

## Aplicación para el estudio de medida de distancias mediante UWB

Ruiz, A.<sup>a</sup>, Garrido, J.<sup>a</sup>, Vázquez, F.<sup>a</sup>, Ruz, M.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica y Automática, Universidad de Córdoba, N-IV, km 396, 14014 Córdoba, España.

<sup>b</sup> Departamento de Mecánica, Universidad de Córdoba, N-IV, km 396, 14014 Córdoba, España.

**To cite this article:** Ruiz, A., Garrido, J., Vázquez, F., Ruz, M. 2023. Development of an application for the study of distance measurement using UWB. XLIV Jornadas de Automática, 825-830.  
<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.825>

### Resumen

Debido al desarrollo de la tecnología ultra-wideband en las últimas décadas dentro de los numerosos estándares de comunicación inalámbricos, en este trabajo se desarrolla una interfaz gráfica que permite realizar un análisis de esta tecnología en el campo de la medición de distancias y posicionamiento. Se utiliza para ello el módulo DWM1001-DEV, que incorpora dicha tecnología junto con diferentes modos de conexión y puertos de entrada y salida. La interfaz desarrollada permite establecer una conexión a través del puerto USB con el módulo mencionado y también de forma inalámbrica a través de una red Wi-Fi. Se plantea también el software de gestión de datos y su envío con una placa tipo Raspberry. Se muestra un conjunto de pruebas experimentales utilizando la interfaz y se realiza un estudio preliminar de la calidad de la medida de distancia entre dos módulos DWM1001-DEV.

*Palabras clave:* Monitorización, Supervisión y test, Sistemas de posicionamiento, Localización, Interfaces inteligentes

### Development of an application for the study of distance measurement using UWB

#### Abstract

Due to the development of ultra-wideband technology in recent decades within the numerous wireless communication standards, this paper develops a graphical interface that allows an analysis of this technology in the field of distance measurement and positioning. For this purpose, the DWM1001-DEV module is used, which incorporates UWB technology together with different connection GPIO ports. The developed interface allows establishing a connection through the USB port with the mentioned module and also wirelessly through a Wi-Fi network. The data management software and its shipment with a Raspberry type board are also considered. A set of experimental tests using the interface is shown and a preliminary study of the quality of the distance measurement between two DWM1001-DEV modules is carried out.

*Keywords:* Monitoring, Supervision and Testing, Positioning Systems, Localization, Intelligent interfaces.

### 1. Introducción

Dentro de los numerosos estándares de conectividad inalámbrica, se encuentra la tecnología conocida como ultra-wideband (UWB). Esta tecnología ha experimentado un crecimiento significativo frente a otras tecnologías ya consolidadas en el ámbito civil. La característica principal de la tecnología UWB que impulsa el desarrollo de este trabajo es la capacidad que presenta para la medida de distancias entre

dispositivos con una precisión del orden del decímetro. En este artículo se presenta una herramienta que permite recolectar las distancias medidas entre módulos UWB y representarlas de forma gráfica en tiempo real. De esta forma, el usuario puede estudiar el rendimiento del sistema en diversas aplicaciones que involucran posicionamiento de sensores o medida de distancias. En el trabajo se estudia un dispositivo específico UWB y sus posibilidades de conexión, si bien el enfoque de la

aplicación propuesta es extensible para módulos UWB similares.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se comentan las principales características y capacidades de la tecnología UWB, también se describen las características principales del módulo DWM1001-DEV que se utiliza en este trabajo. En la sección 3 se describe la interfaz gráfica desarrollada y las posibilidades que ofrece al usuario. También se comenta el software implementado para comunicar el módulo UWB con una Raspberry y transmitir las distancias recolectadas a un PC de forma inalámbrica. En la sección 4 se incluyen pruebas experimentales de medida de distancia entre dos módulos DWM1001-DEV. Por último, en la sección 5 se resumen las conclusiones y líneas futuras de este trabajo.

