

GRADO EN INGENIERÍA TELEMÁTICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Implementación de un Sistema de Localización empleando RTT y la Técnica Radar Monopulso mediante Open Source



AUTOR: BETZI MABEL PACCHA COLALA
DIRECTOR: ANTONIO JAVIER GARCÍA SANCHEZ
CODIRECTOR: JOSÉ LUIS GÓMEZ TORNERO.
JOSÉ ANTONIO LÓPEZ PASTOR

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mis profesores de este grado por sus conocimientos brindados y por la dedicación que emplearon en ello. Agradecer a José Antonio por dirigir este proyecto y por su tiempo empleado en él.

A mi familia y a mi pareja por el apoyo y confianza brindada.

Gracias a todos por haber participado en esta etapa de mi carrera.

RESUMEN

Con este trabajo se pretende implementar un sistema de localización de dispositivos IoT en interiores empleando como tecnología para el posicionamiento redes Wi-Fi. El sistema implementado emplea la combinación de dos técnicas de localización. Una de estas técnicas se basa en el estándar IEEE802.11mc, donde emplea la métrica RTT como estimador de la distancia a la que se encuentra un dispositivo móvil con respecto a un AP compatible con dicha tecnología. Y como segunda técnica se emplea el sistema monopulso, con el que se pretende estimar la dirección de la llegada de la señal que emita el dispositivo IoT.

Con estos dos parámetros, se pretende estimar la posición exacta del dispositivo y reflejarlo en un plano 2D creando de esta manera un prototipo de sistema Radar Wi-Fi.

Palabras clave.

IEEE 802.11mc, MQTT, Indoor positioning, Fine Timing Measurement FTM, WLAN, RTT, función de localización con técnica monopulso

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. OBJETIVOS	10
1.2. ANTECEDENTES	10
1.4. TECNOLOGÍAS EMPLEADAS	12
1.4.1. ESTÁNDAR IEEE 802.11 (NORMAS INALÁMBRICAS)	12
1.4.2. IEEE 802.11MC-2016 (PROTOCOLO FTM)	12
1.4.3. MÉTRICA RTT (TIEMPO DE IDA Y VUELTA)	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
1.4.4. RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATOR (RSSI)	13
1.4.5. TÉCNICA RADAR MONOPULSO	14
1.4.6. PROTOCOLO MQTT	16
1.4.7. ANTENAS	17
DIAGRAMA DE RADIACIÓN	17
DIRECTIVIDAD	17
GANANCIA	17
REGIONES DEL CAMPO	17
2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA	18
2.1. AP JOCTO WILD (DISPOSITIVO QUE GENERA LA RED INALÁMBRICA).	19
2.2. DISPOSITIVO INITIATOR FTM	20
2.3. ANTENAS DE PANEL	21
2.4. ROUTER INALÁMBRICO	23
2.5. APLICACIÓN ANDROID RTT	23
2.6. PC PERSONAL	24
3. CARACTERIZACIÓN EN CÁMARA ANECOICA	25
3.1. RESULTADO DE LOCALIZACIÓN EN CÁMARA ANECOICA	33
4. RESULTADO DE LOCALIZACIÓN EN ENTORNO REAL	43
4.1. LOCALIZACION PARA REALIZAR PRUEBAS	43
4.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADO DE PRUEBA EN ENTORNO REAL	45
5. DENTRO DEL FOV LA ESTIMACIÓN DEL DOA ES BASTANTE CERCANO AL ÁNGULO DONDE SE ENCUENTRA EL OBJETIVO.CONCLUSIONES	47
6. BIBLIOGRAFÍA	48
7. ANEXOS	49
7.1. ANEXO I: CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO JOCTO WILD	49
7.1.1. MODO AP PARA RESPONDER A LAS PETICIONES DEL PROTOCOLO FTM	49
7.1.2. SERVIDOR MQTT	52
7.1.3. SERVIDOR SSH	53
7.2. ANEXO II: CONFIGURACIÓN PARA EL CONTROL DEL JOCTO WILD A TRAVÉS DE UN PC	54
EL ARCHIVO SCRIPT 'OBTENERRSSIAP.SH':	54
ACTIVARSUB.SH SE ENCARGA DE PONER ACTIVAR UN SUBSCRIPTOR PARA EL TOPIC QUE INTERESA.	56

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Canales disponibles en la frecuencia de 2.4 Ghz.....	12
Figura 2. Fases de la ejecución del protocolo FTM. Petición de inicio de protocolo FTM.	12
Figura 3 Esquema de los tiempos necesarios para estimar el RTT.	13
Figura 4 Diagrama Suma y Diagrama Resta a partir de los cuales se estima la función de localización.....	14
Figura 5. Diagrama Suma y Diagrama Resta	15
Figura 6 Ejemplo de función monopolso que caracteriza a un range de 3m.....	16
Figura 7 Regiones de campo del array de antenas.	18
Figura 8 Componentes del sistema utilizado para realizar las pruebas	19
Figura 9 Elementos que se encuentran en el interior de cada Componentes.....	19
Figura 10 Dispositivo con la capacidad de funcionar bajo el protocolo FTM.....	20
Figura 11 Antenas Direccionales de Panel	21
Figura 12 Conexionado de Jocto WILD con array de antenas	22
Figura 13 Ángulo de inclinación para las antenas que forman array de antenas monopolso	22
Figura 14 Parte anterior y posterior de router LINKSYS WRT54G.....	23
Figura 15: Pasos a realizar en la aplicación Android StaticInmilos	24
Figura 16: Pasos a realizar en la aplicación Android StaticInmilos	24
Figura 17: Pasos para obtener los parámetros objetivos.	25
Figura 18: Ubicación de las diferentes posiciones donde se proceder a caracterizar los parámetros RTT y RSSI.....	25
Figura 19: Diagrama de Radiación sin aplicar el factor de corrección.....	26
Figura 20 Factor de corrección RSSI de la antena 2.....	27
Figura 21 Diagrama de Radiación Ajustado según el ranging.....	27
Figura 22 Diagrama Diferencia	28
Figura 23: Diagrama Suma caracterizada	29
Figura 24 Función Monopolso caracterizada para cada ranging.....	29
Figura 25 Caracterización del RTT para cada ranging	30
Figura 26: Error RTT	31
Figura 27 Diagrama de Flujo para crear el sistema de posicionamiento.....	32

Figura 28: Error en estimación del DoA para un conjunto de 100 muestras	33
Figura 29: Error DOA para conjuntos de 1 muestras.....	34
Figura 30: Características para un $r=3$ y $\theta=0^\circ$	35
Figura 31: Resultado de aplicar el algoritmo para un $r=3m$ y $\theta=0^\circ$	35
Figura 32: Características de la señal para $r=2$ y $\theta=0^\circ$	36
Figura 33 Resultado de aplicar el algoritmo para un $r=2 m$ y $\theta=0^\circ$	36
Figura 34 Características de señal con $r=1$ y $\theta=0^\circ$	37
Figura 35: Resultado de aplicar el algoritmo para un $r=1 m$ y $\theta=0^\circ$	37
Figura 36 Características de señal recibida con un $r=0.5 m$ y $\theta=0^\circ$	38
Figura 37 Resultado de aplicar el algoritmo para un $r=0.5 m$ y $\theta=0^\circ$	38
Figura 38 Datagrama para ranging=3 m, $\theta=-20^\circ$ y $\theta=20^\circ$	40
Figura 39 Datagrama para ranging=2 m, $\theta=-20^\circ$ y $\theta=20^\circ$	40
Figura 40 Datagrama para ranging= 1m, $\theta=-20^\circ$ y $\theta=20^\circ$	41
Figura 41 42 Datagrama para ranging=0.5 m, $\theta=-20^\circ$ y $\theta=20$	41
Figura 42 Ranging 3m y fuera del FOV	42
Figura 43 Ejemplo fuera del FOV y para los diferentes ranging	42
Figura 44 Escenario para la recogida de muestras	43
Figura 45 Delimitación de la zona de pruebas.....	43
Figura 46 Colocación de los dispositivos para empezar las pruebas	44
Figura 47 Error RTT en 2D.....	45
Figura 48 ERROR DOA en 2D.....	45
Figura 49 2D con Error en la Distancia Euclídea.....	46
Figura 50 2D con Error en el Eje X	46
Figura 51 2D con Error en el Eje Y	47

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS

Con el desarrollo de este trabajo se pretende implementar un sistema de localización de dispositivos IoT (Internet of Things) empleando la combinación de RTT y la técnica radar monopulso. Mediante estos dos inputs, se consigue conocer la distancia y el ángulo, conocido como Direction of Arrival (DoA), del dispositivo. Conociendo el ángulo y la distancia se puede calcular la posición, teniendo de este modo un sistema de localización empleando un único AP (Access Point).

La primera de las tareas que llevaremos a cabo es una caracterización exhaustiva de la métrica RTT (Round Trip Time) en redes WiFi IEEE 802.11mc. La finalidad de esta caracterización es adquirir el conocimiento necesario para poder emplearla como input de los algoritmos de posicionamiento y el desarrollo de los dispositivos. Se debe de realizar la modificación, tanto hardware como software, que nos permita adquirir de forma simultánea la RSSI y la RTT proveniente de los dispositivos IoT para el cálculo de la distancia y de DoA.

Por lo tanto, se va a explorar la posibilidad de combinar la técnica monopulso con la métrica RTT. Para ello se va a abordar la modificación de un AP que soporte el protocolo 802.11mc con capacidad MiMo, modificado mediante dos antenas directivas de panel, de forma que permita adquirir la RSSI de cada una de las antenas para la generación de función monopulso y, de forma simultánea, adquirir la RTT.

Con estas técnicas se pretende combinar un sistema de estimación del DoA (Direction of Arrival) como es la función monopulso, con un sistema de ranging como es el caso de la RTT, y así concebir un prototipo de sistema RADAR WiFi usando puntos de acceso comerciales.

Por lo tanto, a modo de resumen, los objetivos principales de este TFM son:

- Caracterización de RTT.
- Modificación de APs para la generación de la función monopulso y obtención de RTT de forma simultánea.
- Implementación de posicionamiento basado en radar-monopulso y RTT

1.2. ANTECEDENTES

Los avances en telecomunicaciones, electrónica e Internet han propiciado que el mundo de las nuevas tecnologías avance a un ritmo vertiginoso. La evolución de Internet ha permitido que IoT sea ya una realidad. La popularidad de esta tecnología radica principalmente en la multitud aplicaciones y posibilidades que proporciona, tanto para mejorar tanto la vida cotidiana de las personas como los entornos empresariales.

IoT se podría definir como la agrupación e interconexión de dispositivos y objetos a través de una red (bien sea privada o Internet), dónde todos ellos podrían ser visibles e interaccionar. La mejora en las capacidades de los dispositivos y las aplicaciones que en ellos se pueden usar permiten que los usuarios las aprovechen. Por ejemplo, en entornos interiores de grandes edificios, un usuario puede recibir información sobre donde está situado.

Para obtener la información sobre la posición de personas u objetos en estos entornos, no se puede emplear la tecnología GPS, ya que este sistema funciona bien en entornos exteriores y sin obstáculos, pero no en grandes edificios o rascacielos. Los materiales de construcción de estos edificios actúan como barreras cuando un sistema de localización como el GPS intenta funcionar. Por tanto, como solución a esta problemática han surgido novedosos métodos que emplean tecnologías como el Wi-Fi, Bluetooth, Identificación por Radiofrecuencia (RFID), Banda Ultra Ancha (UWB), Infrarrojo, entre otros.

Todas estas tecnologías empleadas no llegan a destacar como solución predominante en los sistemas de localización de dispositivos inteligentes en entornos interiores como lo hace la solución basada en redes WiFi. El que esta solución destaque más entre en las otras se debe a que en la mayoría de los edificios donde se quiere implementar un sistema de localización para dispositivos tienen desplegadas grandes redes WiFi para dotar de conectividad.

La mayoría de las tecnologías que se mencionan en el párrafo anterior aplican técnicas de localización que buscan maximizar la precisión según los datos que reciba. Los algoritmos más empleados en estas técnicas de localización son los algoritmos basados diferentes parámetros como la diferencia de tiempo (TOA/TDOA 'Time of Arrival) de transmisión y recepción de la señal, el ángulo de llegada de la señal (AOA/DOA), algoritmos basado en el tiempo de vuelo (TOF) de la señal o los algoritmos que emplean el nivel de potencia de señal recibida (RSSI o Received Signal Strength Indication) para obtener una estimación de la distancia a la que se encuentra este emisor de señal [1].

Dentro del abanico de posibilidades enunciadas anteriormente, en este trabajo nos centraremos en el novedoso estándar WiFi IEEE 802.11mc que permite que por medio de un intercambio de tramas entre un emisor y un AP se obtenga el ranging entre un AP y un dispositivo dentro su alcance. Este valor es el denominado como Round Trip Time (RTT). Pero para obtener una posición exacta de este emisor de señal es necesario conocer otro parámetro, el Ángulo de Llegada (DOA / AOA) de la señal emitida. Mediante la combinación de estos dos parámetros, ángulo y distancia, se puede ubicar de forma precisa a un dispositivo. Como se ha comentado, mediante RTT se obtendrá la distancia al dispositivo y mediante la denominada como técnica radar monopulso se calculará el DoA . Cuando se intenta determinar la posición mediante RSSI de un dispositivo, la forma de adquirir la RSSI puede ser activa o pasiva.

En el escaneo activo, el dispositivo móvil, durante el tiempo que está conectado a un canal, enviará tramas que deberán ser respondidas por parte de los puntos de acceso alcanzables que operan también en ese canal. Las tramas enviadas a los puntos de acceso reciben el nombre de *Probe Request*, a las cuales los puntos de acceso responden con una trama *Probe Response*. Examinando las tramas *Probe Response* (*ver implementación*), un dispositivo móvil es capaz de identificar los puntos de acceso que tiene a su alrededor y de medir la fuerza de la señal que le llega de cada uno de ellos. Entre otra mucha información, estas tramas contienen el identificador de la red inalámbrica a la que pertenece el punto de acceso (ESSID – Extended Service Set Identifier) y la potencia de recepción de la señal (RSSI – Received Signal Strength Identification).

En el caso de sistemas pasivos, durante el tiempo que el dispositivo móvil está conectado a un canal, permanece a la escucha de posibles tramas que puedan llegar. Si existe algún punto de acceso dentro de ese canal, éste enviará tramas que reciben el nombre de Beacon, las cuales serán examinadas por el dispositivo móvil y se podrá extraer la potencia de recepción de la señal con respecto a ese punto de acceso. El inconveniente de esta técnica se encuentra en las señales multicamino ya que puede provocar un error en la estimación de la dirección de llegada de la señal original. Por tanto, se necesita de una visión directa entre los dos dispositivos (AP – dispositivo móvil). En este trabajo, el sistema seleccionado es el pasivo, ya que la potencia RSSI es adquirida por el AP.

Posteriormente a la explicación de las principales tecnologías empleadas se hará una descripción completa del dispositivo implementado, se indicarán cuáles han sido los experimentos realizados y, por último, se mostrarán los resultados ofrecidos por el sistema.

1.3. TECNOLOGÍAS EMPLEADAS

1.3.1. ESTÁNDAR IEEE 802.11 (NORMAS INALÁMBRICAS)

El estándar IEEE 802.11, es un estándar para las redes inalámbricas. Este conjunto de estándares sigue creciendo en la actualidad, este crecimiento se debe a la introducción de mejoras en el rendimiento o el alcance como el empleo de nuevas frecuencias disponibles.

El estándar IEEE 802.11 subdivide el espectro de radio en un conjunto de canales. El número de canales disponibles depende de donde se esté usando esta tecnología y la sub-especificación seleccionada de la misma. Los tres rangos de frecuencia disponibles para los dispositivos que desearan emitir de esta forma son: 2.4 GHz, 3.6 GHz y 5 GHz. La mayoría de los dispositivos actuales operan, por defecto, en la franja de frecuencias cercana a 2.4 GHz.

La frecuencia de 2.4 Ghz se divide en 14 canales como se puede apreciar en la Ilustración 1, estos canales se encuentran separado 5 MHz. En Europa se dispone de 13 canales, con un ancho de banda de 22MHz.

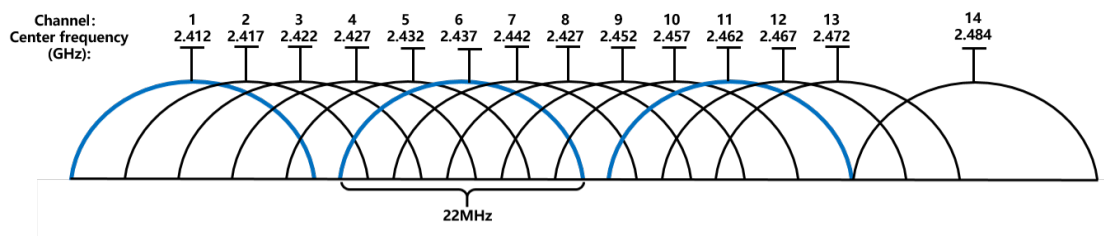


Figura 1 Canales disponibles en la frecuencia de 2.4 Ghz.

1.3.2. IEEE 802.11MC-2016 (PROTOCOLO FTM)

Esta norma fue publicada en 2016 y se denomina protocolo WiFi Fine Time Measurement (FTM). Este protocolo permite que un dispositivo WLAN mida con precisión el tiempo de viaje de ida y vuelta (RTT) a otro dispositivo. Esta medición se realiza empleando sesiones FTM. Esta sesión FTM es una instancia del protocolo FTM entre dos dispositivos de comunicación, un iniciador y un responder. Según el estándar el iniciador es una estación (STA) que inicia el proceso FTM enviando una solicitud FTM a un punto de acceso (AP) correspondiente. Como se observa en la Figura 1, un AP que admite el procedimiento FTM como dispositivo de respuesta se denomina Responder FTM. Según la respuesta de AP, el protocolo acepta o se niega a continuar el proceso de ranging.

