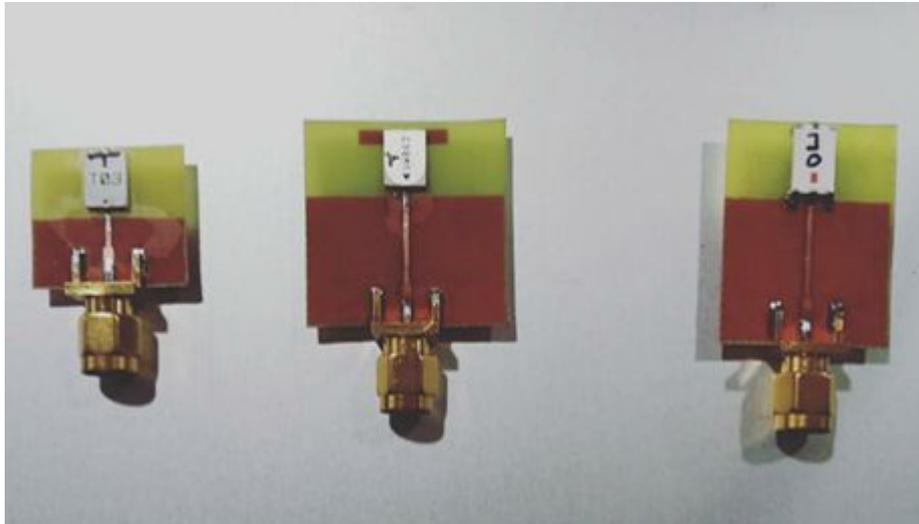


Figura 28. PCB de antena *Abracon*

Una vez fabricado el PCB de las tres antenas, el resultado fue el que se muestra en la siguiente figura con las tres antenas montadas para relizar las mediciones.



**Figura 29. PCB de las tres antenas elegidas**

### 4.3 MEDICIONES

Con las tres antenas montadas en sus soportes, simplemente la antena que se utiliza como *tag* fue sustituida sucesivamente por cada una de las nuevas y se repitieron las distintas pruebas.

Si se encuentra que dos de ellas tienen unos resultados aproximadamente iguales, se tendrá en cuenta el tamaño y el precio de las mismas como factores de decisión.

#### I. MEDICIONES DE DESPLAZAMIENTOS LINEALES EN INTERIOR

Se repitieron las pruebas de desplazamiento lineal con visión directa para observar si el alcance obtenido con la antena *Decawave* se mantiene o si se obtienen otros valores con las antenas elegidas.

En primer lugar, se muestran los resultados de visión directa de la antena *Abracon* con su respectivo error.

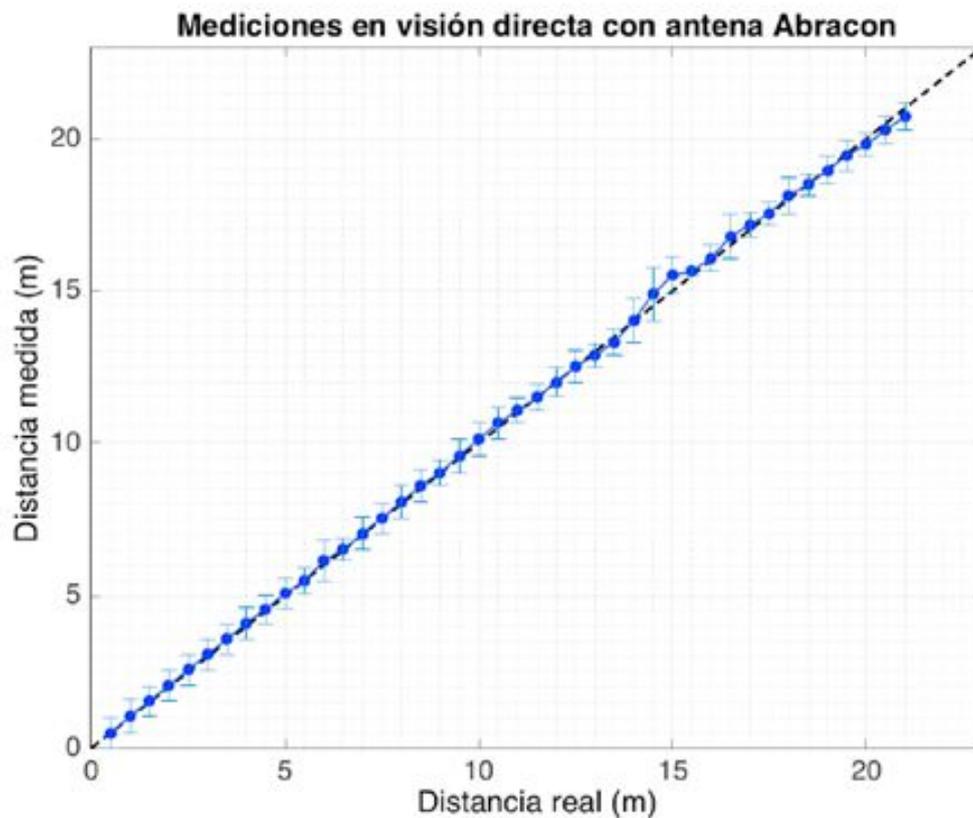
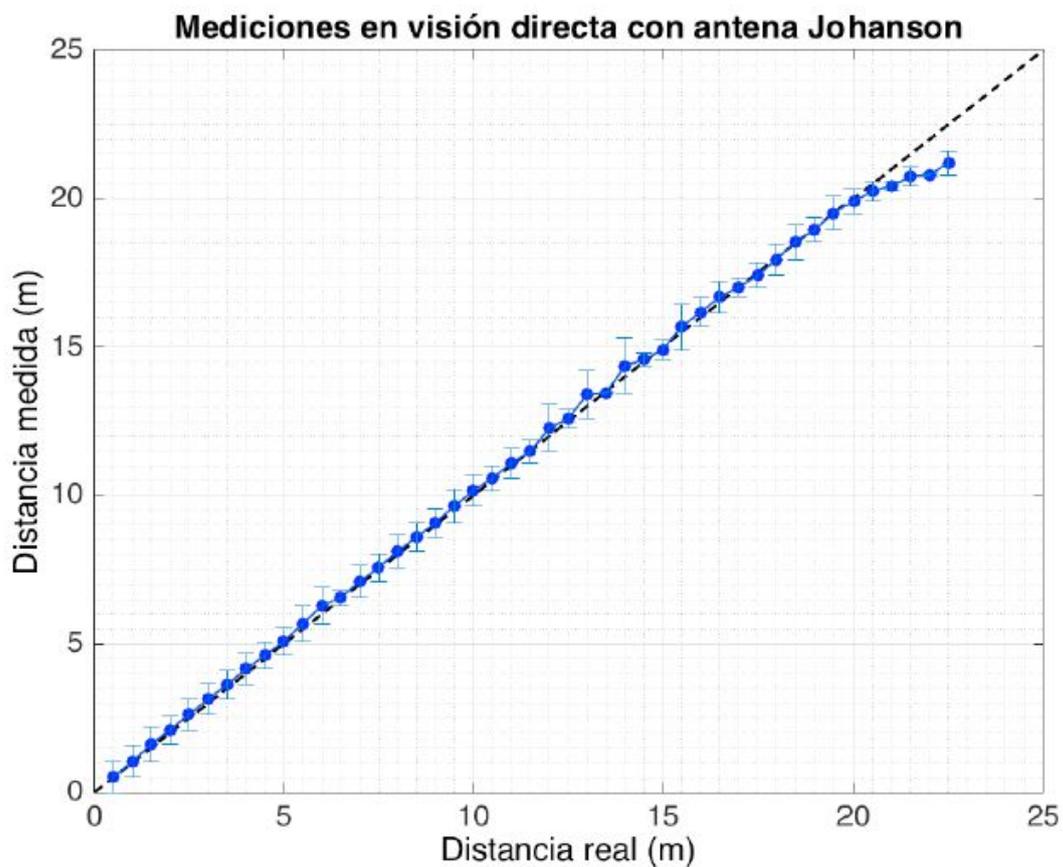