## 2. La tecnología UWB

Esta tecnología, surgida en la década de 1950 dentro del marco militar, con el objetivo de mejorar las comunicaciones a larga distancia (Yang, 2004), presenta como principal característica, definida por la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos o FCC (Rahayu, 2008), el empleo de un ancho de banda superior a los 500 MHz o al 25% de la frecuencia central (Taylor, 2000), ancho de banda superior a diez veces el correspondiente a otras alternativas de comunicación inalámbrica, permitiendo transmitir información a una mayor velocidad que tecnologías similares (Vázquez, 2012).

Debido a su ancho de banda y a una potencia de emisión muy reducida en comparación con el resto de tecnologías (Figura 1), los dispositivos que implementan la tecnología UWB están diseñados para poder ocupar bandas de frecuencia asignadas a otros servicios, ya que las interferencias producidas son similares a los niveles de ruido captados por otras tecnologías.

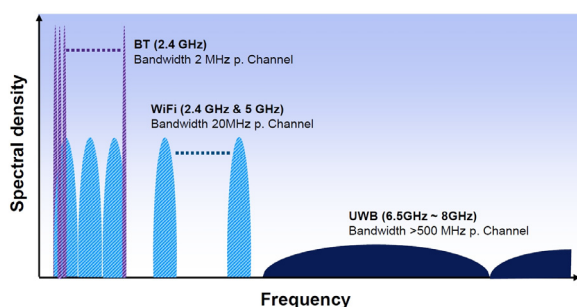


Figura 1: Ancho de banda y densidad espectral de UWB (Knuepffer, 2019)

### 2.1. Capacidades de la tecnología UWB

La tecnología UWB es una tecnología de transmisión de datos inalámbrica orientada a un uso en distancias cortas, con un rango de aplicación que puede alcanzar los cientos de metros, a unas velocidades de transmisión desde los 110 Mbps a 1.6 Gbps en función de dicha distancia (Rahayu, 2008). Gracias a la baja potencia de funcionamiento, su consumo es considerablemente reducido alcanzando el orden de mW con un uso genérico.

Debido a las propiedades mencionadas, la tecnología UWB se enfoca en aplicaciones de interiores (indoor) o de corto alcance, compartiendo campo de aplicación con especificaciones como los más conocidos Bluetooth o Wi-Fi (Díaz, 2003). Una de las aplicaciones más comunes de UWB es el posicionamiento o medición de distancias de alta resolución con medidas de hasta 100 m (Leeper, 2003). La elevada precisión en la medida de distancias hace que UWB sea una tecnología candidata para la aplicación de algoritmos de posicionamiento cooperativos, donde varios nodos se localizan de forma simultánea (Ruz, 2019). Para ello, la distancia presente entre dispositivos se estima a través del denominado tiempo de vuelo o tiempo de llegada (Round Trip Time, RTT), conociendo la demora de una señal de radio al enviarse desde un emisor a receptor, siendo este un algoritmo apropiado debido a la elevada resolución en tiempo de las señales de radio UWB (Xu, 2008).

### 2.2. Módulo DWM1001-DEV

Siendo el principal objetivo de este trabajo la creación de una interfaz capaz de procesar, grabar y operar con la medición obtenida a través de un dispositivo con tecnología UWB, se ha decidido emplear la placa de desarrollo DWM1001-DEV (Figura 2) de la compañía *Qorvo*, anteriormente conocida como *Decawave*, diseñada para operar y evaluar el módulo UWB DWM1001C incluido en esta.

En la Tabla 1 se muestran las principales características de la placa DWM1001-DEV. El módulo DWM1001C está basado en el transmisor DW1000 el cual implementa el estándar IEEE 802.15.4-2011 a una velocidad de 6,81 Mbps, definiendo el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de emisión de datos.