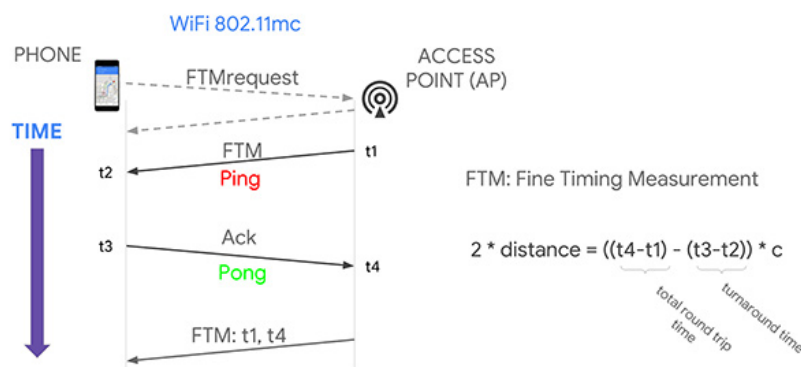


Figura 2. Fases de la ejecución del protocolo FTM. Petición de inicio de protocolo FTM.

El STA que responde envía las marcas de tiempo t_1 y t_4 al STA de inicio como parte del próximo frame de FTM. Las marcas de tiempo se reportan en picosegundos. Junto con las marcas de tiempo t_2 y t_3 , el STA initiator puede calcular el tiempo de round-trip time t_{RTT} , el tiempo de retorno y el tiempo de vuelo de ida t_{TOF} de la siguiente manera:

$$t_{RTT} = t_4 - t_1$$

$$\tau = t_3 - t_2$$

$$t_{TOF} = \frac{t_{RTT} - \tau}{2}$$

Multiplicando el t_{TOF} por la velocidad de la luz, el STA móvil calcula la distancia al STA que responde como se describe en el apartado 1.4.3.

El tiempo que tarda la señal Wifi en viajar desde el smartphone hacia el punto a acceso (AP) es proporcional a la distancia entre ellos (aproximadamente 3.3 ns/m). Debido a que los relojes internos del smartphone y del AP no están sincronizados la medición de este tiempo no puede basarse en timestamp en los extremos.

Por tanto, se usa la métrica RTT (Tiempo de Ida y Vuelta o Tiempo de Vuelo) ya que ésta no usa valores del reloj interno de los dispositivos. El RTT se estima en función de la marca de tiempo de transmisión del mensaje FTM y la marca de tiempo de recepción de su ACK. Estos tiempos van incluidos en el ping que se hace desde el AP hacia el dispositivo móvil y en las respuestas que obtenemos sobre dicho ping.

Las mediciones del tiempo de ida y vuelta no son perfectamente precisas, ya que están sujetas a varios tipos de errores de medición, interferencias de RF, así como a las posiciones y movimientos de los objetos en el entorno, pero la realización del proceso de forma repetida puede mejorar la calidad de las mediciones de RTT:

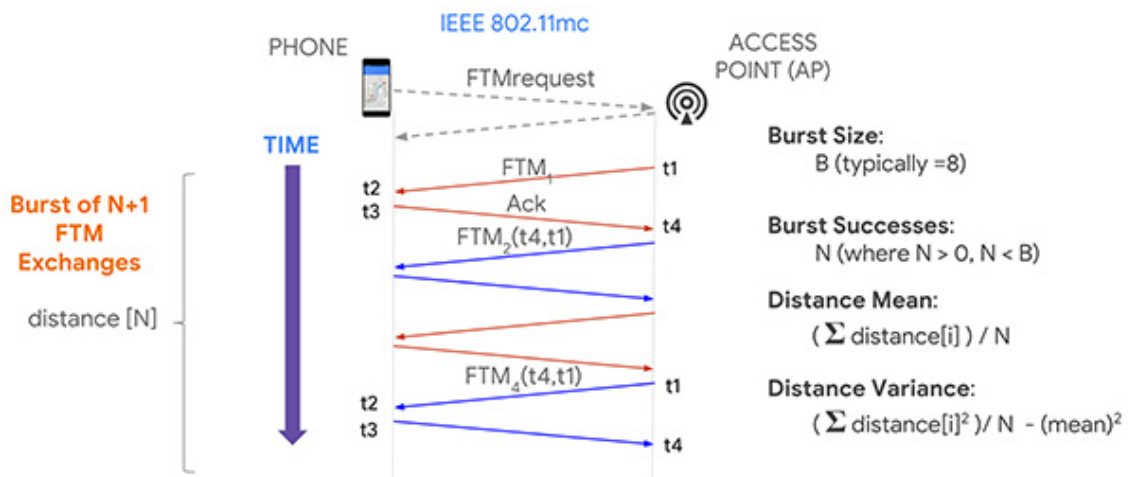


Figura 3 Esquema de los tiempos necesarios para estimar el RTT.

1.3.3. RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATOR (RSSI)

El Indicador de Intensidad de Señal Recibida o RSSI es un valor que permite conocer la potencia relativa de una señal recibida en un dispositivo inalámbrico.

En el espacio libre, la pérdida de potencia en la transmisión de la señal es proporcional al cuadrado de la distancia de la trayectoria de la señal. La fórmula para la pérdida en espacio libre es:

$$L_{FSPL} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$

R es la distancia. En interiores el modelado de la pérdida de trayectoria es compleja y se calcula de la siguiente manera:

$$L_{FSPL} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \quad \text{dB}$$

Donde:

- N: coeficiente de pérdida de potencia a distancia.
- F: frecuencia en Mhz.
- L_f : factor de pérdida de penetración en el suelo
- n: numero de pisos entre los dispositivos.

1.3.4. TÉCNICA RADAR MONOPULSO

La técnica monopulso o también conocido como comparación por lóbulo simultaneo (simultaneous lobing) es una técnica empleada en la localización por medio de sistemas radar. El sistema de radar monopulso se utiliza principalmente para la medición y el seguimiento del ángulo del objetivo. La información sobre la posición angular del dispositivo se determina mediante la comparación de las señales recibidas en dos o más haces simultáneos. Esta técnica es la más usada ya que usando un único pulso se puede obtener el ángulo de llegada (DOA) de una señal emitida. Esto se consigue a través de la comparación de dos señales. Estas dos señales se denominan diagrama suma $\Sigma(\theta)$ y diagrama diferencia $\Delta(\theta)$. Existen diferentes formas de obtener y procesar estos diagramas. La técnica monopulso permite obtener una función que relaciona el ángulo azimutal del blanco con la relación de amplitudes o de fases de los diagramas suma y diferencia según la expresión:

$$\psi(\theta) = \frac{\Delta(\theta)}{\Sigma(\theta)}$$

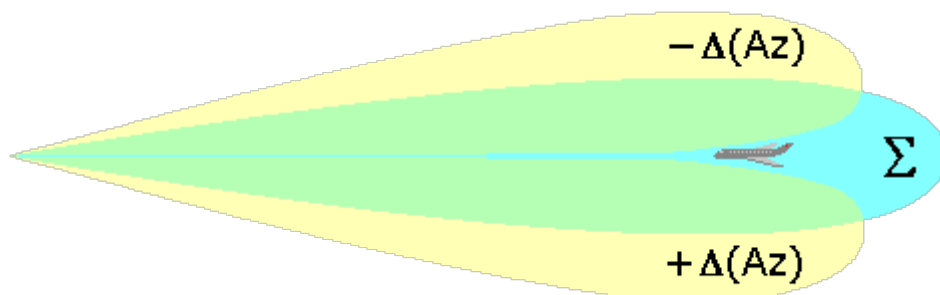


Figura 4 Diagrama Suma y Diagrama Resta a partir de los cuales se estima la función de localización.

En nuestro trabajo, para calcular la función monopulso, se ha medido el diagrama de radiación de dos antenas de panel directivas en cámara anecoica. Pero las antenas, aunque sean de la misma marca y modelo, debido al proceso de fabricación, suelen presentar diferentes ganancias. En el caso de que una de las antenas presente mayor ganancia que la otra, la diferencia se

$$K_D = RSSI_1(\theta = 0^\circ) - RSSI_2(\theta = 0^\circ)$$

corrige en la dirección perpendicular $\theta = 0^\circ$. Este valor es un factor de corrección K_D estas correcciones se hacen cuando se analizan los diagramas de radiación que se obtenidos (ver 6.2.4)

$$\psi(\theta) = \frac{\Delta(\theta)}{\Sigma(\theta)} = \frac{RSSI_1(\theta) - K_D * RSSI_2(\theta)}{RSSI_1(\theta) + K_D * RSSI_2(\theta)}$$

Una vez obtenemos el factor de corrección para cada distancia, recalculamos la función monopulso.

En la realización de la caracterización de la métrica RTT tomaremos en cuenta diferentes distancias, en cada una de ellas tendremos un valor de corrección diferente.

El ángulo entre el eje de la antena o de apuntamiento y la dirección del blanco se representa como θ . Cuando se da el caso donde la dirección de apuntamiento de la antena es la misma que la de la señal de eco recibida ($\theta = 0$) ambas señales estarán en fase, entonces se produce un máximo en la señal suma y un mínimo en la señal diferencia para dicha dirección.

En la Figura 5 se muestra una representación de los diagramas suma y diferencia mientras que en la Figura 6 se muestra la función monopulso generada a partir de los diagramas anteriores.

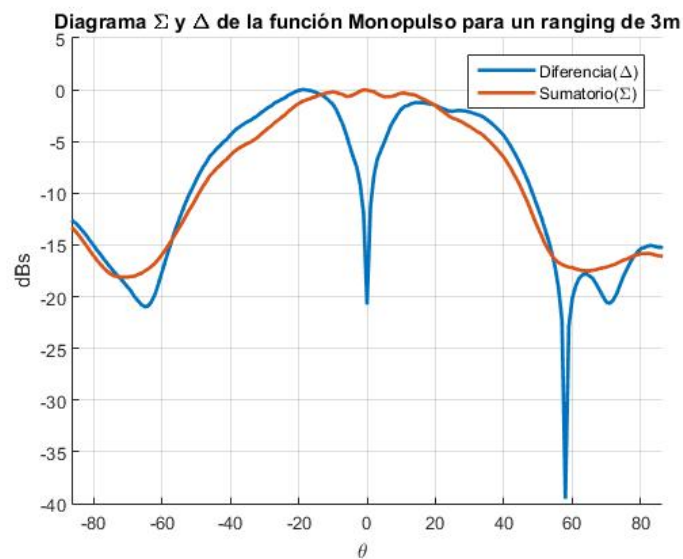


Figura 5. Diagrama Suma y Diagrama Resta

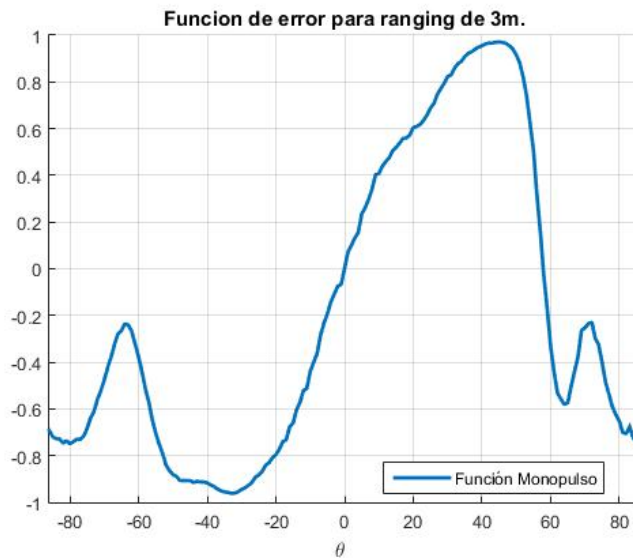


Figura 6 Ejemplo de función monopulso que caracteriza a un range de 3m.

1.3.5.PROTOCOLO MQTT

Uno de los principales protocolos sobre los que se fundamenta internet es TCP/IP. MQTT (Message Queue Telemetry Transport), que está construido sobre la pila de TCP/IP, se ha convertido en el estándar para las comunicaciones de IoT. MQTT es un protocolo de red liviano y flexible que logra el equilibrio adecuado para el envío de datos entre dispositivos IoT:

- El protocolo liviano le permite implementarse en hardware de dispositivos altamente limitados y en redes con ancho de banda de alta latencia/limitado.
- Su flexibilidad hace que pueda soportar varios escenarios de aplicaciones para dispositivos y servicios de IoT.

El protocolo MQTT define los tipos de entidades en la red: un intermediario de mensajes (también conocido como broker) y un número de clientes. El intermediario es un servidor que recibe todos los mensajes de los clientes y luego los redirige a clientes de destinos relevantes. Un cliente es cualquier cosa que pueda interactuar con el intermediario para enviar y recibir mensajes. Un cliente puede ser un sensor de IoT en el campo o una aplicación del centro de datos que procesa datos de IoT.

- El cliente se conecta con el intermediario. Se puede suscribir a cualquier «topic» de mensajes de intermediario. Esta conexión puede ser una conexión TCP/IP simple o una conexión TLS cifrada para mensajes confidenciales.
- El cliente publica el mensaje, sobre un tema, enviando el mensaje y el tema al intermediario.
- Después, el intermediario redirige el mensaje a todos los clientes que están suscritos a ese tema.

1.3.6.ANTENAS

Entre las propiedades que caracterizan a una antena algunas de ellas afectan significativamente, se explican a continuación.

Diagrama de Radiación

Es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las diferentes direcciones del espacio (sistema de coordenadas esférico) a una distancia fija. Algunas definiciones relacionadas con el diagrama de radiación son:

- Lóbulo principal: zona en la que la radiación es máxima.
- Lóbulos laterales: zona que rodea los máximos de menor amplitud.
- Lóbulo secundario: lóbulo lateral de mayor amplitud
- Lóbulo posterior: zona diametralmente opuesta al lóbulo principal.

Directividad

Es la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esta misma distancia una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena transmisora.

Si una antena es muy directiva, es capaz de concentrar la potencia que radia (o recibe) en una determinada dirección y únicamente recibir la señal en esa dirección.

Ganancia

Se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena.

Regiones del Campo

En una antena la potencia radiada está compuesta por una parte real y una parte imaginaria. La parte real o potencia radiativa es la potencia que puede ser transferida a un medio permitiendo su utilización. La potencia reactiva es la parte imaginaria de la potencia radiada. Esta potencia no puede ser radiada o transferida al medio, sino que permanece oscilando entre los campos. La proporción de la potencia radiativa y reactiva se presenta en diferentes proporciones dependiendo de la distancia donde se mida a partir de la antena. Es por ello por lo que se ha definido regiones de campo. Por tanto, los campos que rodean una antena se dividen en 3 regiones principales:

- **Campo cercano reactivo o Región de Rayleigh**

El campo cercano reactivo es la región donde los campos son reactivos, es decir, los campos E y H están desfasados 90 grados entre sí. Para campos de propagación o radiación, los campos deben ser ortogonales entre sí, pero en fase. La región se estima con la siguiente fórmula

$$\text{Campo Cercano Reactivo} \leq 0.62 \times \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

Donde:

$$\lambda(\text{longitud de onda}) = \frac{c(\text{velocidad de la luz})}{f(\text{frecuencia en Hz})} ; D: \text{dimensión de la antena}$$

- **Campo cercano radiante (región de Fresnel)**

El campo cercano radiante o región de Fresnel es la región entre el campo reactivo cercano y lejano. Los campos reactivos no dominan en esta región. Sin embargo, a diferencia de la región de campo lejano, la forma del patrón de radiación varía significativamente con la distancia.

$$\text{Campo Cercano Radiante} \leq \frac{2D^2}{\lambda}$$

- **Campo lejano o Región Fraunhofer**

Cuando se habla de antenas, el campo lejano es la región que se encuentra a una gran distancia de la antena. En el campo lejano, el patrón de radiación no cambia de forma a medida que aumenta la distancia.

$$\text{Campo Lejano} \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

Si se analiza los efectos de los campos en el sistema array monopulso que se utiliza en este trabajo, se obtiene las siguientes regiones:

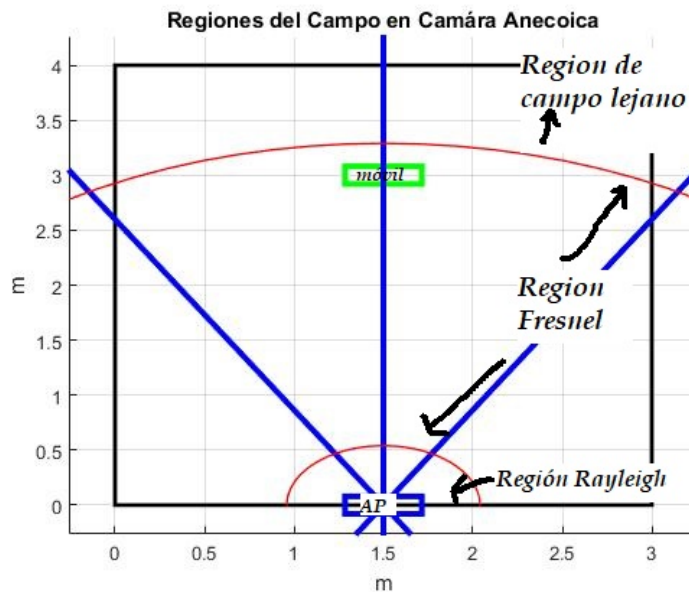


Figura 7 Regiones de campo del array de antenas.

2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

A continuación, se describe con detalle la arquitectura del sistema empleado para el desarrollo del presente proyecto. El sistema está formado por diversos dispositivos hardware junto con sus correspondientes aplicaciones software. Los componentes hardware de este sistema se puede observar en la Figura 8. Además, se muestra un esquema de estos en la Figura 9. A continuación se describe que función tienen cada uno de ellos.