Figura 30. Gráfica conjunto mediciones en visión directa con antena *Abracon*

Se observa que el alcance de la misma no se reduce y podemos seguir afirmando que es alrededor de 21 metros, obteniendo unas mediciones casi ideales con respecto a las distancia reales.

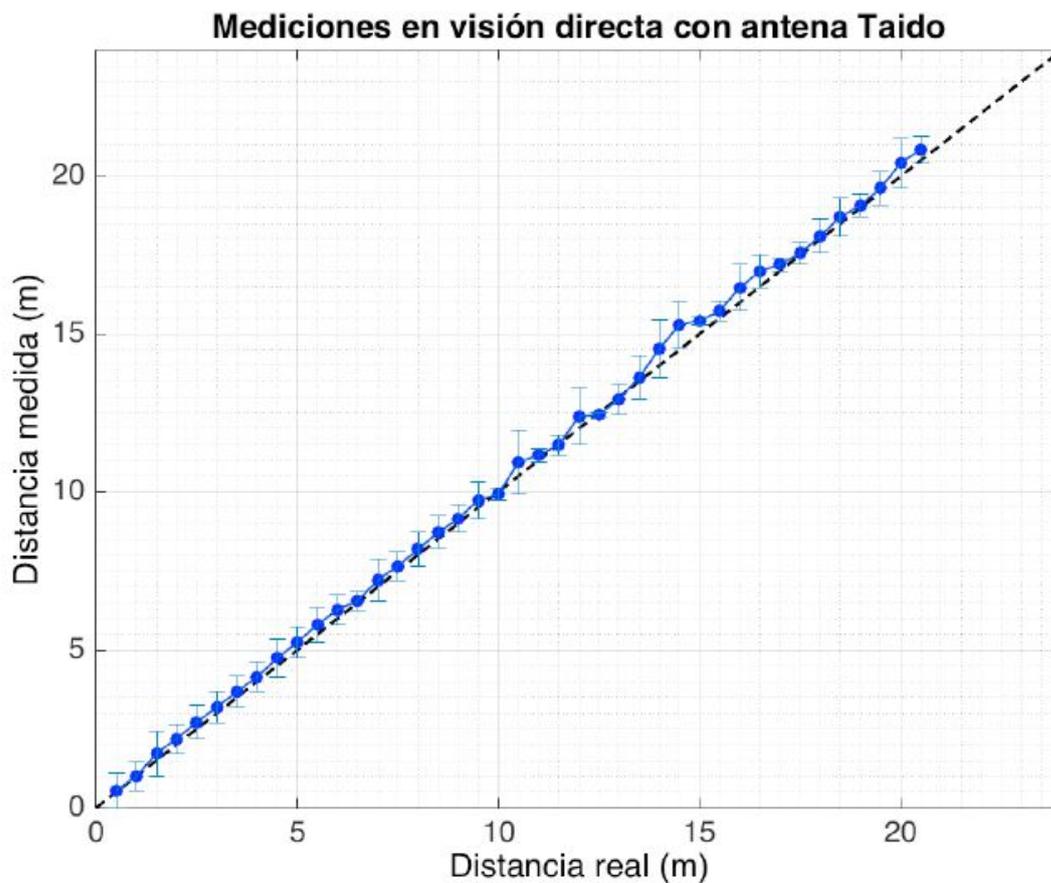
En segundo lugar, se va a observar que sucede con la antena *Johanson* tomando las mismas mediciones que en la gráfica anterior.