Tabla 1: Especificaciones de la placa de desarrollo DWM1001-DEV

Especificación	Característica
Modo de conexión	UART, SPI, Bluetooth
Antena UWB	WB003 - MiniHoe
Memoria Flash (nRF52832)	512 kB
Memoria RAM (nRF52832)	64 kB
Digital I/O	4 pines IO de propósito general
Temperatura de funcionamiento	-40°C a 85°C
Tensión de alimentación	3.6 V a 5.5 V
Corriente de alimentación	> 500 mA
Conectores	Pin x26 compatible con Raspberry PI, USB, Batería
Estándar	IEEE 802.15.4-2011
Velocidad	6.8 Mbps
Consumo	15 $\mu$ A "sleep mode" 380 $\mu$ A - Bluetooth apagado 4 mA con período de 100 ms
Acceso a API externa	UART Shell, SPI, Bluetooth

A su vez, la placa de desarrollo dispone de tecnología Bluetooth gracias al circuito integrado nRF52832 de la

compañía Nordic Semiconductor, y un acelerómetro de tres ejes con una salida de datos de 1 Hz a 5,3 kHz.

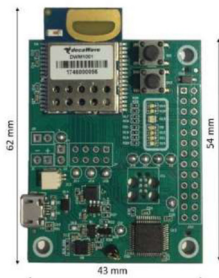


Figura 2: Placa de desarrollo DWM1001-DEV.

Las placas de desarrollo DWM1001-DEV permiten establecer redes de modo que se pueda calcular y obtener la distancia presente entre una placa configurada como *tag* y otra como *anchor* (o ancla), siendo el tag el módulo móvil y el anchor aquel cuya posición es conocida. Cuando en una misma red se disponga de un número superior a tres anclas, será posible calcular la posición del tag, ya sea a través de un algoritmo de posicionamiento como el disponible en el firmware PANS, unas librerías que vienen preinstaladas en cada módulo (Qorvo, s.f.).

### 3. Desarrollo de la interfaz

La ventana principal de la interfaz de muestra en la Figura 3. Para la comunicación se ha considerado el modo UART Shell proporcionado por el firmware, ya que permite una conexión menos problemática con el módulo al encontrarse conectado permanentemente de manera cableada con el dispositivo donde se ejecuta la interfaz y, como motivo principal, por la imposibilidad de programar el módulo de modo que sea posible obtener los datos requeridos en uno de los anclas en lugar de recibirlos desde el tag sin tener que eliminar el firmware de comunicación presente en el dispositivo.

La interfaz se ha programado utilizando las librerías Qt en C++, proporcionando una herramienta sencilla para que el usuario pueda comunicarse con la placa DWM1001-DEV y disponga de las funciones necesarias para la representación de gráficas en tiempo real, registro y procesado de datos, así como la posibilidad de configurar la placa según sea requerido.

La interfaz permite realizar todas estas operaciones para tres modos diferentes de funcionamiento: un primer modo en el que se representa la distancia desde el tag hasta un máximo de 4 anclas; un segundo modo en el que se representa la posición del tag en una red que al menos disponga de tres anclas; y un tercer modo en el que se transmite la posición de un tag a través de un ancla configurado como listener u oyente, el cual recibe los datos y los transmite a un PC a través del puerto serie. En este caso, el tag en movimiento no tiene que estar conectado al PC.

Para el desarrollo de la interfaz, ha sido necesario programar la gestión de la comunicación a través de USB entre el módulo y el PC, donde se ejecuta la interfaz. La conexión se realiza a través de un puerto serie virtual a 115200 baudios, con 8 bits de datos, sin paridad, con un bit de parada y sin bit de control de flujo. El módulo envía la información relevante como mensajes ASCII de manera secuencial. Para tratar estos

datos, se ha implementado una función que actúa como búfer, almacena los datos recibidos hasta tener el mensaje completo para su posterior procesado en función del tipo de mensaje recibido, ya sea de configuración del módulo, de información, de distancia o de posición. Del mismo modo, y para asegurar el correcto envío del mensaje, se ha diseñado una función que gestiona el comando a enviar. Tanto los comandos de recepción como de envío se pueden consultar en la documentación del módulo, (Qorvo, s.f.).