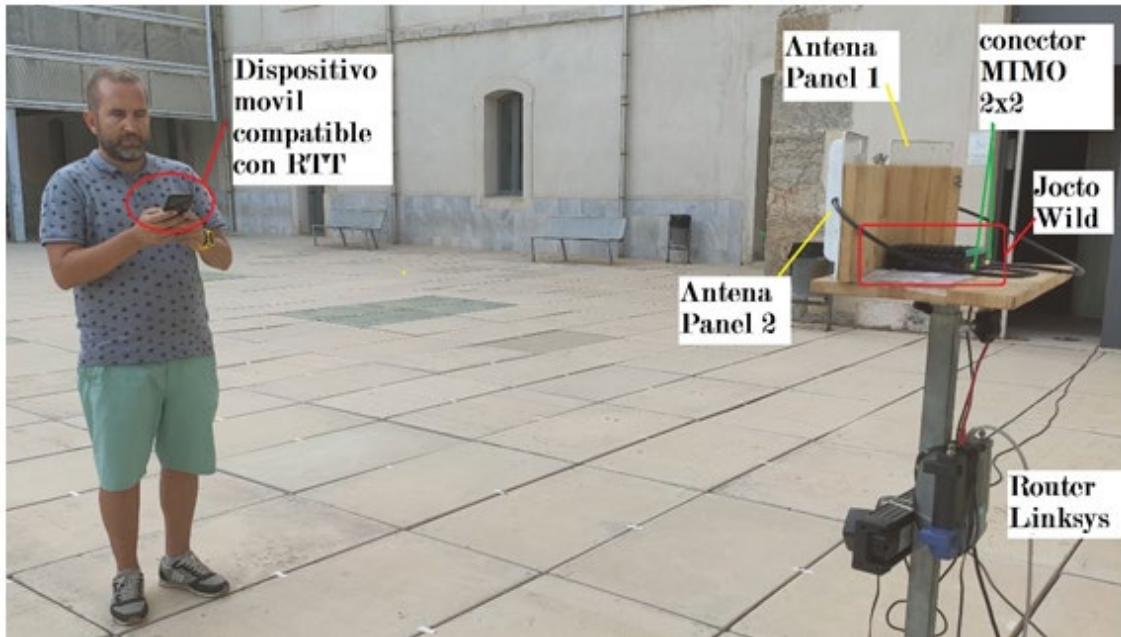


Figura 8 Componentes del sistema utilizado para realizar las pruebas

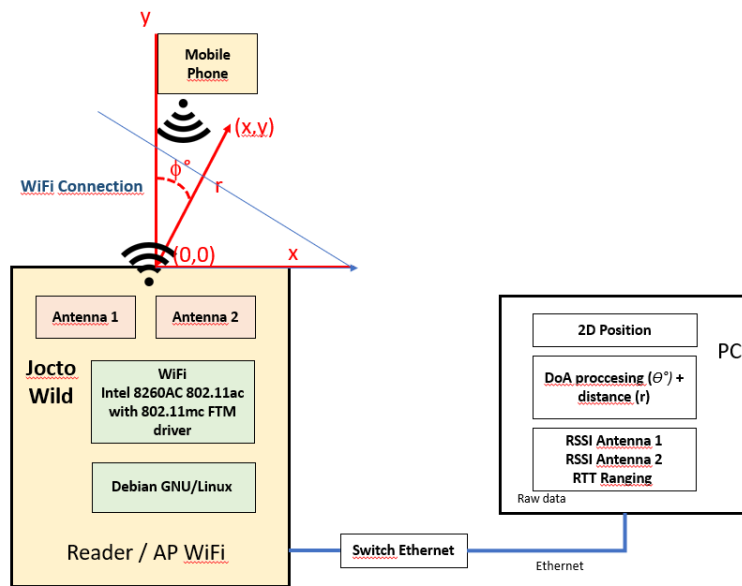


Figura 9 Elementos que se encuentran en el interior de cada Componentes

2.1.AP JOCTO WILD (DISPOSITIVO QUE GENERA LA RED INALÁMBRICA).

Las especificaciones para este dispositivo se encuentran en [2]. Este dispositivo lleva incorporado la imagen del Sistema Operativo Compulab WILD (Dispositivo de Localización Inalámbrica en Interiores). El SO es una distribución Debian GNU/Linux incorporada basada en el Yocto Project Board Support Package (BSP).

Con el software WILD, el dispositivo puede ser configurado para funcionar como Responder FTM o como Initiator FTM. Se trata de un PC compacto equipado con una tarjeta Wi-Fi Intel AC8260 y un firmware personalizado que implementa el protocolo FTM.



Figura 10 Dispositivo con la capacidad de funcionar bajo el protocolo FTM

Con respecto a RTT, los modos de funcionamiento del AP son:

- Modo Responder FTM

En este modo el dispositivo es configurado como Punto de Acceso para ofrecer la funcionalidad de respuesta a las peticiones del protocolo FTM que se hagan. Al ser un dispositivo que usa un SO Debian, un software Open Source permite realizar las configuraciones necesarias para funcionar como AP. Los pasos necesarios para realizar esta configuración se describen en el apartado 7.1.1.

- Modo Initiator FTM

El dispositivo tiene la capacidad de iniciar una solicitud para poner en marcha el protocolo FTM. Y obtener una respuesta del Responder con un valor de ranging RTT. Más información de funcionamiento de este modo se puede obtener ver en [3].

En este proyecto el dispositivo funcionará como un Punto de Acceso y en modo Responder FTM para poder responder a las solicitudes hechas por el protocolo FTM de los diferentes dispositivos móviles que puedan ejecutar dicho protocolo y estén en la zona de cobertura de este dispositivo AP. La funcionalidad de AP permite crear una red para el estudio de los datos enviados entre las estaciones que ejecutan este protocolo, la configuración de este modo se encuentra en el apartado 8.1.1 del Anexo I.

Una de las principales tareas de este proyecto ha sido modificar el SO de este dispositivo para añadir la funcionalidad de adquirir la RSSI de cada una de las antenas directivas conectadas al mismo. Además, se ha implementado la recepción mediante MQTT de la RTT recogida por el dispositivo que actúa como initiator tal y como se indicará a continuación.

2.2. DISPOSITIVO INITIATOR FTM

Para poder iniciar una petición de tramas FTM necesitamos de un dispositivo que lleve incorporado en su hardware el protocolo 802.11mc-FTM. En nuestro caso hemos empleado un smartphone con Android. En las versiones igual o superior a Android 9 Pie se añade Wi-Fi RTT en la API pública.

Hay muy pocos dispositivos que implementen en su hardware este protocolo debido a que es muy costoso de implementar y aun no se tiene claro su eficacia a la hora de localizar dispositivos móviles, se encuentra pocos dispositivos con este estándar. Por estos requisitos se elige el smartphone ROG PHONE de Asus y sus características se hallan en [4], cuyo procesador Qualcomm® Snapdragon™ 855 si soporta este protocolo. Aunque debido al despliegue mundial de la red 5G se encuentren más dispositivos con esta funcionalidad.

En este dispositivo se instala una aplicación Android que será la encargada de ejecutar el protocolo FTM para permitir el posicionamiento en tiempo real en este dispositivo. Y enviarán las tramas al Jocto WILD con el resultado de la medición. La información sobre cómo funciona esta aplicación se puede ver en el apartado 2.5.

2.3. ANTENAS DE PANEL

Usaremos la antena comercial de Interline cuyo modelo nos permite operar en las bandas de 2.4 Ghz y 5 Ghz [5]. Son antenas directivas se puede encontrar más información sobre ellas en [5] [6].



Figura 11 Antenas Direccionales de Panel

El montaje que se realiza con ellas es la siguiente: las salidas de las antenas MIMO del dispositivo Jocto WILD se conectan a estas antenas directivas. Este montaje se aprecia en la Figura 13.

La forma de trabajar de este array de antenas es como un sistema monopulso y sirve para detectar el AOA. Al realizar el montaje de estas antenas, se tiene en cuenta que las antenas de panel se coloquen con un ángulo de inclinación de ± 7 grados con respecto al eje X, esta colocación se observa mejor en la Figura 14.

Este ángulo de inclinación permite obtener un mejor FoV, por tanto, si el dispositivo móvil se encuentra a un ranging r igual para ambas antenas, la señal recibida por cada una de ellas será misma siempre que se haya hecho la calibración. Cuando se aplique la función de localización para dicho dispositivo, esta debe dar como resultado un AOA de 0° .



Figura 12 Conexión de Jocto WILD con array de antenas

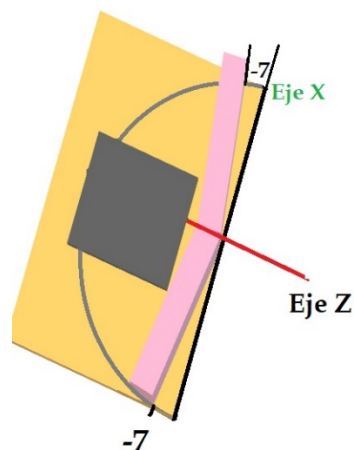


Figura 13 Ángulo de inclinación para las antenas que forman array de antenas monopulso

Si aplicamos a estas antenas las ecuaciones para el cálculo de las regiones de campo cercano y campo lejano, obtenemos las siguientes distancias:

D: tamaño máximo del array de antenas es de 45 cm.
 Frecuencia: canal 6 (2.437 Ghz) .

$$\lambda = 12.24 \text{ cm}$$

$$\text{Campo Cercano Reactivo} \leq 0.62 \times \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \rightarrow 0.62 \times \sqrt{\frac{0.45^3}{0.1224}} = 0.54 \text{ m}$$

$$\text{Campo Cercano Radiante} \leq \frac{2D^2}{\lambda} \rightarrow \frac{2 * 0.45^2}{0.1224} = 3.29 \text{ m}$$

2.4. ROUTER INALÁMBRICO

Es un router de la marca Linksys y el modelo que usamos es el WRT54G que nos permite crear una red local para poder manejar los dispositivos que harán las pruebas tanto en el laboratorio como en el exterior.



Figura 14 Parte anterior y posterior de router LINKSYS WRT54G

Este dispositivo nos permite conectarnos al dispositivo Jocto WILD de manera remota a través del PC personal y tener mayor control sobre los dispositivos que hacen la simulación.

2.5. APLICACIÓN ANDROID RTT

El uso de Wi-Fi RTT en Android requiere que el dispositivo tenga hardware que soporte FTM, y que ejecute Android 9 Pie o posterior. El usuario debe habilitar los servicios de localización y el escaneo Wi-Fi en el dispositivo, y otorgar permisos de localización a la aplicación que está usando la función.

Esta aplicación se emplea para obtener el ranging RTT con respecto al AP y enviar la información al mismo. Las principales fases de RTT que van con una esta aplicación Android son:

1. Se realiza una búsqueda de redes WiFi (Figura 15^a).
2. Se extraen APs habilitados para FTM de los resultados del escaneo (Figura 15b).
3. Se construye una solicitud de alcance con los APs seleccionados (Figura 15c).
4. Gestión de los resultados de las operaciones de alcance completadas. Aquí enviamos también las tramas generadas al Jocto Wild a través del protocolo MQTT Figura 16c.
5. Formato de la trama enviado al AP Jocto WILD Figura 16d.



Figura 15: Pasos a realizar en la aplicación Android StaticInmilos

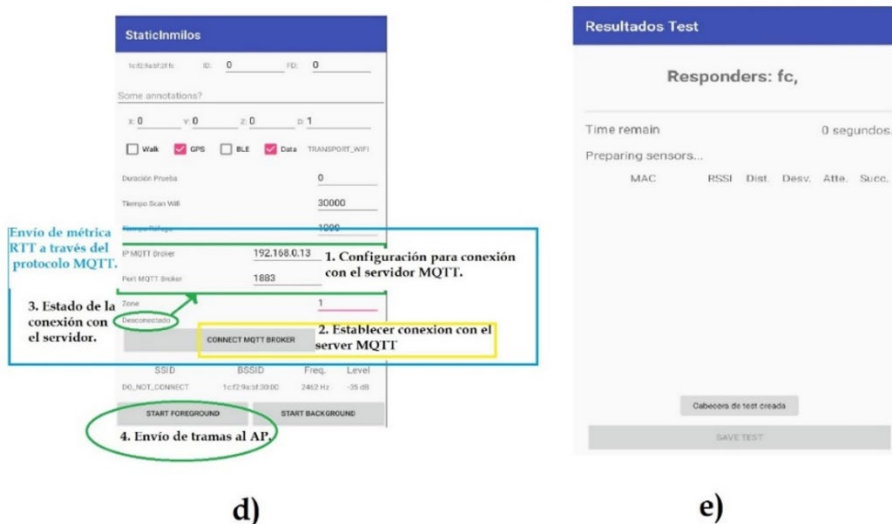


Figura 16: Pasos a realizar en la aplicación Android StaticInmilos

2.6. PC PERSONAL

En este PC controlamos de manera remota la ejecución de las distintas scripts que tenemos en el Jocto WILD para ello se emplea la herramienta GIT. Esta herramienta permite usar una terminal de comandos parecido al usado en Debian, permitiendo hacer una conexión remota mediante el protocolo SSH. El protocolo SSH funciona porque el dispositivo Jocto WILD se ha configurado para recibir peticiones SSH. La configuración del servidor SSH se describe en el apartado 9.1.3.

Además de ejecutar la aplicación de Matlab para ir procesando las diferentes muestras que se envían desde el dispositivo Jocto Wild al PC a través del protocolo UDP. En esta comunicación se obtiene los parámetros necesarios para poder realizar el proyecto. Los diferentes scripts que se ejecutan para controlar todo el proceso se describen en el apartado 9.2.

PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS PARAMETROS RTT Y RSSI

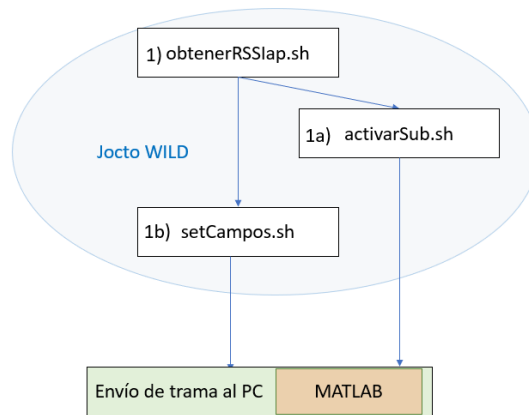


Figura 17: Pasos para obtener los parámetros objetivos.

El script obtenerRSSIap.sh permite ejecutar en segundo plano el script activarSub.sh. Además de obtener el parámetro RSSI del array de antenas. Cuando se obtiene este valor se procede a crear el formateo adecuado de datos mediante el script setCampos.sh para enviarlo a través del socket UDP al PC. El script activarSub.sh ejecuta la escucha de tramas FTM y almacenarlas en un archivo txt.

Una vez ya se ha hecho las pertinentes configuraciones se procede a recolectar los datos necesarios para poder conseguir los objetivos del proyecto.

3. CARACTERIZACIÓN EN CÁMARA ANECOICA

La primera de las tareas que se realiza es una caracterización del dispositivo en su conjunto en un entorno controlado. Este entorno controlado lo conseguimos en la cámara anecoica de la ETSIT. Para la recolección de los datos, se procede a preparar el equipo con las configuraciones previas (apartado 2) para poder realizar después el montaje de estos la cámara según la distribución de la Figura 18. Una vez se obtengan las muestras de RSSI y RTT para cada ranging, se procede a realizar la representación de la función monopoluslo y RTT.

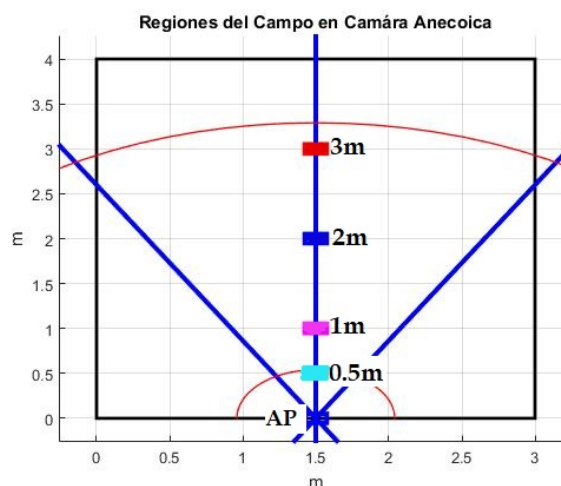


Figura 18: Ubicación de las diferentes posiciones donde se proceder a caracterizar los parámetros RTT y RSSI.

Funcionamiento en cámara anecoica

Para obtener estos datos, se sitúa el AP sobre una base giratoria, que es controlada desde el exterior de la cámara por medio de un software instalado en el PC personal. Este software permite tener comunicación con la base giratoria mediante un cable de red desde el exterior y que se pueda controlar la mesa de giro mediante un software de control.

Los datos que se obtienen van en función de la distancia que haya entre este AP y el dispositivo móvil, las distancias elegidas son de 3, 2, 1 y 0.5 metros. Para cada una de estas posiciones del dispositivo móvil se hace un barrido de 180 grados, y en cada uno de estos ángulos se recogen 100 muestras.

Esta recogida y procesamiento de estos datos se hace desde el PC utilizando el software Matlab. En este software se ejecuta un script y se pone en marcha todo el sistema.