**Figura 31. Gráfica conjunto mediciones en visión directa con antena *Johanson***

Se puede afirmar que el alcance sigue siendo el mismo que en anteriores ocasiones, que los resultados son muy aproximados a la idealidad y que la precisión es muy buena

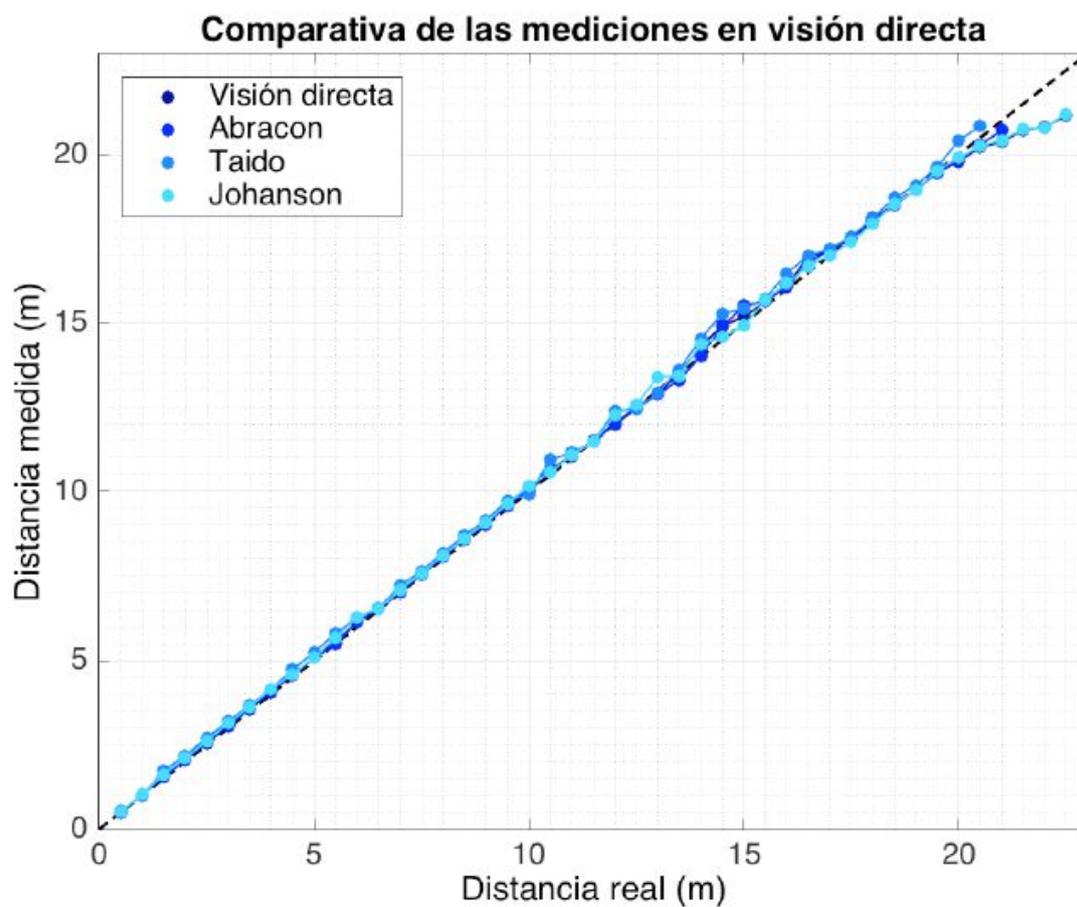
Por último, se comprueba la visión lineal directa con la antena *Taido*.



**Figura 32. Gráfica conjunto mediciones en visión directa con antena *Taido***

En esta primera prueba de medición, la antena *Taido* es la que obtiene valores más desfavorables donde su alcance máximo son 20 metros y nos encontramos con más ruido aleatorio en la zona de 10 a 17 metros.

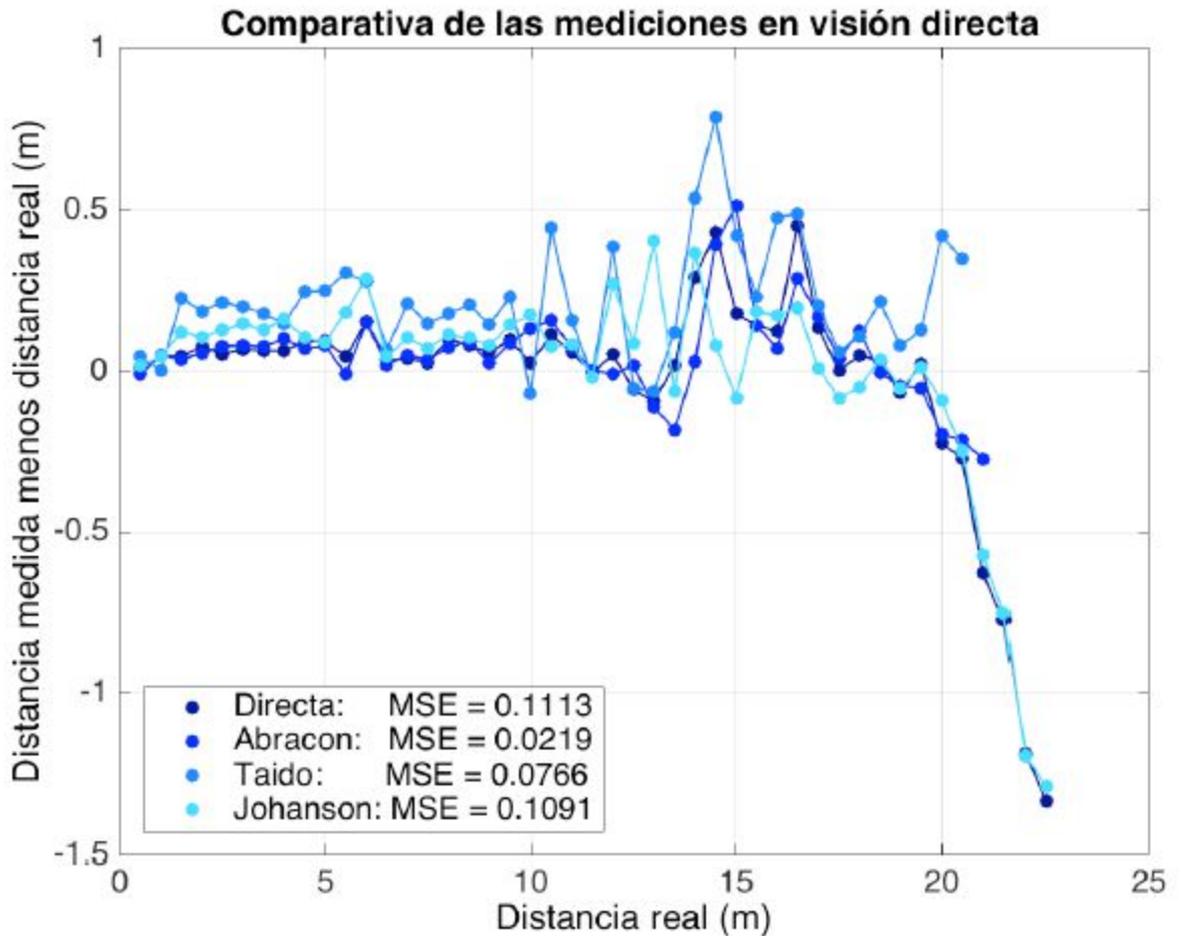
Se va a observar en una misma gráfica las tres opciones junto a la antena *Decawave* para poder comparar con más exactitud los resultados obtenidos entre todas las posibles antenas.