En función del modo de funcionamiento requerido, para cada cual el mensaje recibido será distinto, dicho mensaje se procesa aislando y almacenando en la variable correspondiente el dato en cuestión. Por ejemplo, para la recepción de la distancia, se envía al módulo (en modo UART Shell) el comando *lec/r*. De este modo, se recibirá (según un periodo de muestreo establecido) un mensaje que contiene información con el número de anclas detectadas en la red, su etiqueta identificadora, la distancia correspondiente a cada una de ellas y, si es posible calcularla y está habilitada su obtención, la posición del tag relativa a la posición establecida manualmente en los módulos configurados como anclas. La propia interfaz envía el comando en cuestión y, teniendo en cuenta el modo de funcionamiento elegido y el tamaño del mensaje, identifica y procesa la información requerida (Ruiz, A, 2020).

Las principales implementaciones que presenta la interfaz son las siguientes:

- Configuración del módulo conectado: tag o ancla, red, período de muestreo o reinicio de fábrica.
- Configuración de visualización de las gráficas de distancia o posición: ejes, color, tamaño.
- Grabado de datos en formato csv: la información guardada variará si se registra la distancia o la posición, así como si se ha activado el filtro de media o la alarma establecida.
- Panel de información y elección del modo posición o distancia: el panel mostrará el modo de funcionamiento establecido actualmente en el módulo conectado, la ID de la red. La información varía dependiendo del estado de la interfaz o el número de módulos detectados, como por ejemplo la ID correspondiente a cada módulo detectado en la red cuya distancia se está representando, la distancia medida.
- Gráfica: representa la distancia o posición y se actualiza según un período de muestreo.
- Filtro de media: implementa un filtro de media permitiendo escoger el número de valores anteriores a incluir, y si la alarma a activar depende del último valor recibido desde el módulo o el calculado por el filtro.
- Alarma: permite establecer unos límites de distancia o posición. Si el valor medido cruza este límite, se registra la activación en el archivo csv y se activa una salida digital del módulo durante un tiempo configurable, permitiendo disponer una salida a relé que sea activada según la alarma.
- Activación independiente de GPIO en una pestaña propia.
- Terminal: permite consultar la comunicación entre el módulo y la interfaz, observando los mensajes enviados entre ambos.