Procesamientos de los datos obtenidos: Diagramas de Radiación

A partir de las muestras obtenidas se obtiene los diagramas de radiación según el ranging tal y como se observa en la Figura 19

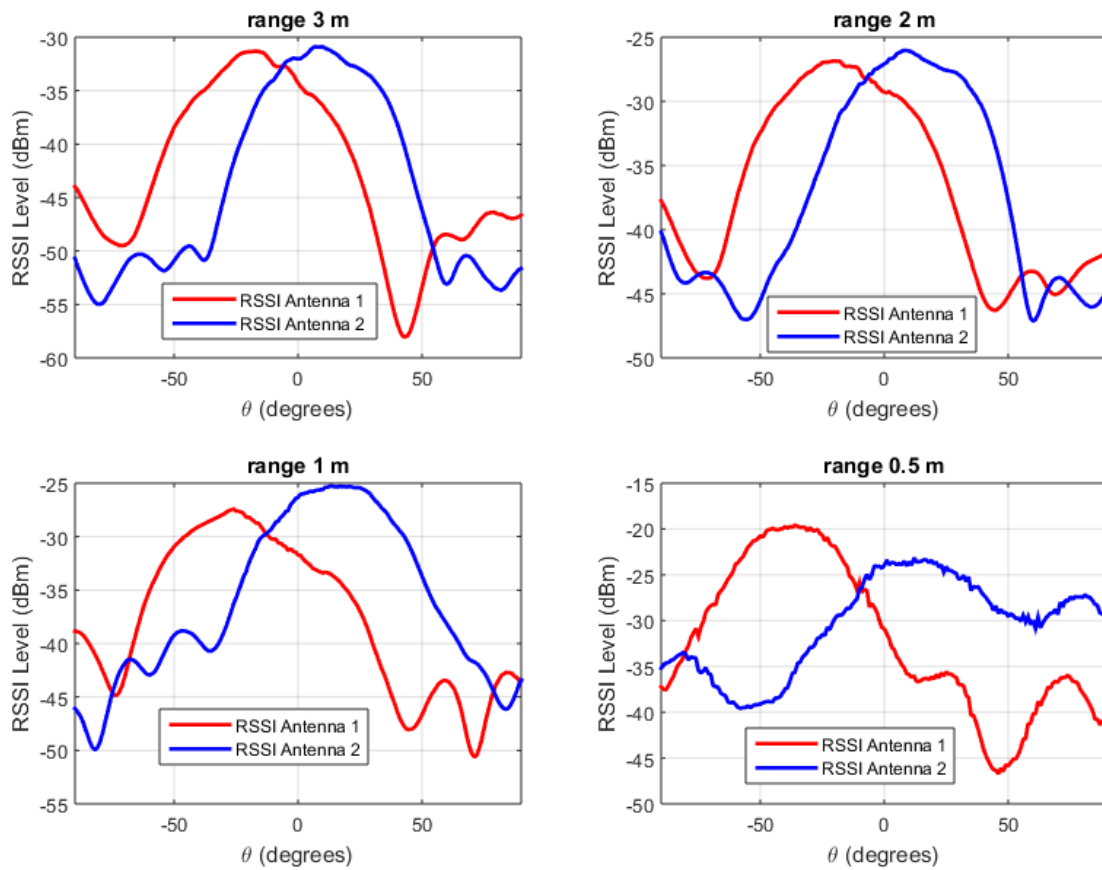


Figura 19: Diagrama de Radiación sin aplicar el factor de corrección

Como se observa en la Figura 19, para poder obtener una función monopulso caracterizada se debe obtener la potencia de señal recibida de cada una de las antenas que forman el array. Las dos antenas, aunque se trate del mismo modelo, tienen diferente ganancia, la antena dos tiene una ganancia mayor que la antena uno, por tanto, el nivel de potencia recibida por la antena dos es mayor. El factor de corrección que se necesita aplicar en función de la distancia se muestra en la Figura 20.

Es necesario aplicar un factor de corrección que se denomina K_D a cada ranging donde se caracteriza la función de localización (monopulso). Para ver de qué manera se aplica se puede revisar el apartado 1.4.4.

Ranging	K_D (dB)
r = 3m	-0.7
r = 2m	-1
r = 1m	-2.3
r = 0.5m	4

Figura 20 Factor de corrección RSSI de la antena 2

Una vez aplicado este factor de corrección, se obtiene los siguientes diagramas de radiación para los diferentes ranging. Si se observa la Figura 22, para cada ranging las dos señales de potencia recibida se cortan en el ángulo cero. Esto indica que, cuando se calcule la función monopulso, un valor de 0 en la misma significará el emisor se encuentra en el $\theta=0^\circ$ ya que las dos antenas reciben el mismo nivel de señal.

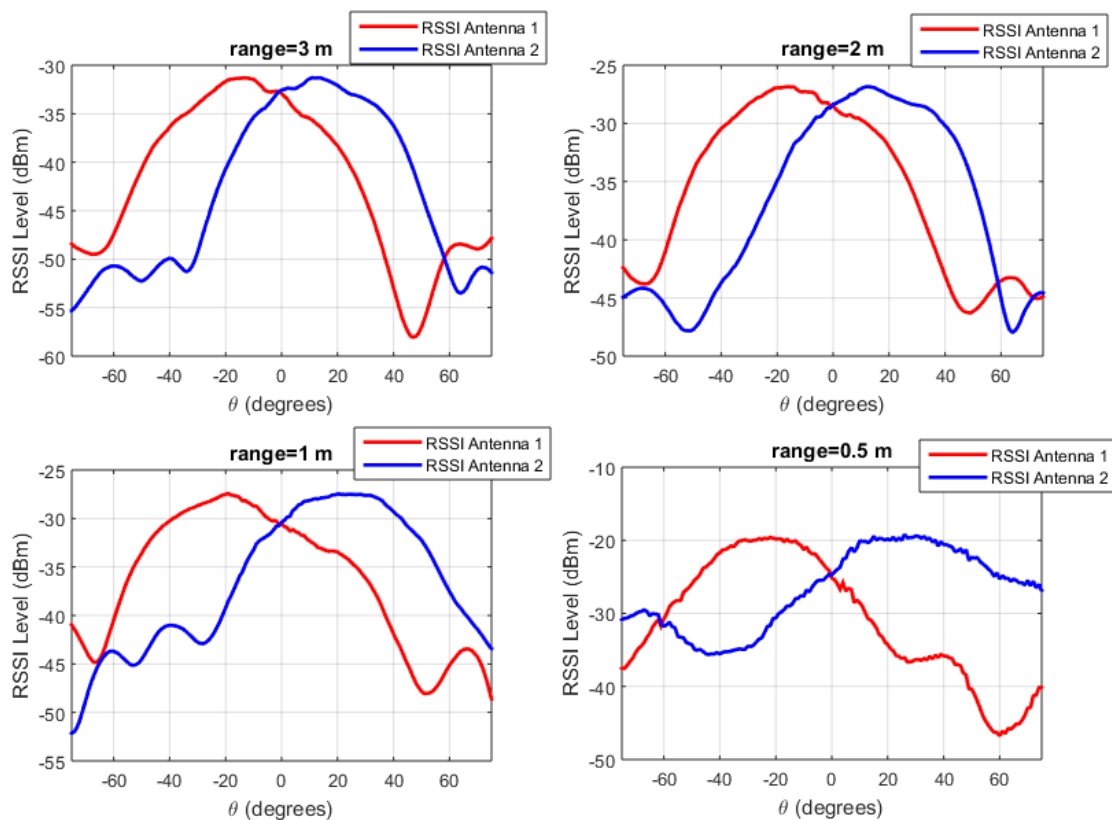


Figura 21 Diagrama de Radiación Ajustado según el ranging.

En la Figura 18 se observa el nivel de potencia recibida según donde se sitúe el dispositivo móvil. Cuando este se encuentra a un range de 3m, el nivel de señal recibida máxima está sobre los -31 dB y si se sitúa el dispositivo móvil a un ranging de 0.5m, se observa que el nivel de señal recibida está en torno a los -19 dB.

Procesamientos de los datos obtenidos: Función Monopulso caracterizado según el range.

Para obtener la función de localización caracterizada para cada ranging se debe obtener previamente los diagramas Suma Diferencia.

Cuanto mayor sea la distancia entre los lóbulos, la pendiente que se obtenga en la función monopulso en un FoV de 60 grados será menor, haciendo que haya menor precisión en la estimación de un ángulo .

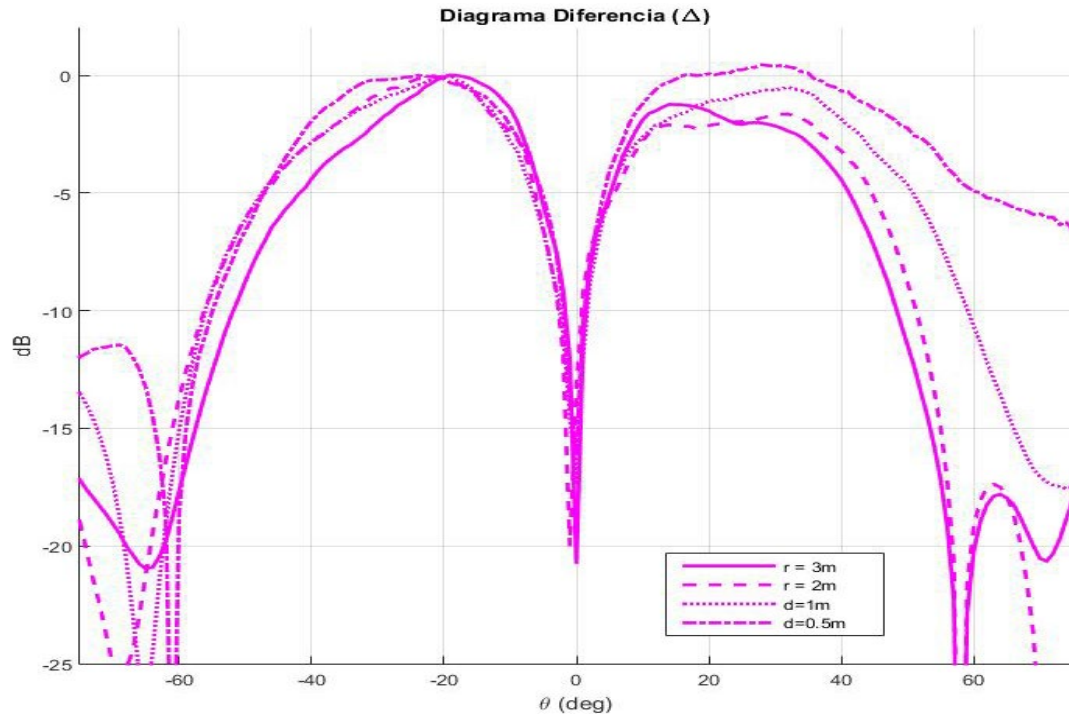


Figura 22 Diagrama Diferencia

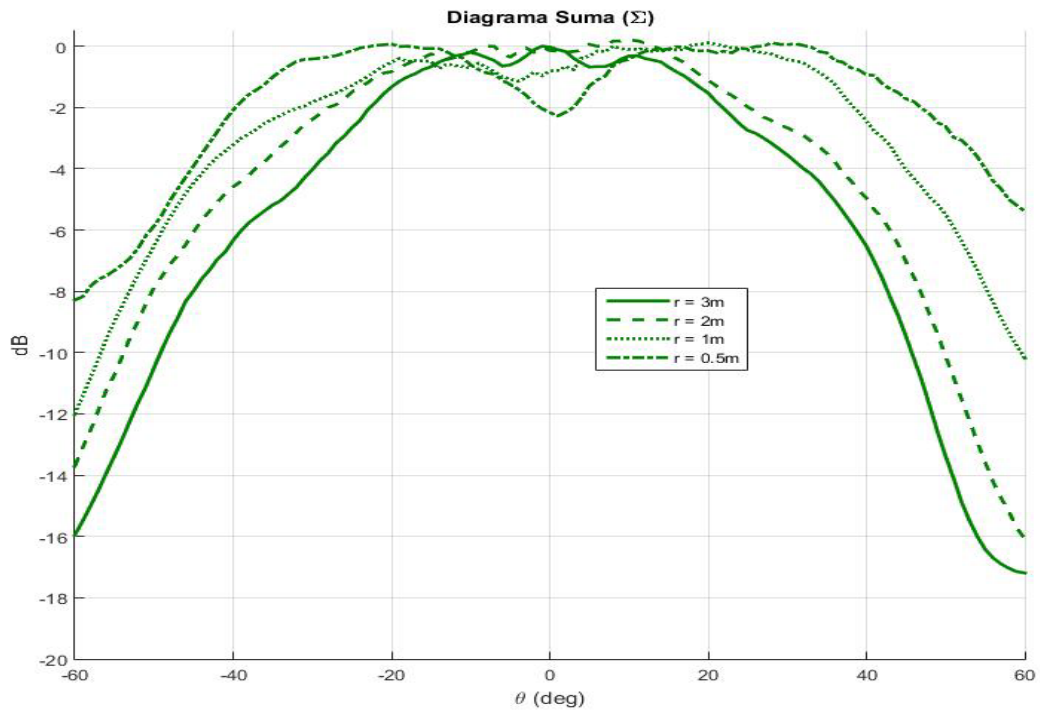


Figura 23: Diagrama Suma caracterizada

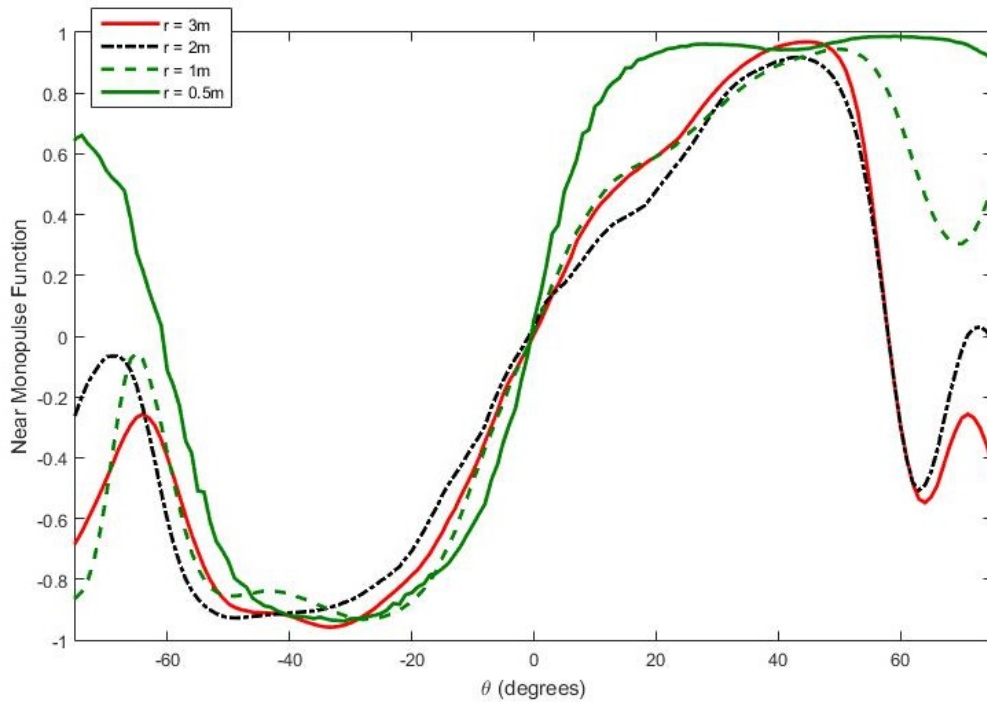


Figura 24 Función Monopulso caracterizada para cada ranging

Según este modelo, se puede observar un Field of View (FoV) de 60° $[-30,30]$, rango en el que se obtiene una función monopulso lineal.

Procesamientos de los datos obtenidos: Diagramas RTT

De manera simultánea a la adquisición de las muestras RSSI, se realizó también la adquisición de la RTT. Para poder representar estos valores RTT leídos y caracterizar esta métrica se hace uso de un offset de 6000mm ya que el hardware presenta errores de calibración [7]. En la Figura 25 se representa la métrica RTT caracterizada según la distancia al AP. Para cada ranging el RTT obtenido es parecido al ranging real.

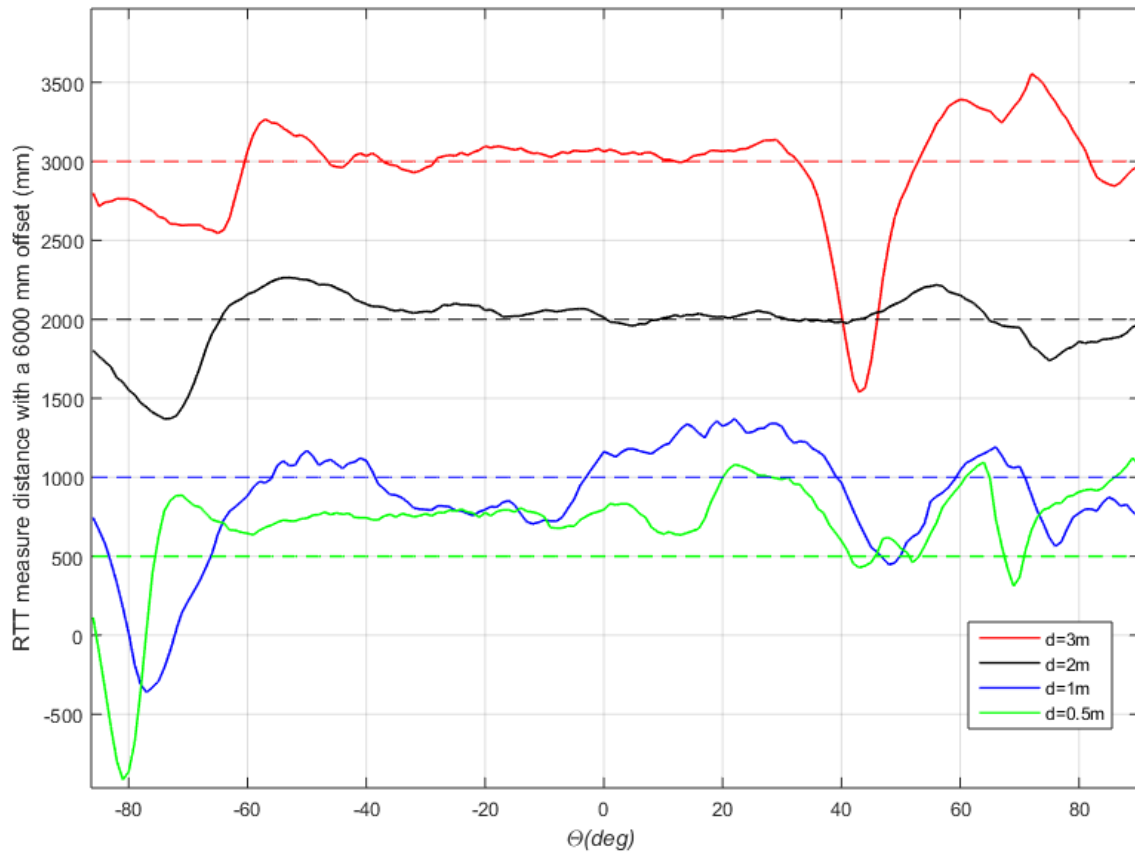


Figura 25 Caracterización del RTT para cada ranging

En la gráfica Figura 26 se representa el error respecto del RTT adquirido con respecto al ranging real y se aprecia mayor estabilidad en el ranging RTT en el FoV indicado anteriormente $[-30^\circ$ a $30^\circ]$.