**Figura 33. Gráfica comparativa de mediciones en visión directa**

Se observa que los resultados son buenos y tan sólo un poco más desfavorables que con el kit de puesta en marcha.

Para poder apreciar en mayor detalle la desviación de la idealidad representamos en la gráfica siguiente el error absoluto en la medida de distancia:

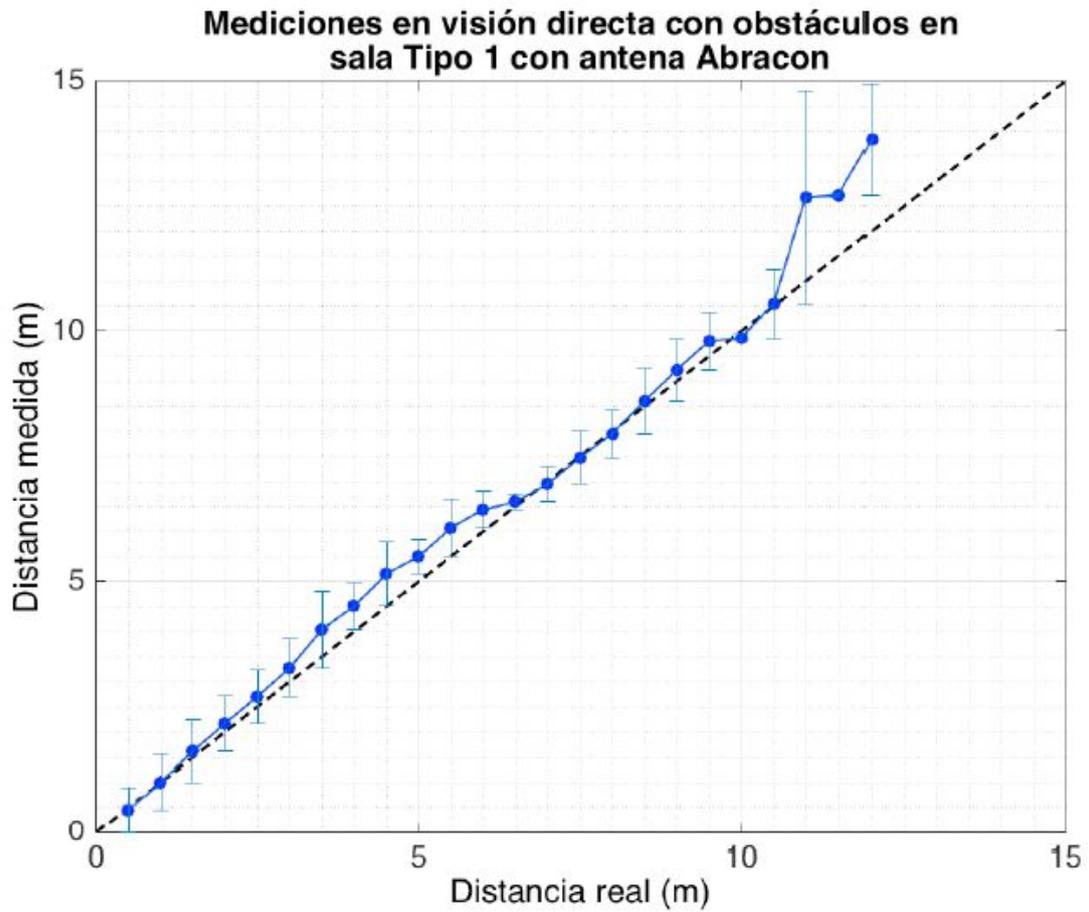


**Figura 34. Gráfica comparativa del error y MSE de las mediciones en visión directa**

Se verifica que el error no supera en ningún de los casos el metro que nos habíamos puesto como objetivo antes de superar los 20 metros que establecimos como límite en las pruebas directas con el kit. Si utilizamos como medida de la calidad de la antena el error cuadrático medio, la antena *Abracon* es la que mejor comportamiento presenta.

Posteriormente repetimos las pruebas en la sala 1, el escenario en el que los obstáculos tienen mayor influencia.