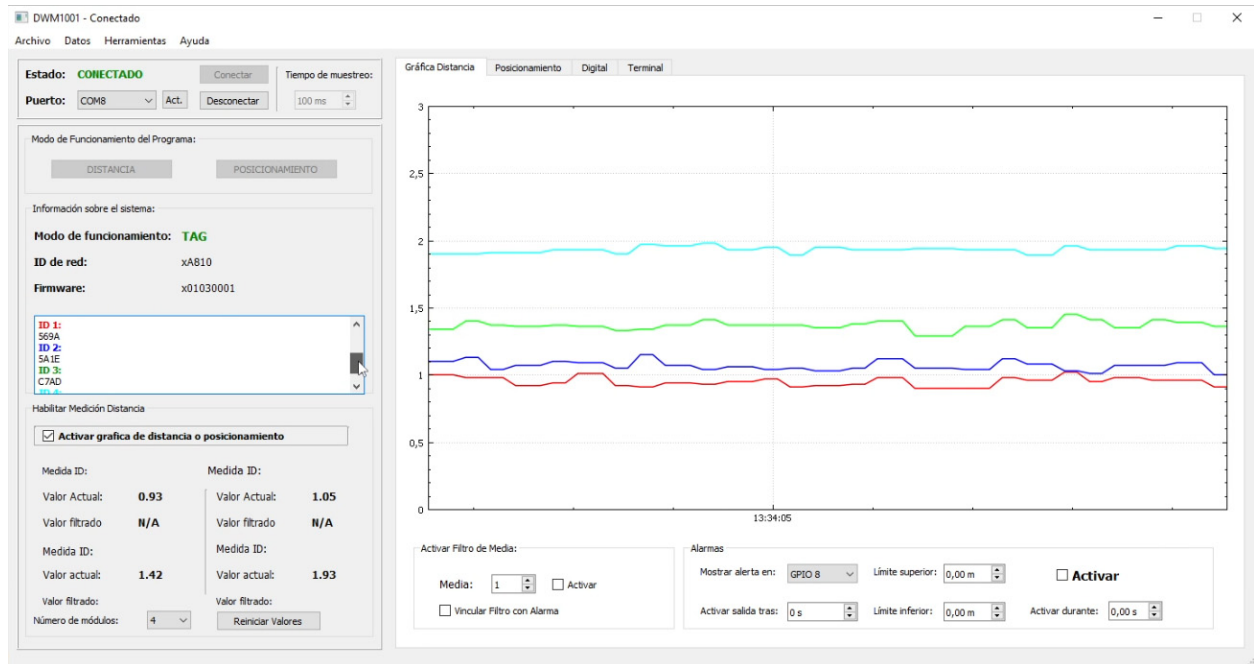


Figura 3: Ejemplo de funcionamiento de la interfaz para la medida de cuatro distancias.

Tal y como se puede observar en la Figura 3, una vez configurados los módulos mediante la interfaz, seleccionado el modo distancia y habilitando la recepción de datos, se representa la identificación de cada módulo en el panel de información izquierdo, y las distancias a cada módulo ancla en la gráfica habilitada.

### 3.1. Nodo UWB-Raspberry

Una de las principales limitaciones que presentan las librerías PANS es la necesidad de tener conectado de manera cableada el tag al PC donde se ejecuta la interfaz, algo que no es de gravedad para el estudio en cuestión, pero puede ser problemático en un caso real.

Para tratar de solucionar este inconveniente y debido a la imposibilidad de modificar el código de las librerías PANS (el fabricante no proporciona el código fuente) para recibir las distancias medidas en un módulo fijo configurado como ancla, se ha planteado y desarrollado una segunda interfaz que tenga la capacidad de conectarse con un nodo conectado por puerto serie virtual al módulo en cuestión. El único requisito para poder implementar esta interfaz es disponer de un dispositivo monoplaca tipo Raspberry que incorpore Wi-Fi y pueda transmitir los datos recibidos. De este modo, la interfaz envía los mensajes recibidos desde el módulo a través de la red Wi-Fi al PC ejecutando la interfaz. Este software desarrollado también incorpora las funciones ya mencionadas, desde la representación y grabado de datos hasta la activación de alarmas o filtros de media.

## 4. Pruebas experimentales

Se ha realizado un conjunto de pruebas con dos módulos DWM1001-DEV. Se han realizado pruebas de medida de distancias estáticas durante un periodo aproximado de 30 min, medidas con uno de los módulos en movimiento. Cabe

destacar que la aplicación permite gestionar la medida de varias distancias de forma simultánea, tal y como se muestra en la Figura 3. Por último, se realizó la medida de la posición estática de un módulo durante un periodo de tiempo de 30 min. En este último caso se utilizaron 3 módulos como ancla y uno como tag, siendo el algoritmo de posicionamiento gestionado por las librerías PANS.

### 4.1. Medida de distancias con tag estático

En esta prueba, para estudiar la precisión de la distancia estimada, se han realizado mediciones con los módulos con visibilidad directa (Line of Sight, LOS) y sin ella (NLOS, Non Line of Sight). Las pruebas se han realizado a distancias de 700, 400, 200, 100 y 50 cm para las mediciones con línea de visión directa y a una distancia de 700, 500, 400 y 100 cm variando la posición del obstáculo consistente en una lámina de aluminio de 3 mm de espesor. En la Figura 4 puede observarse la medición LOS estática realizada para 7 m, siendo el gráfico rojo la medida obtenida y el azul con un filtro de media filtro aplicado.