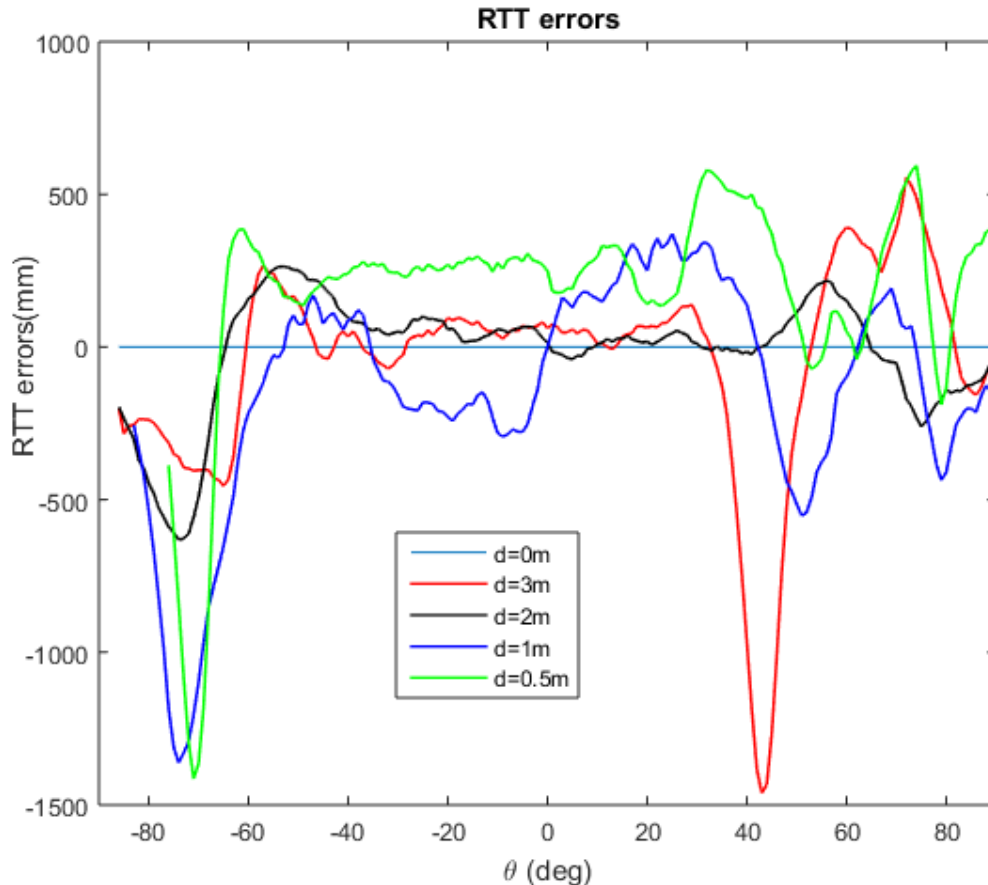


Figura 26: Error RTT

Como se observa el error cometido al caracterizar la métrica RTT varía en torno a $\pm 250\text{mm}$ para cada ranging. Este error es más estable cuando se tiene un FoV de 60° , fuera de este campo de visión el error aumenta considerablemente. Esto indica que el tiempo de vuelo obtenido para calcular este valor RTT no tiene una visión directa (LOS). Esto se confirma en el ángulo en que se encuentra las antenas a la hora de recoger estos valores.

Procesamientos de los datos obtenidos: Conclusión

Una vez se ha caracterizado el RTT y las funciones monopulso, se ha observado que la mejor manera de estimar la posición de un objeto y que el error sea mínimo es utilizar una función monopulso diferente, según el RTT que se reciba. Entonces se ha determinado usar el algoritmo representado en la Figura 29.

- El primer paso de este algoritmo consiste en obtener el range r estimado. Este range se obtiene cuando el protocolo FTM está en funcionamiento y el dispositivo móvil emisor envía peticiones FTM al dispositivo fijo. Este dispositivo fijo, si es compatible con este protocolo responde, con este intercambio de tramas el dispositivo móvil calcula el valor RTT y se envía al AP mediante el protocolo MQTT.
- El segundo paso de este algoritmo es la *estimación del ángulo* (θ). Para calcular este ángulo, primero se caracteriza el modelo de la función de localización empleando la técnica monopulso para diferentes ranging. En este caso, solo se caracteriza para cuatro ranging (3m, 2m, 1m y 0.5 m). Queremos ver cómo se comporta el array del sistema monopulso en la región near-field del campo del array. Para poder caracterizar esta

función monopulso se obtiene el valor RSSI de las antenas MIMO del receptor (Jocto WILD) cuando captó la trama enviada por el emisor móvil.

- El tercer paso del algoritmo consiste en determinar en qué zona del campo de radiación se encuentra este dispositivo. Si en el campo lejano o cercano. Si el ranging RTT recibido se encuentra en el área de campo cercano ($r < d_{\text{far-field}}$) se emplea la función monopulso para campo cercano que mejor precisión vaya a dar cuando se estime el DOA. El criterio para elegir una función monopulso dependerá del valor RTT leído:
 - o Sí el valor r es menor de 3 metros y mayor de 2.5 m se usa la función de localización caracterizada a 3 m.
 - o Si es un valor mayor de 1.5m y menor de 2.5 se usa la función monopulso de 2m.
 - o Si es un valor mayor de 0.8m y menor de 1.5m se usa la función monopulso caracterizada a 2m.
 - o Si son valores menor a 0.8 se usa la función monopulso de 0.5m.

Si el valor RTT se encuentra en la zona de campo lejano, es decir, $r > 3.2$ m se usa la función monopulso de campo lejano. Cuando se elige la función de localización (monopulso) basado en el RTT leído, se usa los valores RSSI para buscar en esta función monopulso a que valor corresponde. El resultado de ese acción es el valor de DOA buscado.

Con el valor r proveniente del emisor de señal y el valor DOA obtenido se puede obtener la localización del objetivo emisor (dispositivo móvil) usando coordenadas euclidianas en 2D.

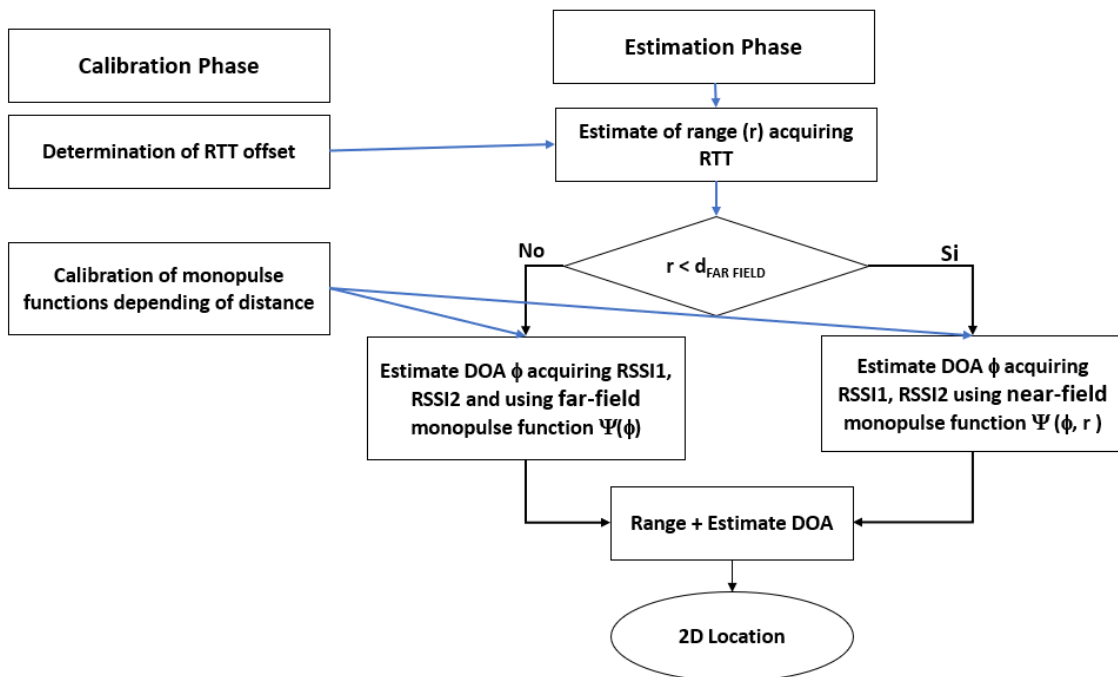


Figura 27 Diagrama de Flujo para crear el sistema de posicionamiento

3.1. RESULTADO DE LOCALIZACIÓN EN CÁMARA ANECOICA

La estimación del DOA para un conjunto de 100 muestras tiene una alta exactitud cuando la estimación se produce en un determinado rango de ángulos y cuando la función monopulso es la adecuada. Consideramos que este FOV se encuentra en el rango de $[-30^\circ 30^\circ]$. Si se intenta hacer la estimación fuera de este FoV lleva a errores como se aprecia en la Figura 29.

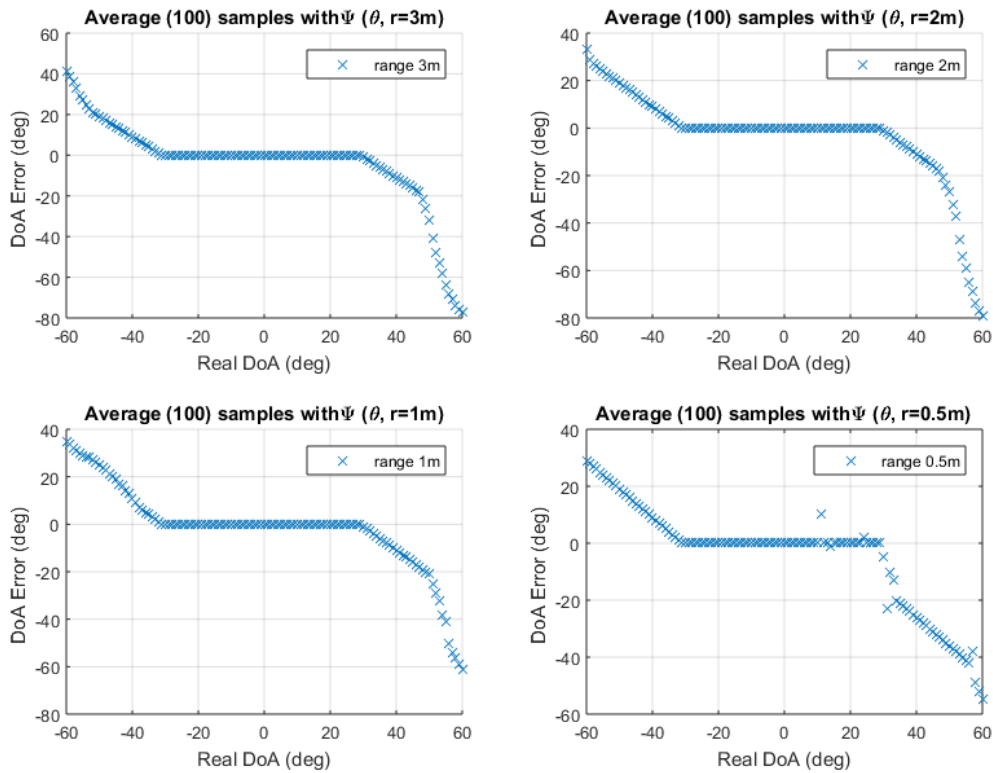


Figura 28: Error en estimación del DoA para un conjunto de 100 muestras

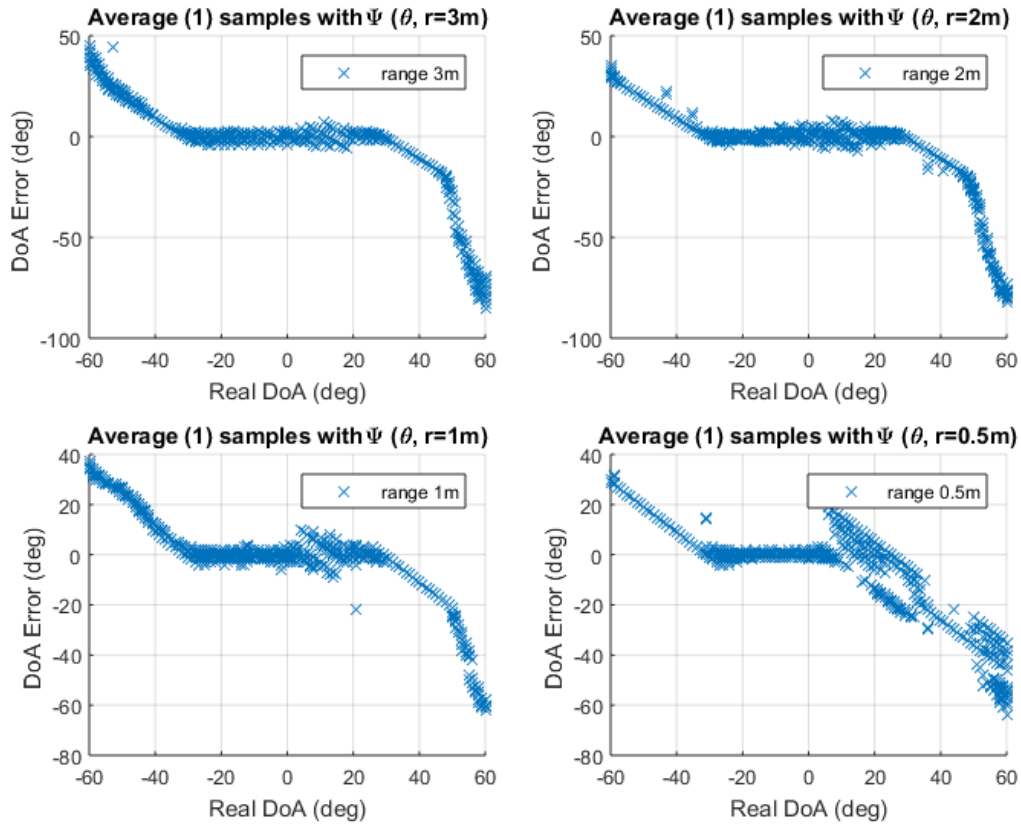


Figura 29: Error DOA para conjuntos de 1 muestras.

La gráfica con un FoV centrado en $[-30^\circ 30^\circ]$ presenta mayor precisión en la estimación del DoA que cuando se encuentra fuera de esta zona. Conforme el ranging decrece, la pendiente de la función monopulso es mayor y el FOV decrece. La precisión del DOA se centra en el interior de ese FOV.

Cuanto mayor son los datos para analizar y obtener su DOA puede conducir a error en la precisión de la dirección de llegada de la señal como se observa en la Figura 29: Error DOA para conjuntos de 1 muestras.

Se aplica el algoritmo mencionado en la Figura 27 y se obtiene los siguientes resultados para los diferentes ranging r y θ . En estas gráficas se representa el ángulo real y el estimado, el ranging real y el estimado, así como las coordenadas X,Y reales y las estimadas.

El resultado de aplicar el algoritmo a cada ranging r y para diferentes ángulos θ , se muestra en las gráficas siguientes.

En ellas se puede observar, la posición X e Y estimada con precisión, también se refleja que los datos obtenidos para RTT son bastantes parecidos a la posición donde se sitúa el dispositivo móvil.