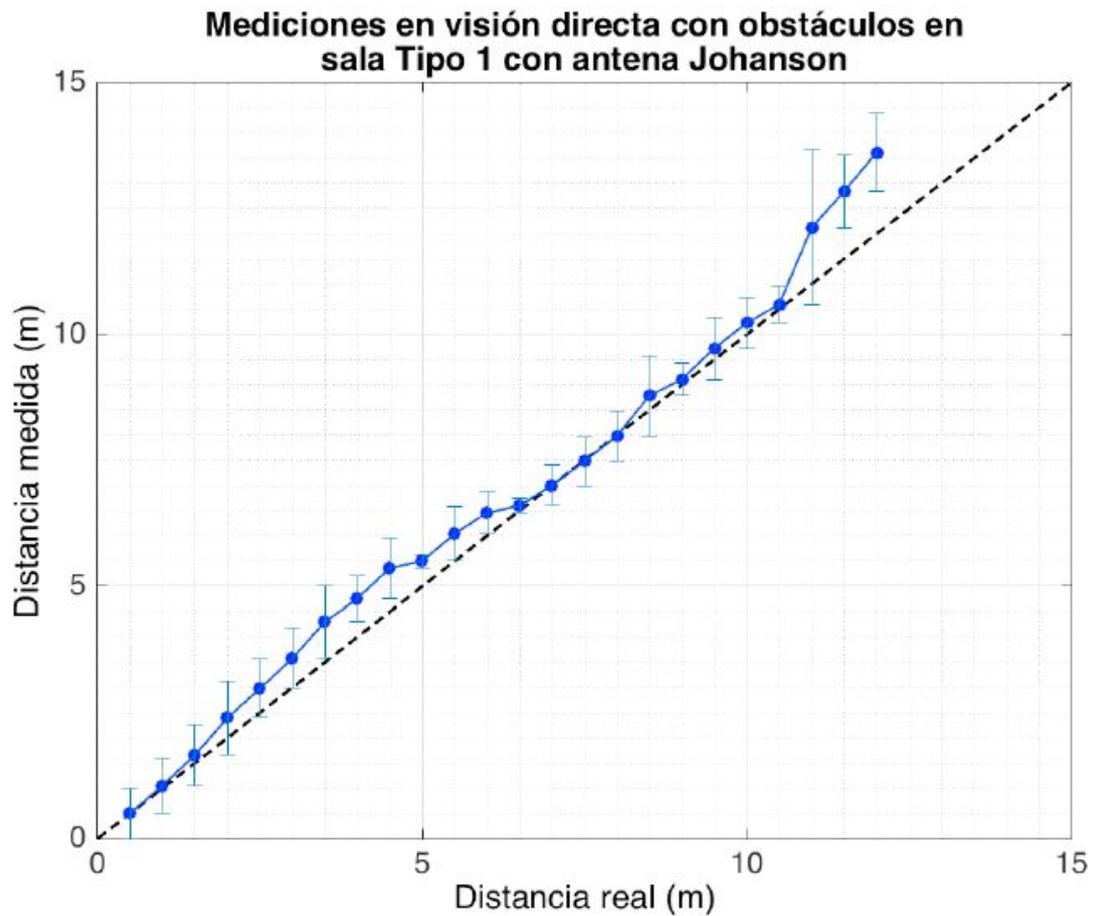
En la siguiente figura de la antena *Abracon*, se observa que:



**Figura 35. Gráfica de mediciones en visión directa con obstáculos en sala tipo 1 con antena Abracon**

En este caso, el alcance disminuye, como con el kit completo hasta unos 11 metros manteniendo una precisión aceptable.

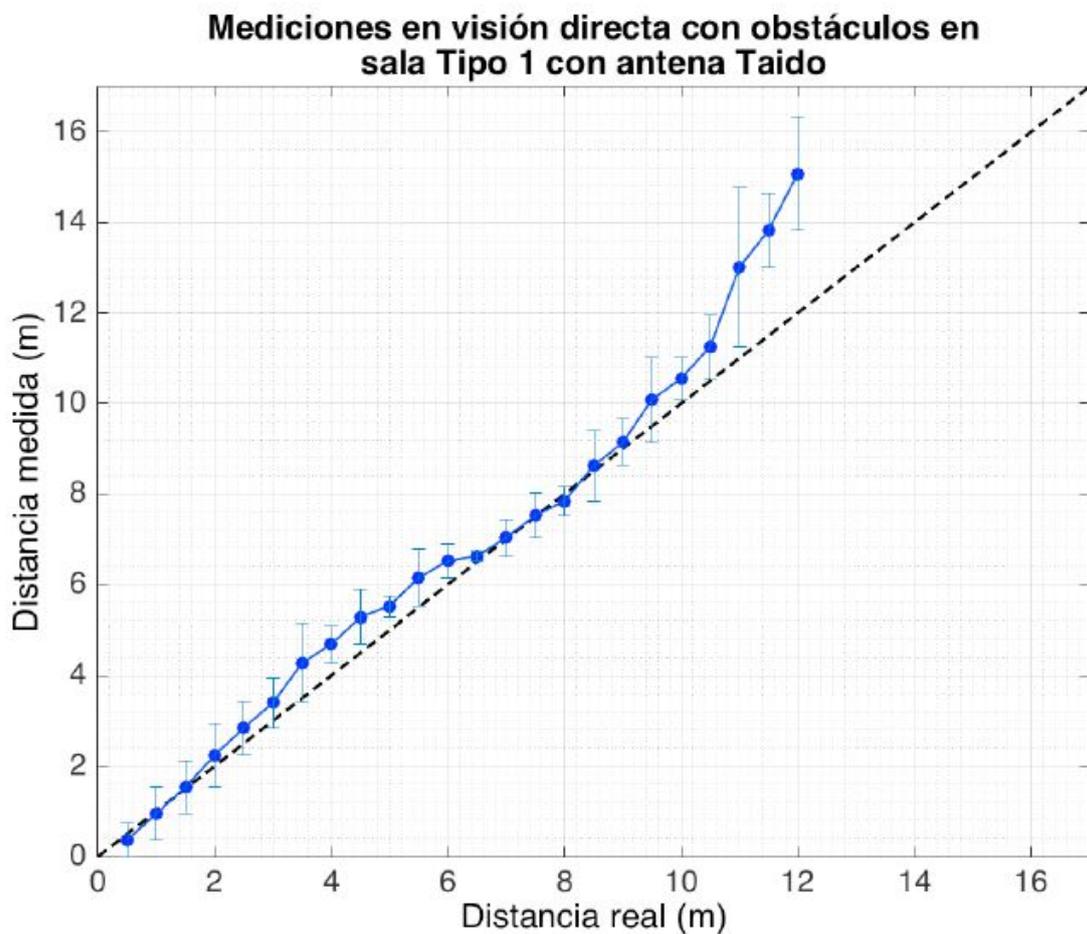
En la siguiente gráfica, se muestran los resultados obtenidos con la antena *Johanson* en las mismas condiciones que la anterior.



**Figura 36. Gráfica de mediciones en visión lineal con obstáculos en sala tipo 1 con antena *Johanson***

No se aprecia grandes diferencias con respecto a la anterior gráfica, se sigue manteniendo el mismo alcance con precisión aceptable de hasta unos 11 metros.