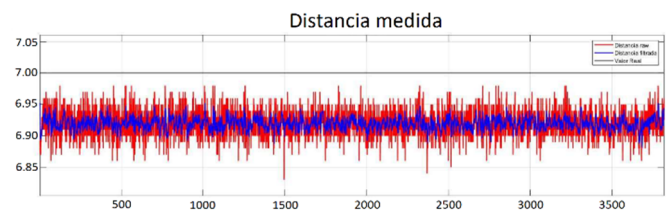


Figura 4: Prueba de medición estática.

### 4.2. Medida de distancias con tag en movimiento

En esta prueba se comprobó la función de alarma implementada en la interfaz. Se estableció un límite de distancia a partir del cual se activa una salida digital. Además, se estimó el tiempo de activación, para lo cual se programó un

temporizador mediante el cual se medía el tiempo desde la detección de la distancia hasta el envío del mensaje de activación de la salida digital. Al igual que para la prueba anterior, se ha partido de una distancia de 5 m estableciendo puntos de activación de la alarma a los 3, 2, 1 y 0.50 m, con una velocidad media de la posición del módulo entre los 0.17 y 0.80 m/s. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de la medida de la distancia y la activación de la alarma con su activación establecida en 3 m moviendo el módulo a 0.3 m/s.

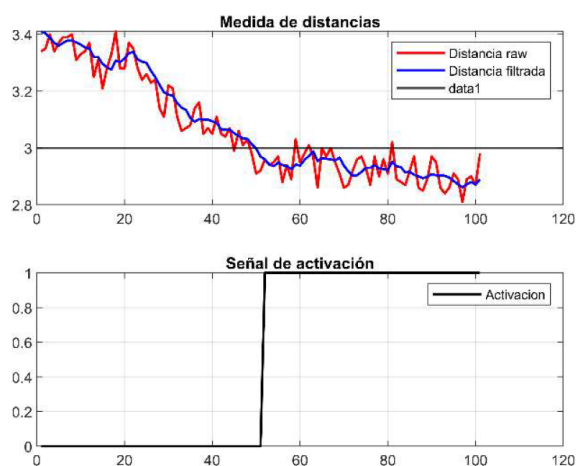


Figura 4: Prueba de activación de alarma a 3 m de distancia.

#### 4.3. Posicionamiento

Para realizar esta prueba se establecieron 4 anclas en una habitación en las posiciones relativas mostradas en la Tabla 2, según los ejes X, Y, Z, mientras que el módulo configurado como tag se ubicó como tag se ubicó en las posiciones indicadas por la Tabla 3.

Tabla 2: Posiciones de las Anclas en la prueba de posicionamiento (m)

Módulo	Pos. Eje X	Pos. Eje Y	Pos. Eje Z
Ancla 1	1.00	1.00	0.95
Ancla 2	4.33	0.80	1.12
Ancla 3	4.33	3.08	1.05
Ancla 4	1.73	3.96	1.03

Tabla 3: Posiciones de los TAG en las pruebas de posicionamiento (m)

Nº prueba	Pos. Eje X	Pos. Eje Y	Pos. Eje Z
1	2.40	2.70	0.90
2	2.10	2.60	0.80
3	2.95	1.95	1.00
4	3.45	3.68	0.87
5	1.77	1.55	0.90

De nuevo, las mediciones se realizaron durante 30 min. A partir de los datos registrados se determinó la desviación típica de la posición, los valores medios, y el error absoluto medio. En la Figura 5 puede observarse el resultado de la medición para el tag con posición de 2 m para el eje X y de 3 m en el eje Y.