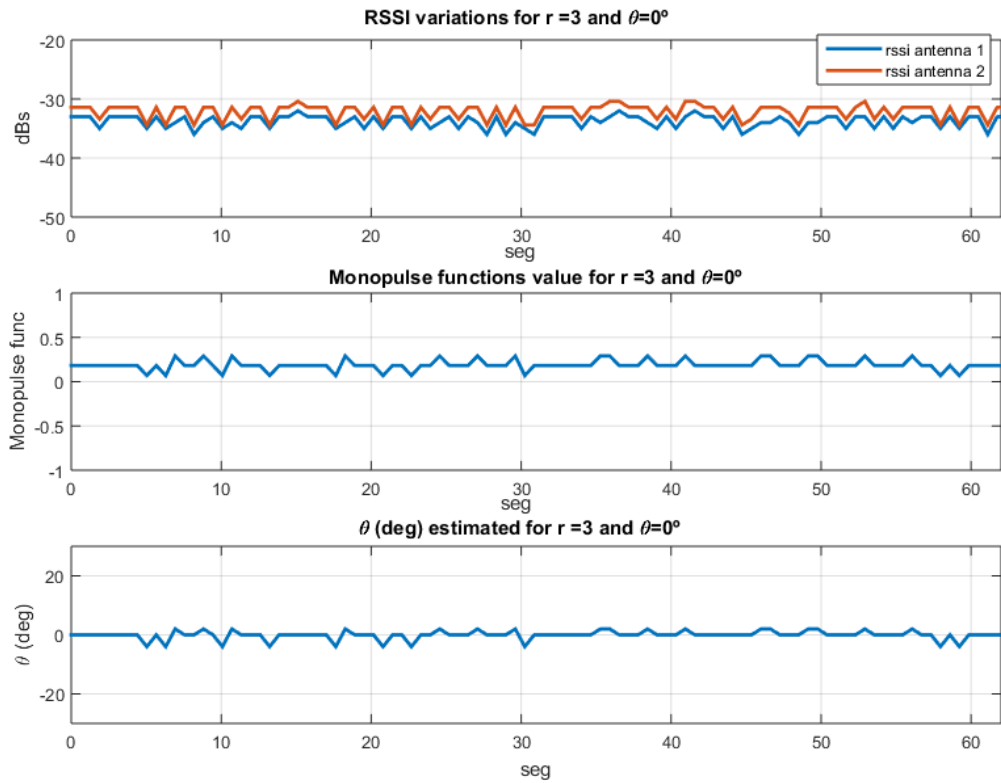


Figura 30: Características para un $r=3$ y $\theta=0^\circ$

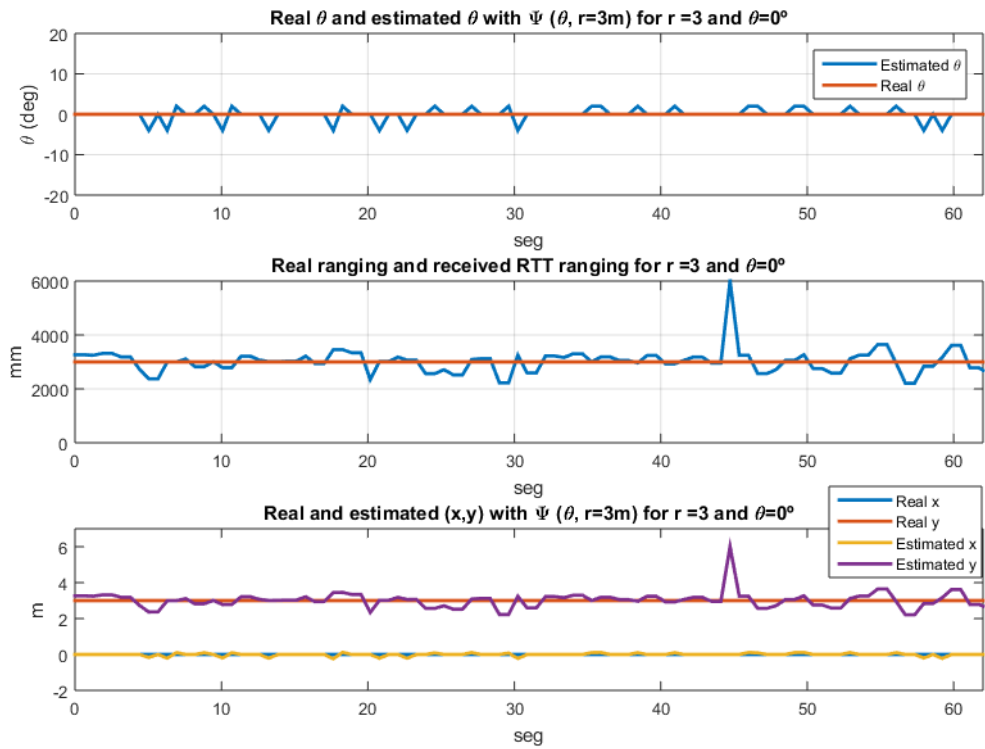


Figura 31: Resultado de aplicar el algoritmo para un $r=3m$ y $\theta=0^\circ$

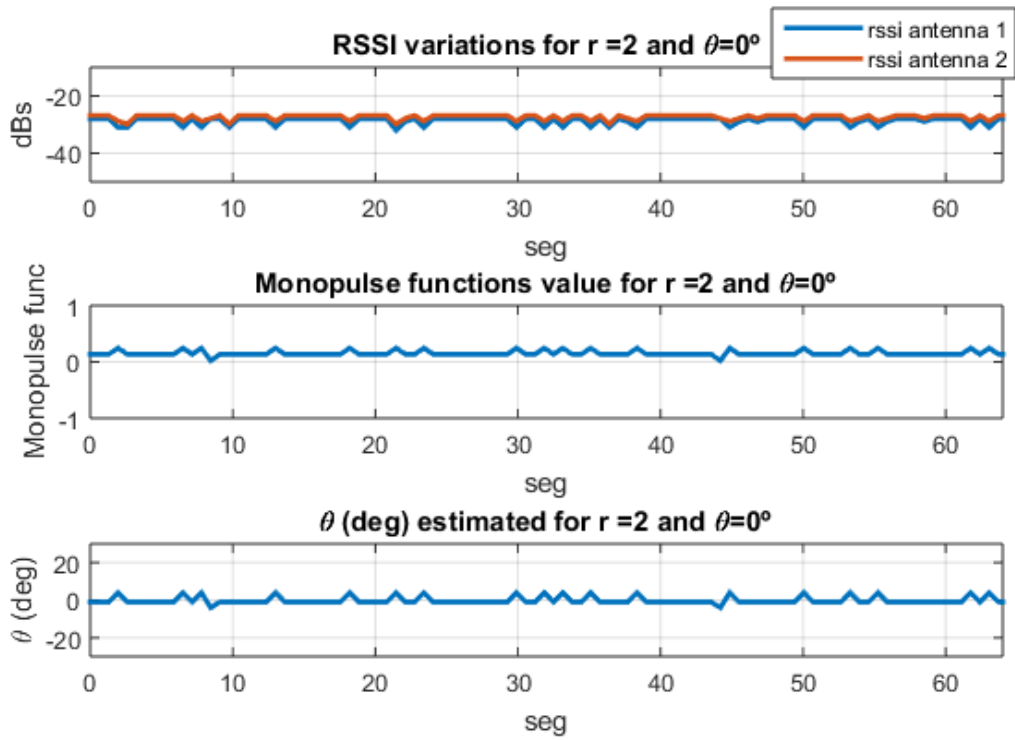


Figura 32: Características de la señal para $r=2$ y $\theta=0^\circ$

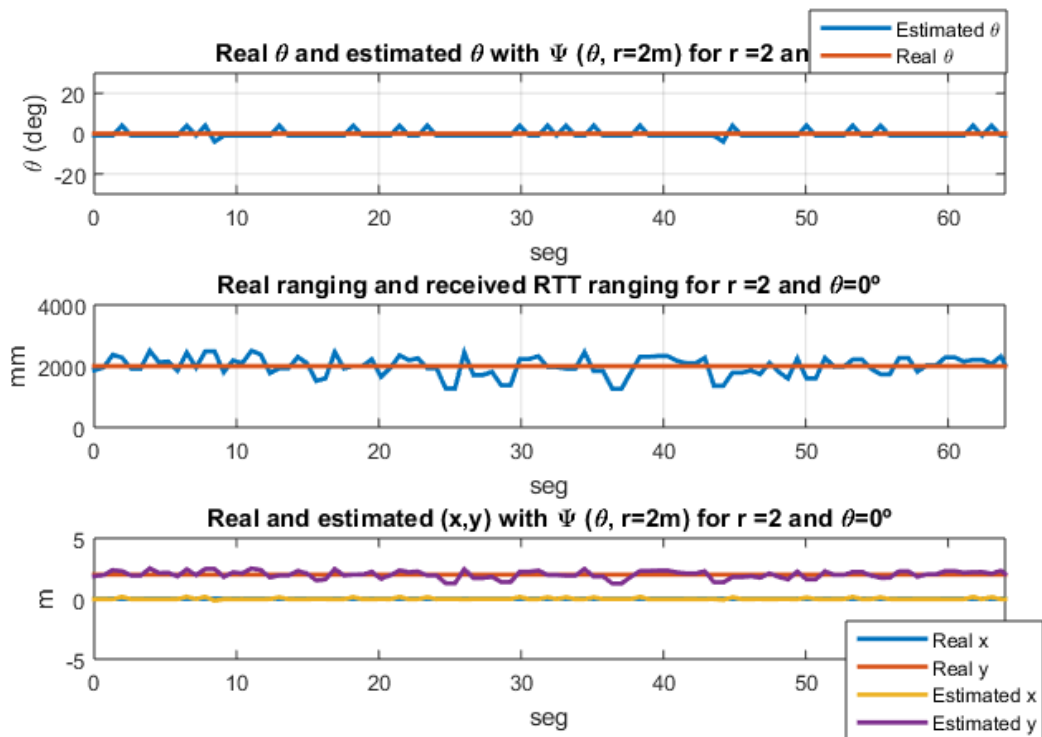


Figura 33 Resultado de aplicar el algoritmo para un $r=2$ m y $\theta=0^\circ$

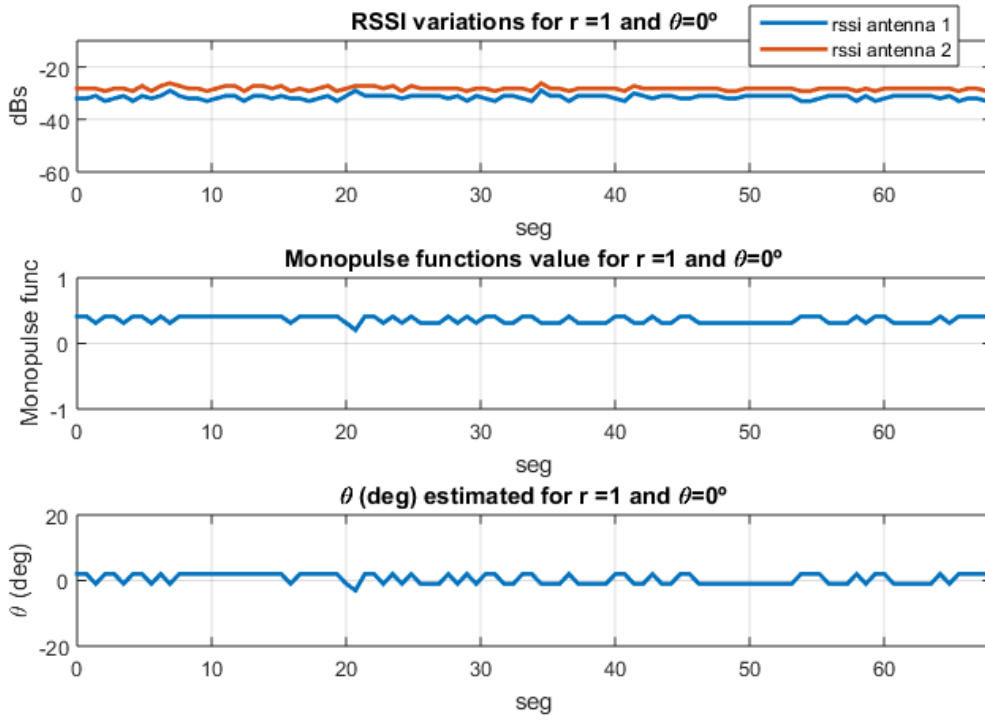


Figura 34 Características de señal con $r=1$ y $\theta=0^\circ$

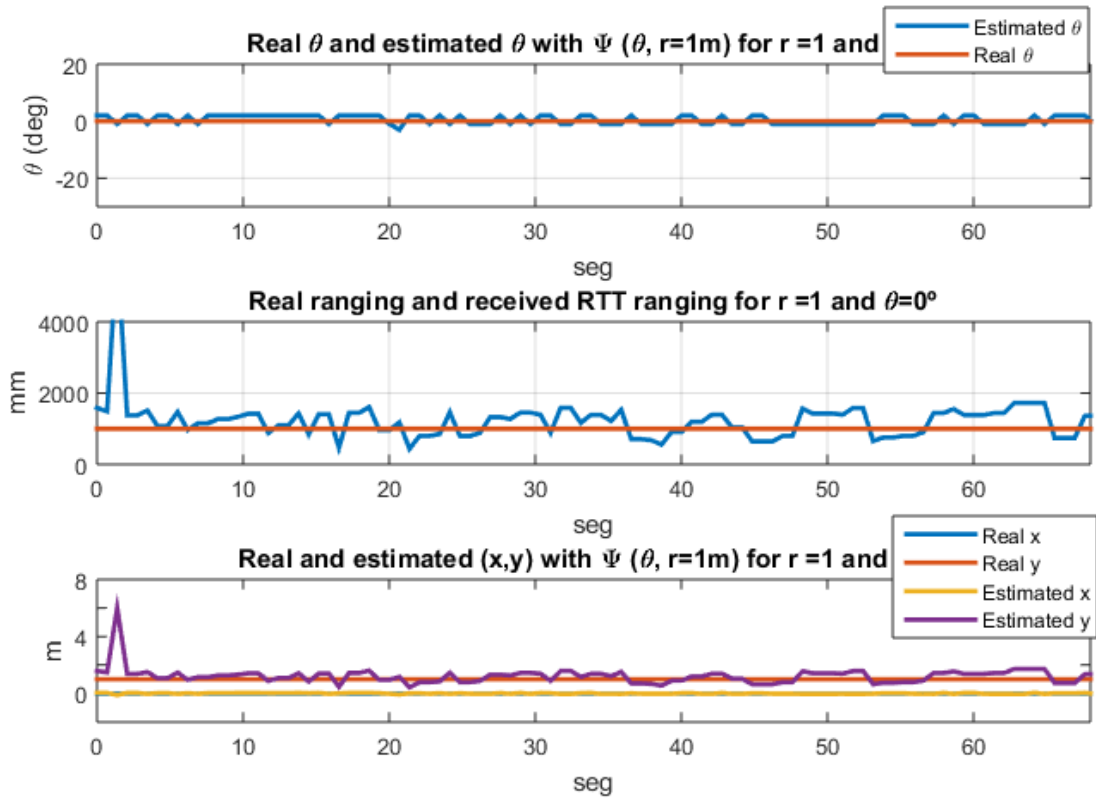


Figura 35: Resultado de aplicar el algoritmo para un $r=1$ m y $\theta=0^\circ$

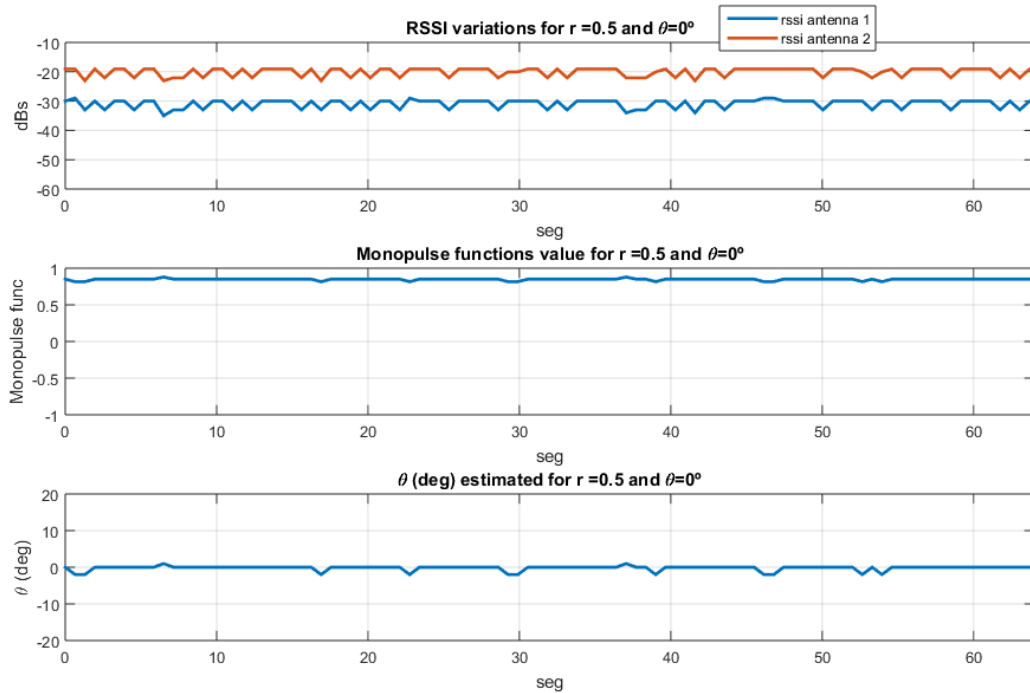


Figura 36 Características de señal recibida con un $r=0.5$ m y $\theta=0^\circ$

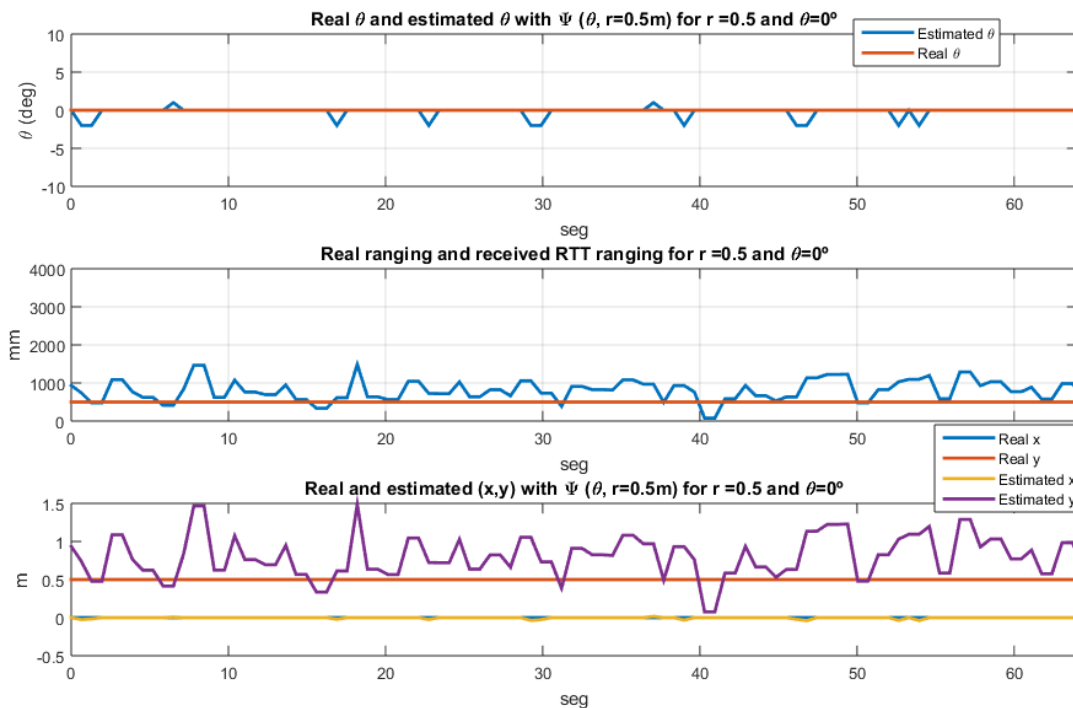


Figura 37 Resultado de aplicar el algoritmo para un $r=0.5$ m y $\theta=0^\circ$

- Para un ranging $r=3m$ y $\theta=0^\circ$, aunque haya diferencias en el nivel de potencia recibida, el sistema monopulso es capaz de estimar la dirección de llegada de forma precisa como se puede ver en la Figura 31. La posición X e Y estimada difiere poco respecto a la posición real, esta se mantiene constante cuando la dirección de llegada de la señal (DoA) es a cero grados. La estimación de la posición X e Y cuando el dispositivo móvil

se encuentra en un ranging de 3 m y una dirección de llegada de cero grados es bastante certera, por lo que el sistema tiene una alta precisión bajo estas condiciones.