Los resultados de la antena *Taido* se muestran a continuación:



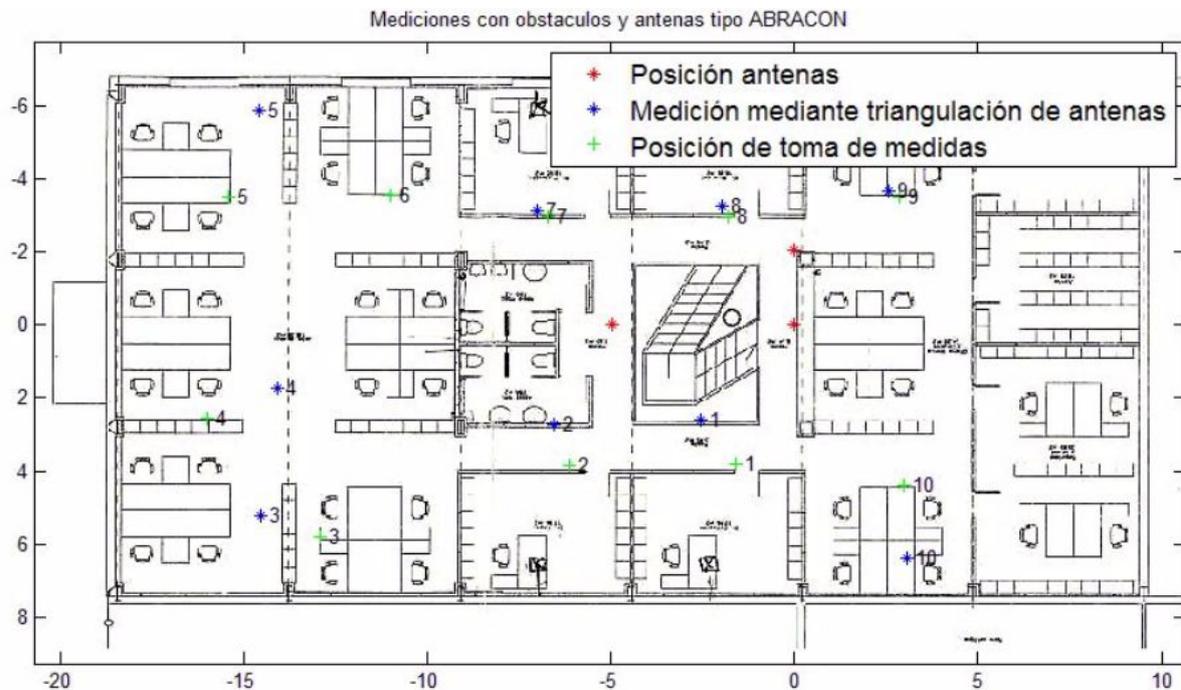
**Figura 37. Gráfica de mediciones en visión lineal con obstáculos en sala tipo 1 con antena *Taido***

Se puede apreciar que tampoco hay gran diferencia con las anteriores, el comportamiento de la antena es aceptable hasta los 11 metros.

En los tres casos, se observa un pico alrededor de los 12 metros. Analizando el plano de la planta, la desviación en la distancia estimada probablemente se debe a que cuando el *tag* se encuentra dentro de los segundos baños, la señal más intensa recibida no es la directa sino la reflejada en una barandilla y el cristal de las escaleras.

### 4.3.2 MEDICIONES MEDIANTE TRIANGULACIÓN

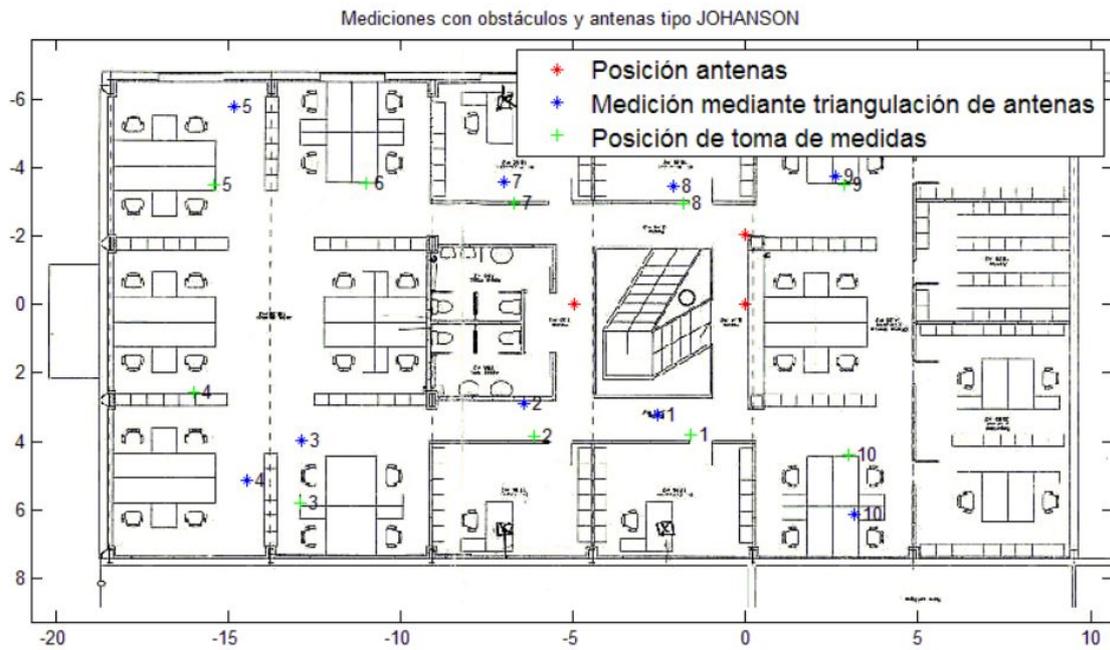
Se repitieron las medidas de posicionamiento con triangulación con el *tag* equipado con cada una de las antenas seleccionadas.



**Figura 38. Plano de mediciones con antenas *Abracon* en triangulación**

Los resultados son cualitativamente similares a los que se obtienen con las antenas originales del kit. Puede apreciarse que el error de posicionamiento es mayor en las mismas ubicaciones en las que lo fue con el kit. Cuantitativamente los resultados empeoran algo, especialmente en las antenas más alejadas, llegando a perderse el contacto con el *tag* en la posición 6.