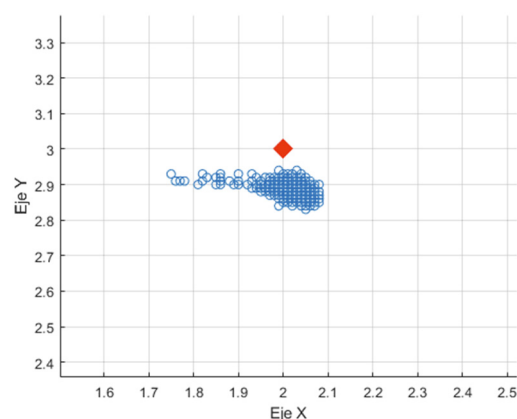


Figura 5: Ejemplo del resultado en el plano XY de una prueba de posición.

## 5. Resultados

Observando los resultados de las pruebas de distancia estática realizada, la precisión del rango de medida es cercana a los 10 cm, con un valor medio medido que difiere entre 8.05 y 18.48 cm del valor real de distancia. Para analizar la dispersión de los datos, se han obtenido los valores de la desviación típica, mostrando un claro aumento de su valor a medida que la distancia entre los dispositivos se reduce.

Tabla 4: Posiciones de los TAG en la prueba estática sin obstáculo (m)

Distancia	Media de la medida	Desviación típica	Error absoluto
7.00	6.92	0.022	0.17
4.00	3.90	0.022	0.16
2.00	1.86	0.032	0.26
1.00	0.96	0.038	0.15
0.50	0.32	0.034	0.27

Respecto a la prueba similar realizada añadiendo una lámina metálica como obstáculo, conforme aumenta la distancia entre dispositivos, debido a la desviación presente en las medidas, se obtiene un valor medio considerablemente más cercano al valor real presente entre ambos dispositivos. Esto puede deberse a que inicialmente había un offset, que en la situación NLOS se ha reducido.

Para las pruebas realizadas enfocadas en la activación de un puerto GPIO una vez que el valor medido cruce la consigna establecida, se han obtenido unos tiempos de activación de aproximadamente 75 ms, siendo las medidas que activaron dichas alarmas no superiores a 26 cm respecto al valor real.

Por último, los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de posicionamiento son satisfactorios para el plano XY en comparación con la altura estimada del módulo. En la Tabla 5 se recogen los valores medios obtenidos para las diferentes pruebas, en la Tabla 6 se muestran las desviaciones típicas. Como puede observarse en ambas tablas, los valores medios para el eje X e Y presentan unos valores de posición cercanos al real y poca desviación. Sin embargo, los datos estimados correspondientes al eje Z son significativamente peores.

Tabla 5: Valores medios obtenidos en las pruebas de posicionamiento (m)

Posición X,Y,Z	Media calculada X,Y,Z
(2.40,2.70,0.90)	(2.42,2.58,0.67)
(2.10,2.60,0.80)	(2.03,2.53,0.64)
(2.95,1.95,1.00)	(2.92,1.85,0.89)
(3.45,3.68,0.87)	(3.54,3.71,0.73)
(1.77,1.55,0.90)	(1.71,3.71,0.73)

Tabla 6: Desviación típica calculada en las pruebas de posicionamiento

Posición X,Y,Z (m)	Desviación típica X,Y,Z (cm)
(2.40,2.70,0.90)	(2.81,3.74,12.09)
(2.10,2.60,0.80)	(1.59,1.87,5.97)
(2.95,1.95,1.00)	(2.36,3.74,15.88)
(3.45,3.68,0.87)	(1.54,3.37,4.60)
(1.77,1.55,0.90)	(1.66,1.50,11.29)