- Para un ranging $r=2$ y $\theta=0^\circ$, como se ve en la Figura 33, el nivel de señal que se recibe es un poco más alto que cuando se está a un ranging de 3m, la función monopulso aunque no esté centrada en cero puede hacer una buena estimación del DOA en cero grados. El resultado de aplicar el algoritmo se muestra en la Figura 34, donde la posición X e Y estimada es un poco más variable, que con $r=3m$, pero sigue teniendo una alta precisión.
- Para un ranging $r=1$ y $\theta=0^\circ$, las características que se obtiene se ven en la Figura 35, el nivel de señal recibida es menor respecto a $r=2m$. La dirección de llegada para este ranging no se estima bien, difiere algunos grados con respecto al valor original que se tiene que recibir. Esta estimación al tener errores da lugar a que la estimación de los puntos X e Y para el ranging $r=1m$ sea mayor al punto Y real. Aunque ese error es de los ± 500 mm, la Figura 36 muestra estos valores expuestos.
- Para ranging $r=0.5m$ y $\theta=0^\circ$, los valores para los parámetros que caracterizan a la señal recogida se muestran en la Figura 37. El nivel de señal recibida difiere bastante una de otra, pero el sistema monopulso obtenido a partir de estos valores estima la dirección de llegada con bastante precisión. La posición X e Y estimada muestra que hay un error de +250mm sobre la posición X real. El sistema no es capaz de detectar bien las posiciones X e Y cuando el dispositivo móvil se encuentra a un ranging de 500 mm.

Se procede a analizar el error que se comete en la estimación de las posiciones X e Y cuando el dispositivo móvil se encuentra en direcciones DOA diferentes, pero dentro del FoV de $[-20$ y $20]$ para cada uno de los ranging anteriores.

- En el análisis hecho para ranging $r=3m$ y $\theta=\pm 20^\circ$, se observa que la función monopulso hace una estimación de la dirección de llegada de la señal bastante precisa. Los valores RTT se encuentran en el rango del ranging que se está analizando, difiere de esto, alrededor de ± 500 mm. La estimación de la posición X e Y es bastante cercano al valor real, por tanto, hay poco error en la estimación, los datos expuestos muestran una oscilación baja. Los resultados aquí expuestos se reflejan en la Figura 39.
- Para un ranging $r=2m$ y $\theta=\pm 20^\circ$, la función monopulso hace una estimación bastante precisa de la dirección de llegada de la señal. Esta precisión del DoA y los valores RTT obtenidos permiten hacer una estimación de la posición X e Y con un error de ± 500 mm respecto de la posición X e Y real. Las posiciones X e Y estimadas presentan una alta variación. Los resultados aquí expuestos se reflejan en la Figura 40.
- Para un ranging $r=1m$ y $\theta=\pm 20^\circ$, la función monopulso al hacer la estimación del ángulo de llegada de la señal para cada muestra recibida presenta una fuerte variación con respecto a la dirección real de llegada. Debido a la estimación realizada del DOA y a los valores RTT obtenidos, se obtiene una estimación de la posición X e Y algo errónea. Para el ángulo de +20 grados, se realiza una sobreestimación de la posición X e Y, en cambio para el ángulo de -20 grados se observa una subestimación.
- Para el ranging de $r=0.5m$, los resultados se muestran en la Figura 42, la función monopulso obtenida a partir de los niveles de potencia refleja valores opuestos debido a la simetría del análisis de los puntos escogidos. La precisión de la dirección de llegada de la señal presenta una ligera variación pero la estimación de este valor sigue siendo alta. En cambio, cuando se procede a calcular la posición X e Y se produce una sobreestimación, sobre todo cuando en la dirección de la señal de llegada es de +20 grados.

Cuando el FOV se encuentra en el rango de $\pm 20^\circ$, la precisión de la posición X e Y estimada presenta un error de $\pm 500mm$, y según el lado de análisis se produce una sobreestimación o subestimación.

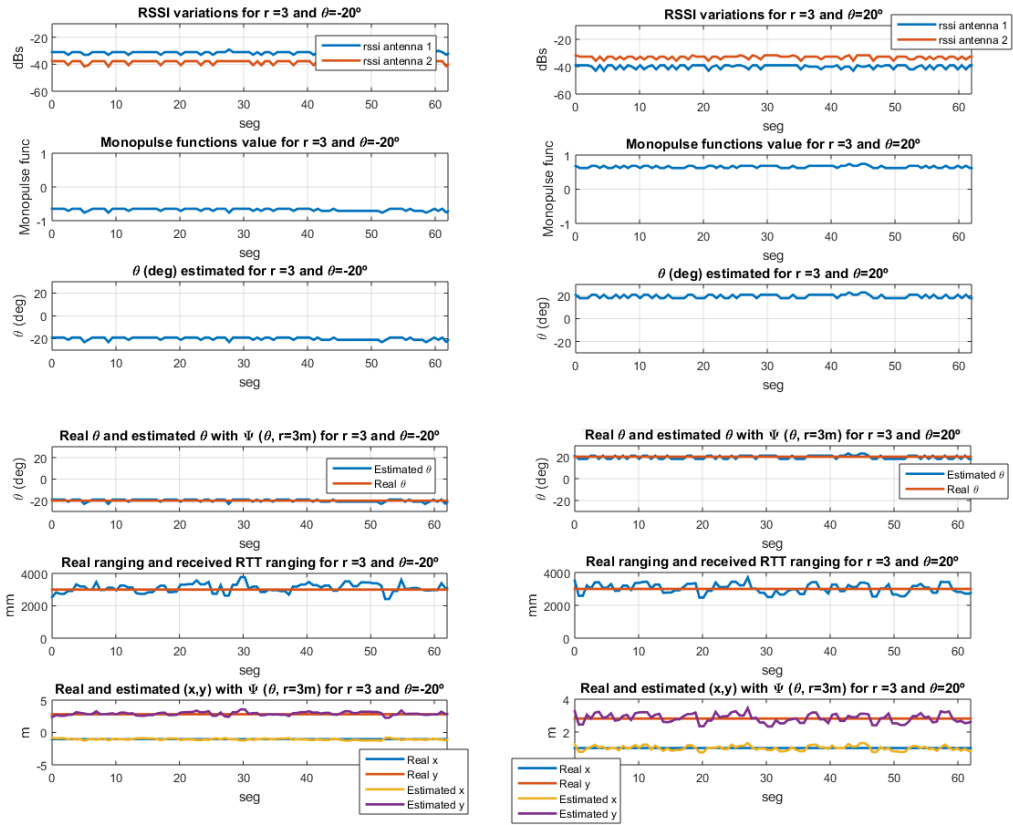


Figura 38 Datagrama para ranging=3 m, $\theta=-20^\circ$ y $\theta=20^\circ$

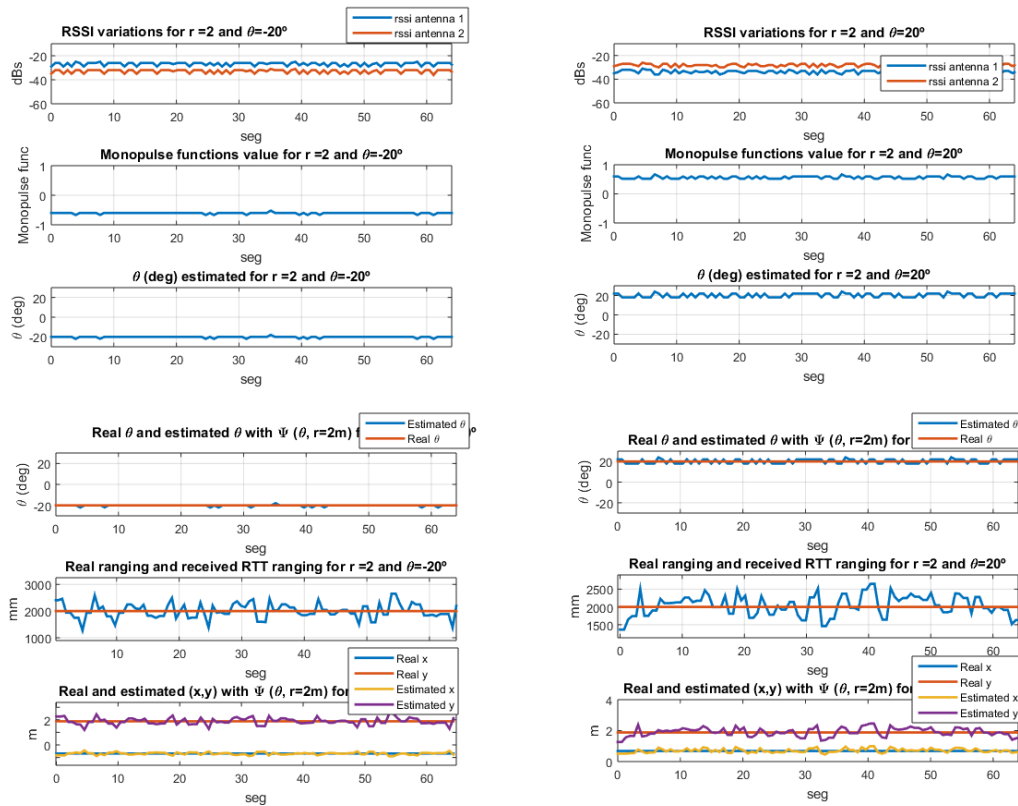


Figura 39 Datagrama para ranging=2 m, $\theta=-20^\circ$ y $\theta=20^\circ$

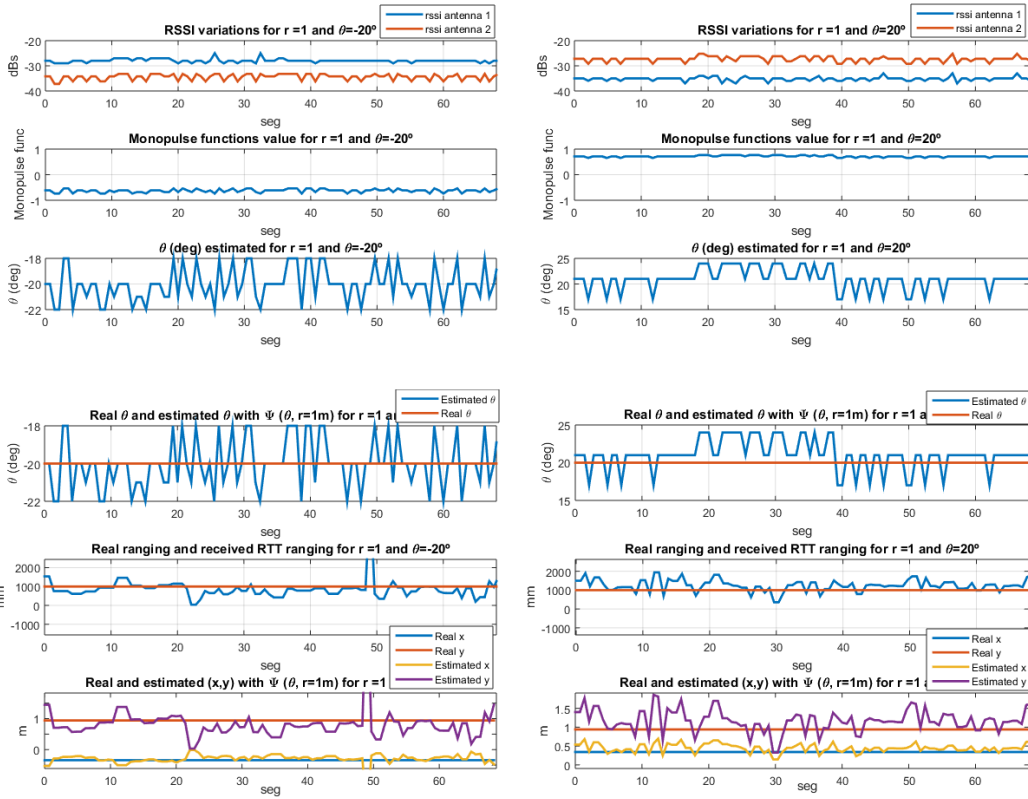


Figura 40 Datagrama para ranging= 1m, $\theta=-20^\circ$ y $\theta=20^\circ$

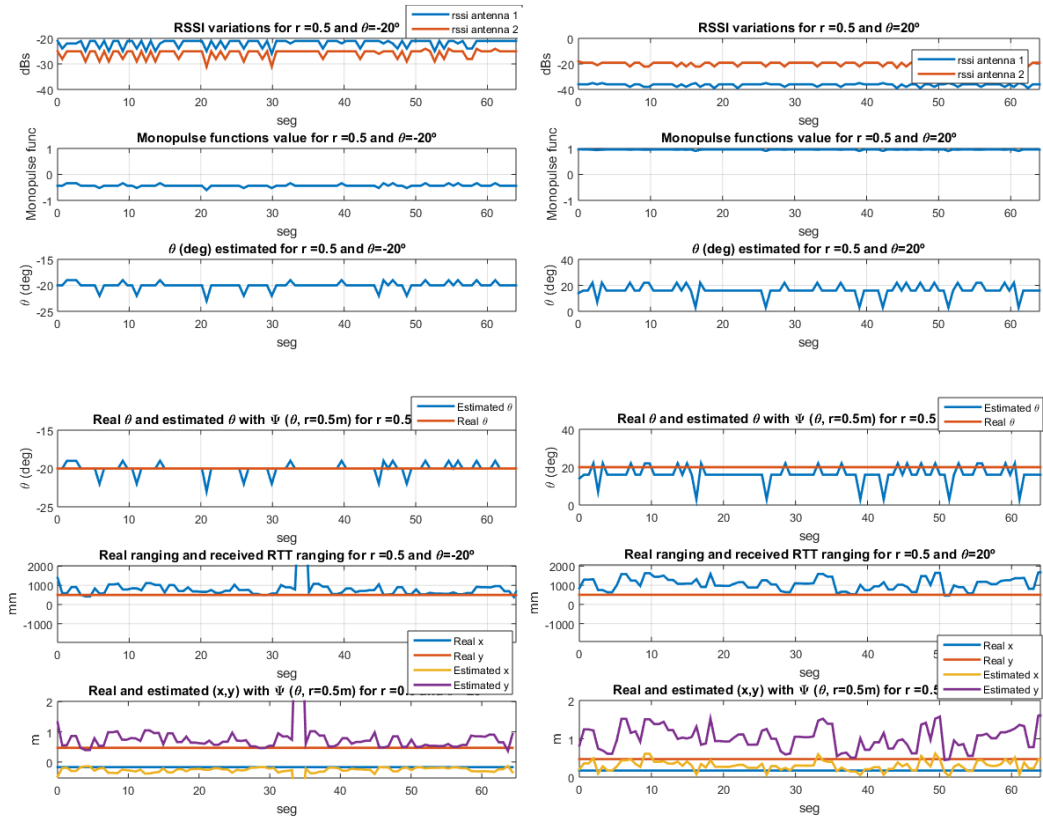


Figura 41 42 Datagrama para ranging=0.5 m, $\theta=-20^\circ$ y $\theta=20^\circ$

Para constatar que fuera del FoV se produce errores en la estimación del DOA y de la posición X e Y estimada se muestran los siguientes ejemplos. En el ejemplo de la gráfica se observa ya que estimación de la dirección de llegada de la señal es errónea al igual que la estimación de la posición X e Y no es correcta.

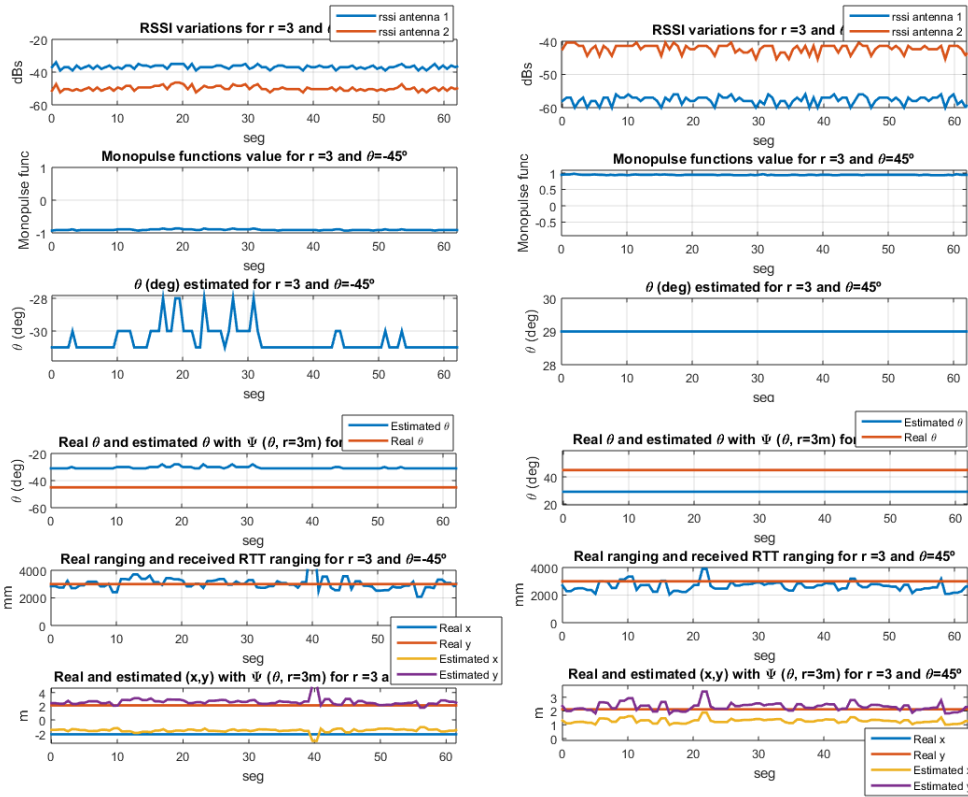


Figura 42 Ranging 3m y fuera del FOV

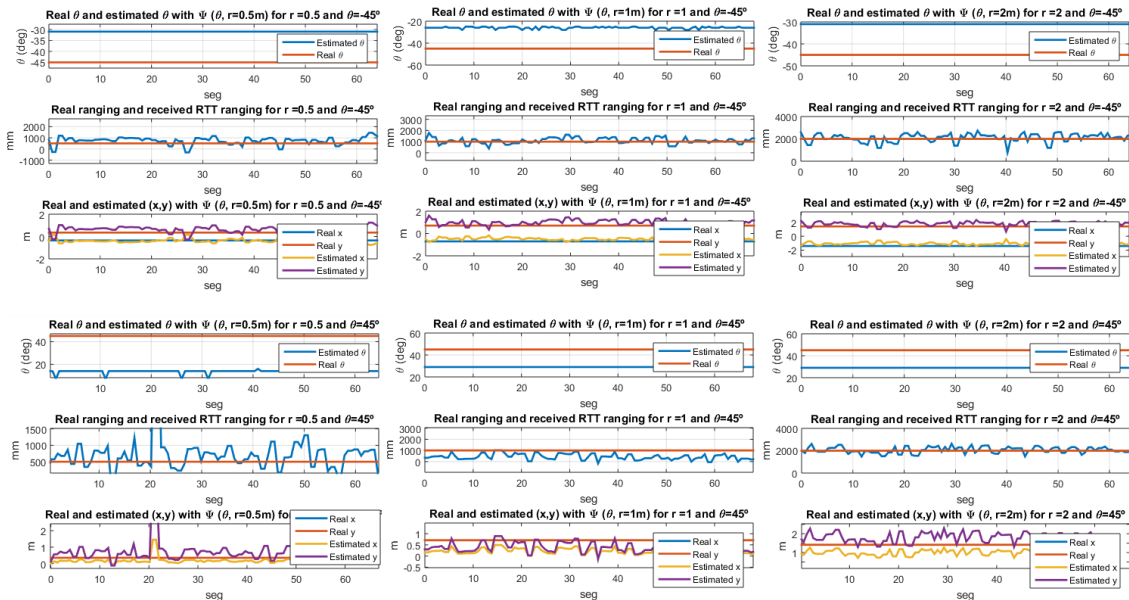


Figura 43 Ejemplo fuera del FOV y para los diferentes ranging

4. RESULTADO DE LOCALIZACIÓN EN ENTORNO REAL

4.1. LOCALIZACION PARA REALIZAR PRUEBAS

El lugar elegido para las pruebas fue en el patio de la escuela de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Cartagena. El escenario de pruebas cuenta con un amplio espacio donde se espera que haya poco multipath. Se diseñó una rejilla de 12 * 12 m. En ellos se señalaron cada uno de los puntos desde donde se recogerían muestras RTT y RSSI. En cada uno de estos puntos se adquirieron unas 100 muestras.