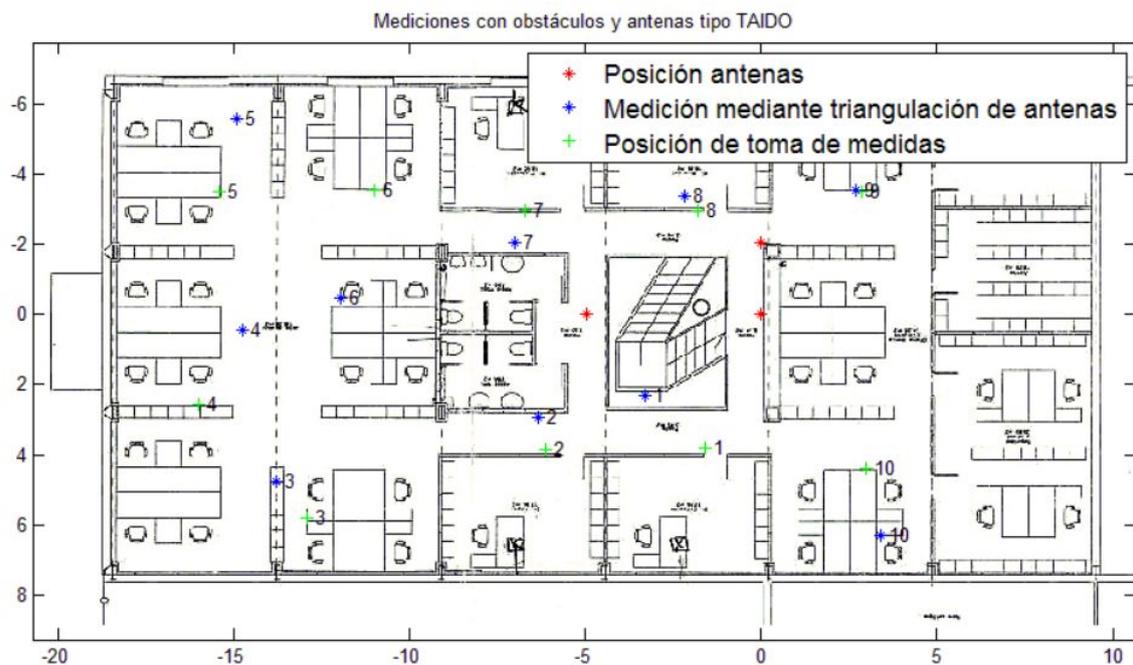
En el caso de la antena *Johanson*, los resultados son:



**Figura 39. Plano de mediciones con antenas *Johanson* en triangulación**

Este caso es muy similar al anterior. De nuevo se pierde el contacto con el *tag* en la posición 6.

Por último, con la antena *Taido* se obtienen también resultados similares a los dos casos anteriores, aunque en este caso no llega a perderse el contacto con el *tag* en ningún momento.



**Figura 40. Plano de mediciones con antenas *Taido* en triangulación**

Los resultados son muy parecidos en todos los casos. Los errores de posicionamiento superiores al metro en ubicaciones relativamente cercanas a las antenas fijas son sistemáticos, por lo que creemos que podrán subsanarse siguiendo los procedimientos de calibrado recomendados por el fabricante.

# **Capítulo 5**

## **5.1 CONCLUSIONES TÉCNICAS**

Podemos afirmar que la introducción de la tecnología UWB para localización en interiores supone múltiples mejoras frente a la situación anterior.

En primer lugar, el alcance se incrementa desde 6 hasta 11 metros, incluso en presencia de obstáculos.

La precisión en la estimación de distancia mejora también notablemente, desde los 3 metros hasta menos de 50 cm en visión directa a la distancia máxima que podemos alcanzar en nuestro escenario de prueba, y entorno a 1 metro con obstáculos dentro del alcance propuesto de 11m.

La precisión en el posicionamiento en dos dimensiones se degrada, como cabía esperar, frente a la estimación de distancia. Se cree, no obstante que podrá aproximarse al metro empleando procedimientos de calibrado que mitigan la influencia del multitrayecto.

Se ha podido comprobar así mismo que el sistema de localización es robusto frente al ruido e interferencias de RF, ya que el lugar donde se ejecutaron las pruebas presenta un ambiente de naturaleza industrial electromagnéticamente mucho más ruidoso de lo esperado en entorno hospitalario, con puntos de acceso WiFi, equipos de potencia en funcionamiento continuo y otras fuentes de RF asociadas a otros proyectos en marcha que involucran sistemas de comunicaciones.

Un inconveniente vinculado al uso de una tecnología en desarrollo, que no ha alcanzado aún su plena madurez, es una estandarización incompleta que vincula el desarrollo de equipos a componentes suministrados por un único fabricante.

## **5.2 VIABILIDAD ECONÓMICA**

Las ventajas de la tecnología UWB frente a UHF han quedado patentes con las medidas realizadas.

Además, los equipos que se suministran actualmente para el sistema de localización provienen de una empresa externa. En la alternativa UWB los equipos los fabricaría la propia empresa, por lo que se ganaría en independencia y se reducirían costes.

Si comparamos los precios de los ítems entre el sistema anterior y el estudiado, se obtiene que:

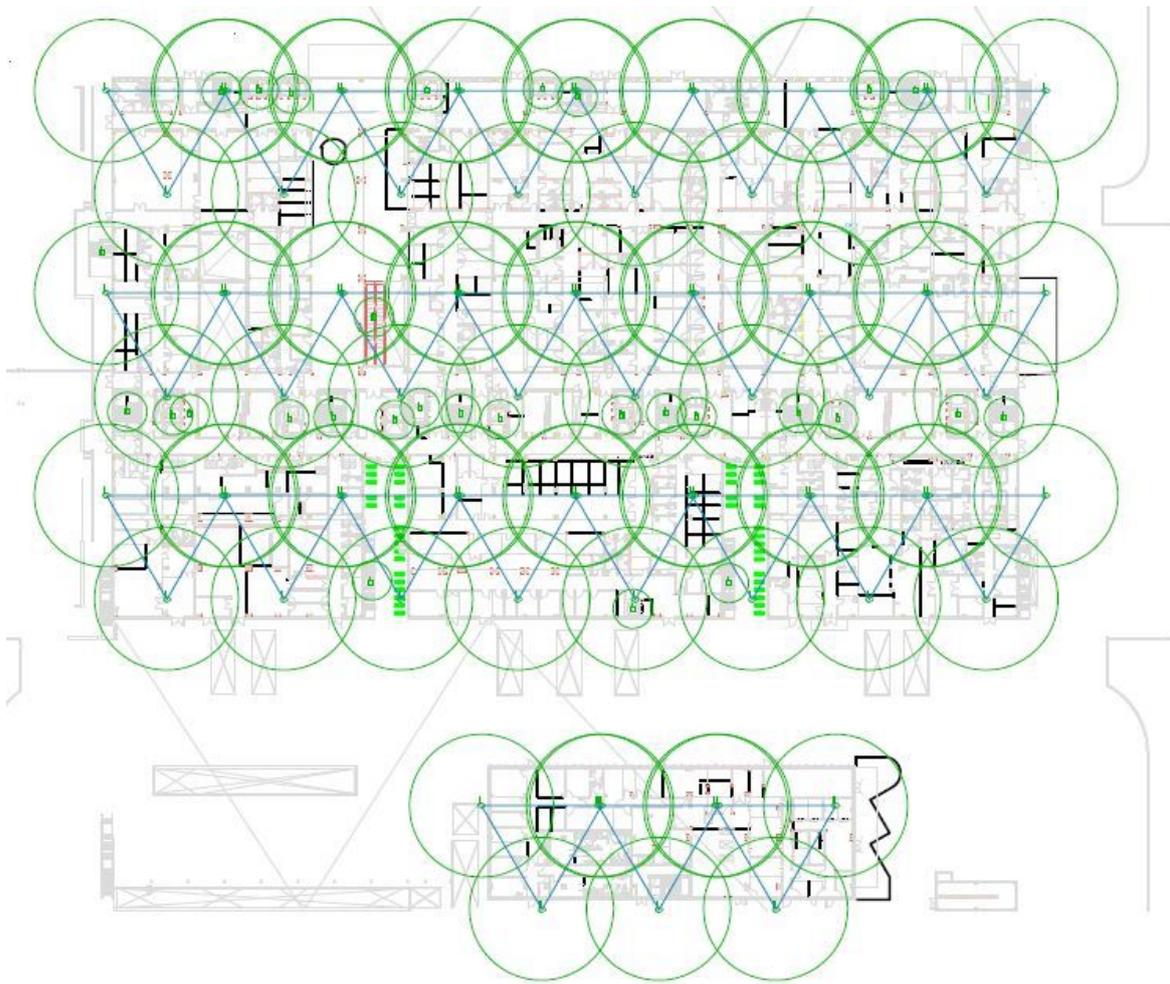
	ACTUAL	FUTURO
ANTENA	124€	80€
TAG	61€	45€

Figura 41. Tabla comparativa de precios del sistema actual y futuro

A continuación, se muestra un ejemplo real en una planta de un hospital de grandes dimensiones. En primer lugar se muestra la triangulación necesaria para el sistema anterior, con antenas con radio de alcance 6 metros. En la segunda figura, sin embargo, estamos ante la misma planta pero con las antenas UWB con un radio de alcance 12 metros.



Figura 42. Plano hospital con antenas del sistema de localización actual



**Figura 43. Plano hospital con antenas del sistema de localización futuro**

Para la primera solución son necesarias 158 antenas, mientras que en el segundo caso es suficiente con 58, sólo teniendo en cuenta el coste unitario de las antenas, en este caso, se podría reducir en más de la mitad este apartado del presupuesto.

Una ventaja adicional es la importante reducción en el tiempo y coste de despliegue de una red UWB frente a una instalación cableada, ya que se podrán usar los nodos conectados entre sí inalámbricamente, formando una red ad-hoc que con la misma señal UWB usada para localizar transmitan al servidor de la planta toda la información. Naturalmente, el coste de desarrollo de esa red y de programación del software que deberán llevar las antenas (y los *tag*) no será despreciable.

## 5.3 TRABAJO FUTURO

El desarrollo de una solución integral de localización en entorno hospitalario basada en la tecnología UWB, en particular sobre los dispositivos *Decawave* requerirá una serie de tareas adicionales que permitan explotar al máximo los beneficios de esta tecnología como soporte de comunicaciones y no únicamente como sistema de localización.

- I. El estudio detallado de consumo energético (para diseñar una placa pequeña y eficiente para los *tag* que permita alargar lo más posible la vida de la batería), es decir, decidir cada cuánto van a emitir, a la velocidad que lo harán y que mensajes pueden emitir ya que eso determinará los *tag* que se van a poder tener o cada cuánto se va a localizar.
- II. Analizar la implementación de distintos algoritmos de localización sobre este hardware: TOF, DTDOA: Elegir el más eficiente teniendo en cuenta el compromiso entre el consumo de batería y la precisión suficiente en la localización.
- III. Desarrollar una metodología de calibrado durante el despliegue de los nodos fijos para minimizar in situ los efectos de propagación multitrayecto.
- IV. Diseñar una estructura de red y como va a ser la comunicación, eso implica dos alternativas:
  - Antenas cableadas con *Ethernet* o RJ45.
  - Utilizar UWB para diseñar una red inalámbrica (al menos parcialmente) para transferir la información como hacen otras tecnologías como *Zigbee*. Se podría utilizar mediante una red de nodo *Mesh*.

Si se utiliza la opción de UWB para transmitir los datos que obtienen las antenas, se ocupa parte del tiempo para transmitir estos datos, con lo cual, los *tag* serán localizados menos veces por segundo y la tasa de localización de los *tags* será menor que si se hiciera con una red cableada y otra desventaja es la pérdida de precisión en la localización asociada a la imposibilidad de la sincronización de todas las antenas.

- V. Diseñar una estrategia de acceso al medio que minimice las superposiciones destructivas que pueden aparecer en el sistema actual.