Como ejemplo, para un módulo situado en las coordenadas 3.45 m en el eje X y 3.68 en el eje Y, se ha obtenido un valor medio situado en la coordenada 3.54 m y 3.71 m respectivamente, con una desviación típica de 0.025 m. La desviación típica media de las pruebas de posición realizadas para eje X e Y es muy similar, con un valor de 0.021 y 0.0262 m, respectivamente. Sin embargo, la desviación típica presente en la estimación de la altura del módulo, es decir, los datos relativos al eje Z, presenta un valor medio para todas las pruebas realizadas de 0.087 m, valor aproximadamente 4 veces superior al calculado para el plano horizontal XY, mostrando una dispersión de las mediciones realizadas enormemente mayor. Este hecho podría deberse al presentar una elevada dilución geométrica de precisión (GDOP) en la dirección del eje Z, siendo una posible solución situar los nodos anclas a diferentes alturas (Feng, 2015).

## 6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado una interfaz gráfica desarrollada con las librerías Qt para gestionar la recolección de distancias con el módulo DWM1001-DEV. Se trata de una herramienta interactiva que permite al usuario recolectar las distancias entre nodos y activar salidas digitales del controlador según los valores de dichas distancias. También se ha presentado la comunicación del módulo DWM1001-DEV

con una Raspberry y el envío de datos de forma inalámbrica a un PC. La herramienta desarrollada puede suponer un buen complemento para el desarrollo de aplicaciones donde la medida de distancias es crítica. Como trabajo futuro se tiene previsto continuar el desarrollo de la interfaz e intentar solventar las limitaciones de las librerías PANS del fabricante a la hora de recolectar las distancias entre pares de nodos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el IX Plan Propio de Innovación y Transferencia de la Universidad de Córdoba, que ha permitido parte del desarrollo de este trabajo.

## Referencias

- Díaz, J., 2003. Tecnología Ultra-wideband (UWB): La revolución a corto alcance. *Buran*, 19, 52-56.
- Feng, G., 2015. GDOP Index in UWB Indoor Location System Experiment, 2015 IEEE Sensors, 1-4, DOI: 10.1109/ICSENS.2015.7370254
- Knuepffer, G., 2019. Das leistet die Ultra-Wideband-Technologie in Fahrzeugen.
- Leeper, D. G., 2003. Ultrawideband – the next step in short-range wireless. IEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 357-360. DOI: 10.1109/MWSYM.2003.1210951
- Rahayu, Y., 2008. Ultra wideband technology and its applications, 5<sup>th</sup> IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN '08), 1-5. DOI: 10.1109/WOCN.2008.4542537
- Ruiz, A., 2020. Estudio e implementación de una red de sensores UWB: Aplicación a sistemas de seguridad perimetral. Universidad de Córdoba. Córdoba.
- Ruz, M., Garrido, J., Jiménez, J., Virrankoski, R., Vázquez, F. 2019. Simulation tool for the analysis of cooperative localization algorithms for wireless sensor networks. *Sensors*, 19 (13), 2866. <https://doi.org/10.3390/s19132866>.
- Taylor, J. D., 2000. Ultra-wideband Radar Technology. CRC Press, Boca Raton, Florida 33431, USA.
- Vázquez, A., Herrera, G., 2012. Contribución al diseño integrado de sistemas de comunicaciones impulse radio ultrawideband con capacidad de localización y posicionamiento.
- Qorvo. (s.f). DWM1001C Module. Recuperado de: <https://www.qorvo.com/products/p/dwm1001-module/>
- Xu, H., 2008. Ultra-wideband technology: Yesterday, today, and tomorrow. 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, 715-718. DOI: 10.1109/RWS.2008.4463592
- Yang, L., 2004. Ultra-wideband communications: An idea whose time has come. *IEEE Signal Processing Magazine* 21(6), 26-54. DOI: 10.1109/MSP.2004.1359140
- Zhuang, W., 2003. Ultra-wideband wireless communications. *Wireless Communications and Mobile Computing* 6, 663-685. DOI: 10.1002/wcm.149