Figura 44 Escenario para la recogida de muestras

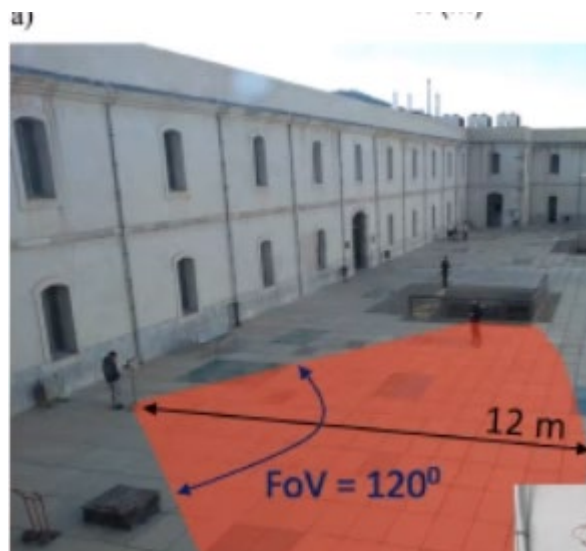


Figura 45 Delimitación de la zona de pruebas

Para realizar las pruebas en el exterior se marca en el patio de la escuela de Telecomunicaciones una rejilla de 12x12 m. Esta rejilla está formada por un total de 144 puntos. Cada punto se encuentra a una distancia de 0.625cm de ancho y 0.7m de alto. En este emplazamiento se realiza

dos tipos de recogida de datos. La prueba permite recoger datos para estimar un modelo en un entorno real. De cada punto se recoge cien muestras.

En esta prueba el AP se queda fijo en el punto 0,0 de la rejilla y es la estación móvil la que se desplaza y la dirección de emisión de la señal es fija, hacia la pared, que queda atrás de la estación fija (AP).

Para poder realizar la recogida de datos empleamos el script llamado 'medidas_rssi_camara_modificando.m'. Ponemos en funcionamiento la escucha de datos y los vamos guardando en un archivo txt.

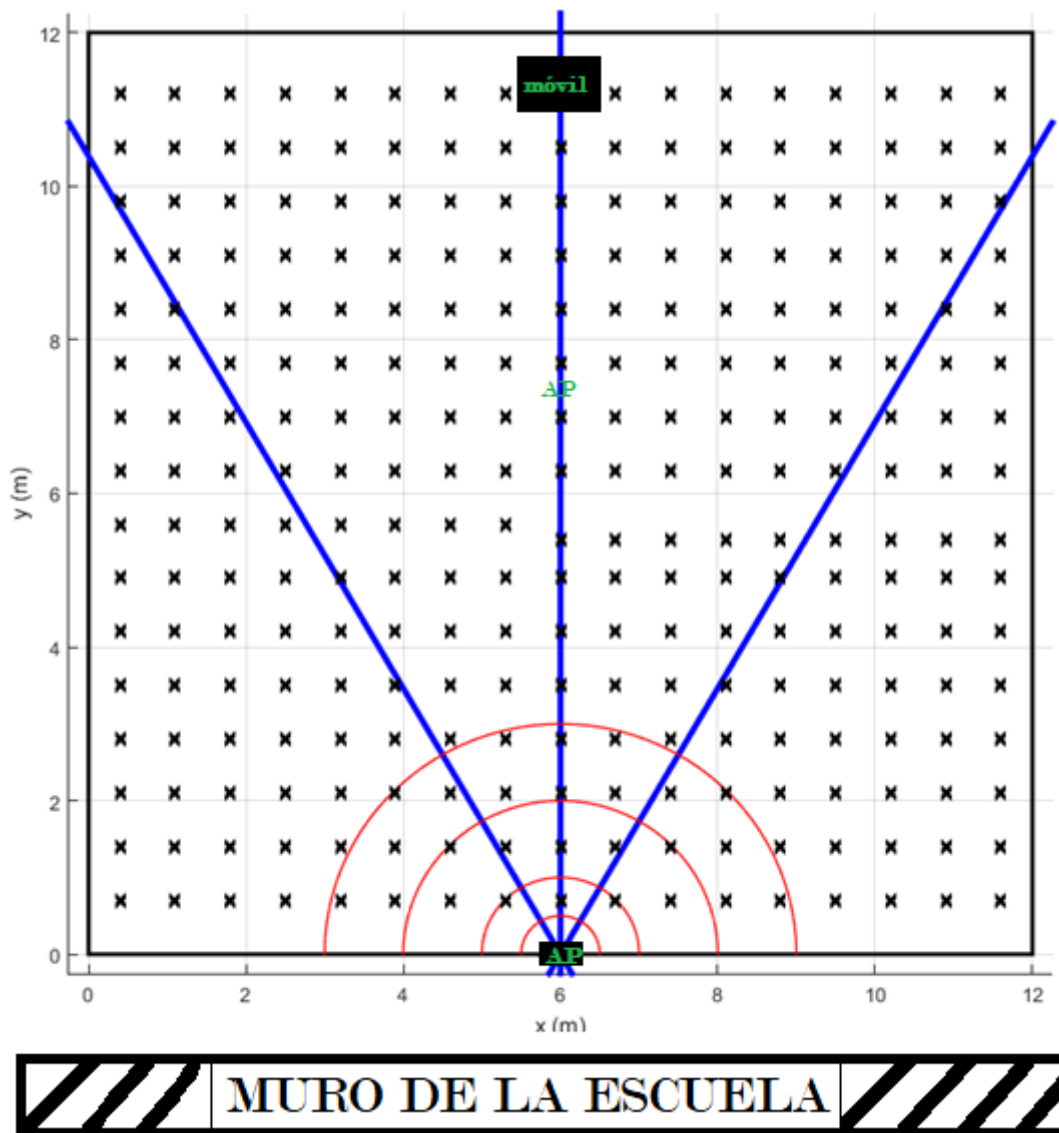


Figura 46 Colocación de los dispositivos para empezar las pruebas

4.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADO DE PRUEBA EN ENTORNO REAL

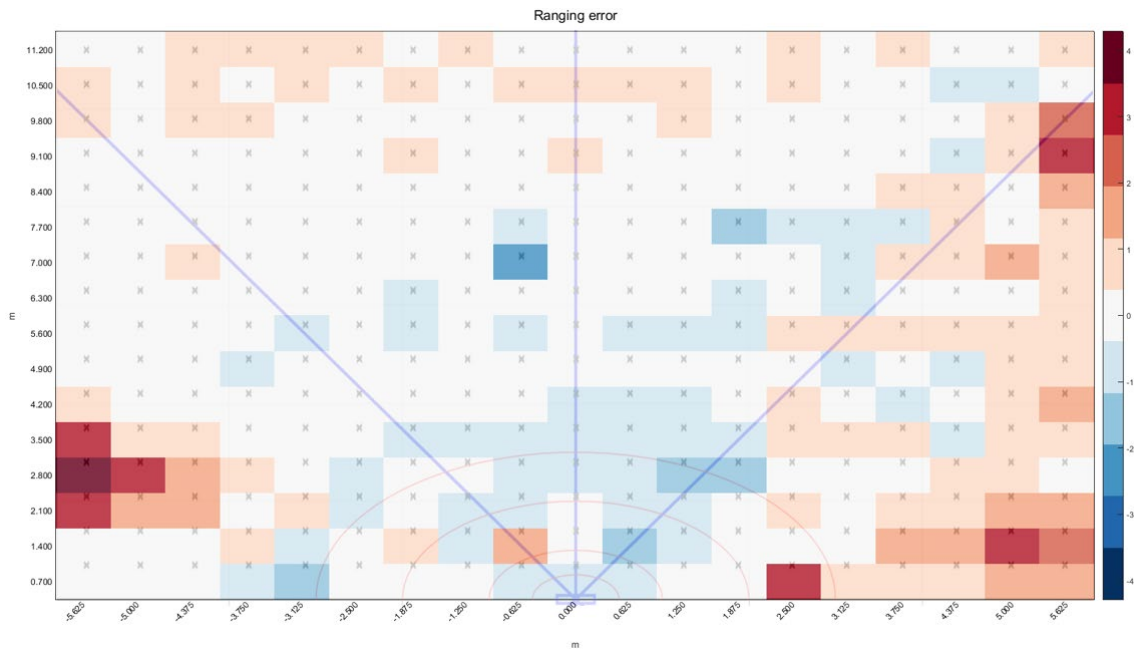


Figura 47 Error RTT en 2D

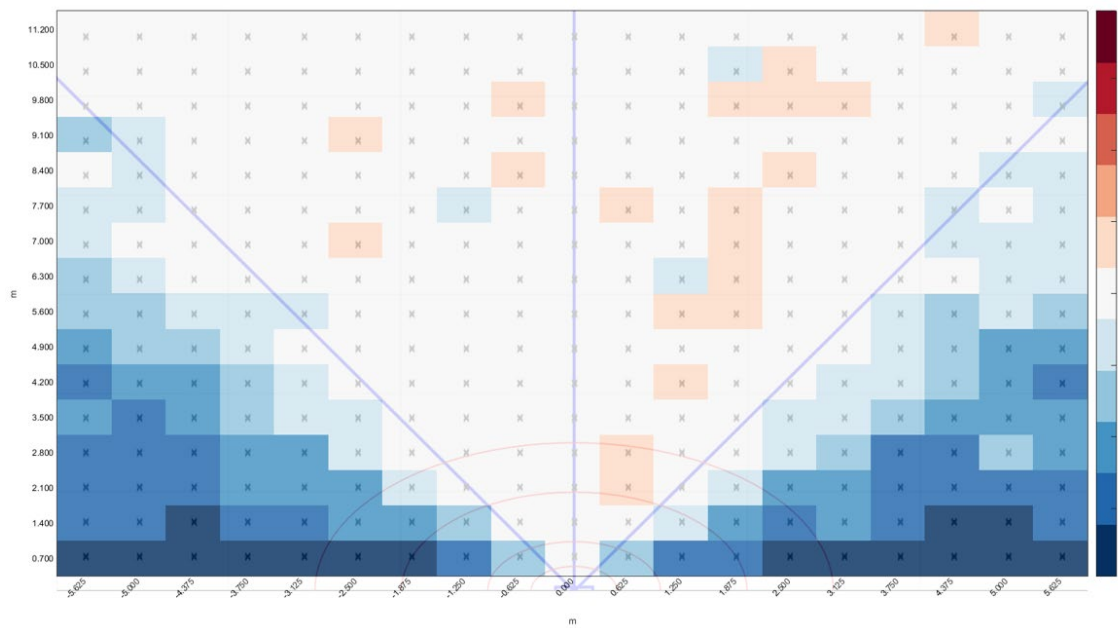


Figura 48 ERROR DOA en 2D

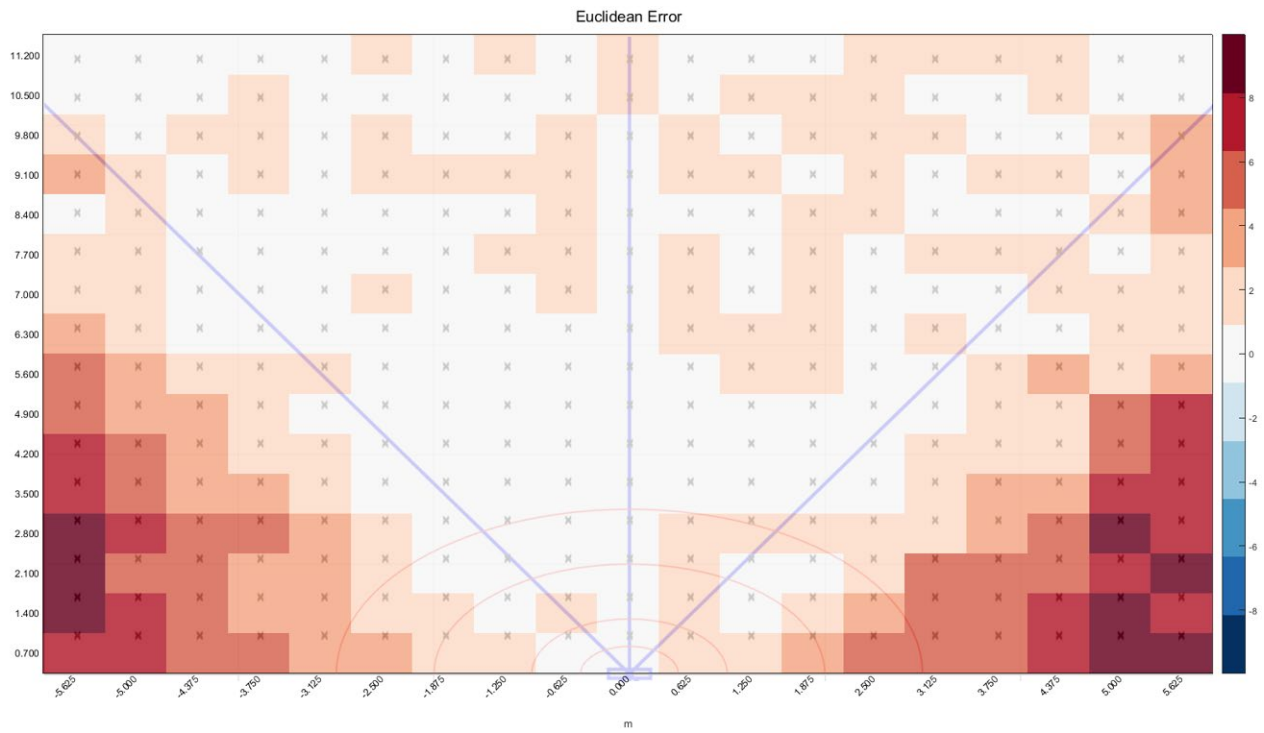


Figura 49 2D con Error en la Distancia Euclídea

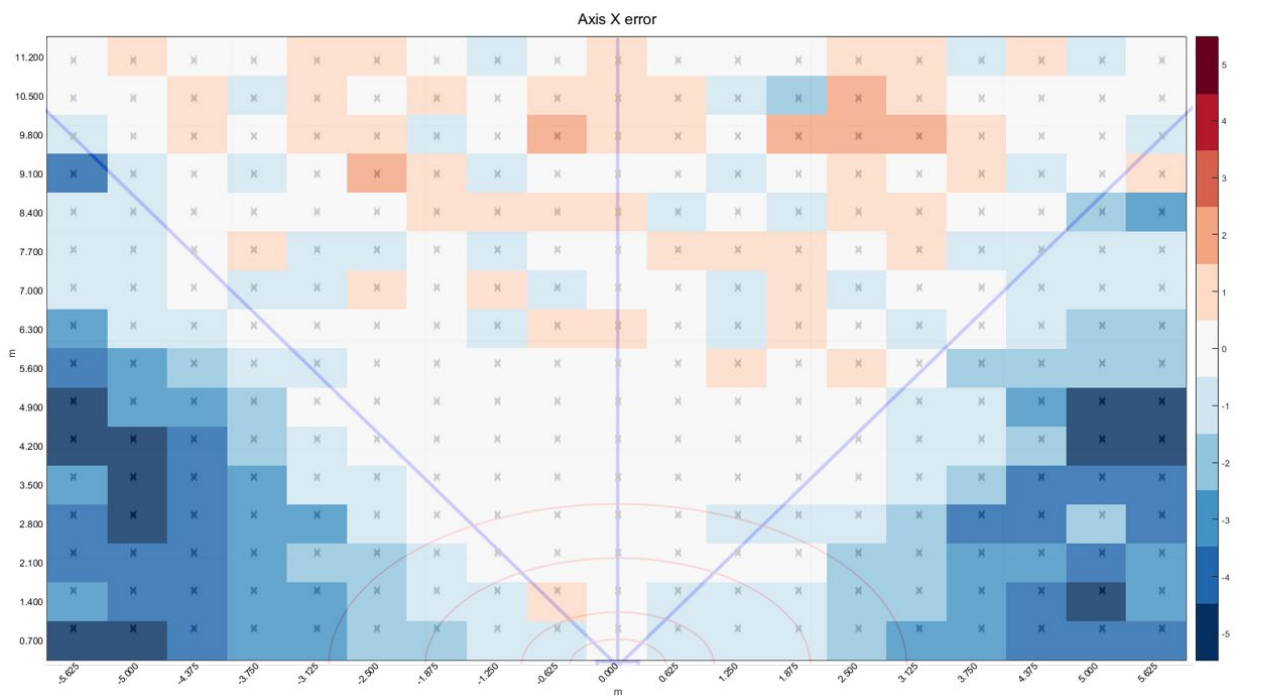


Figura 50 2D con Error en el Eje X

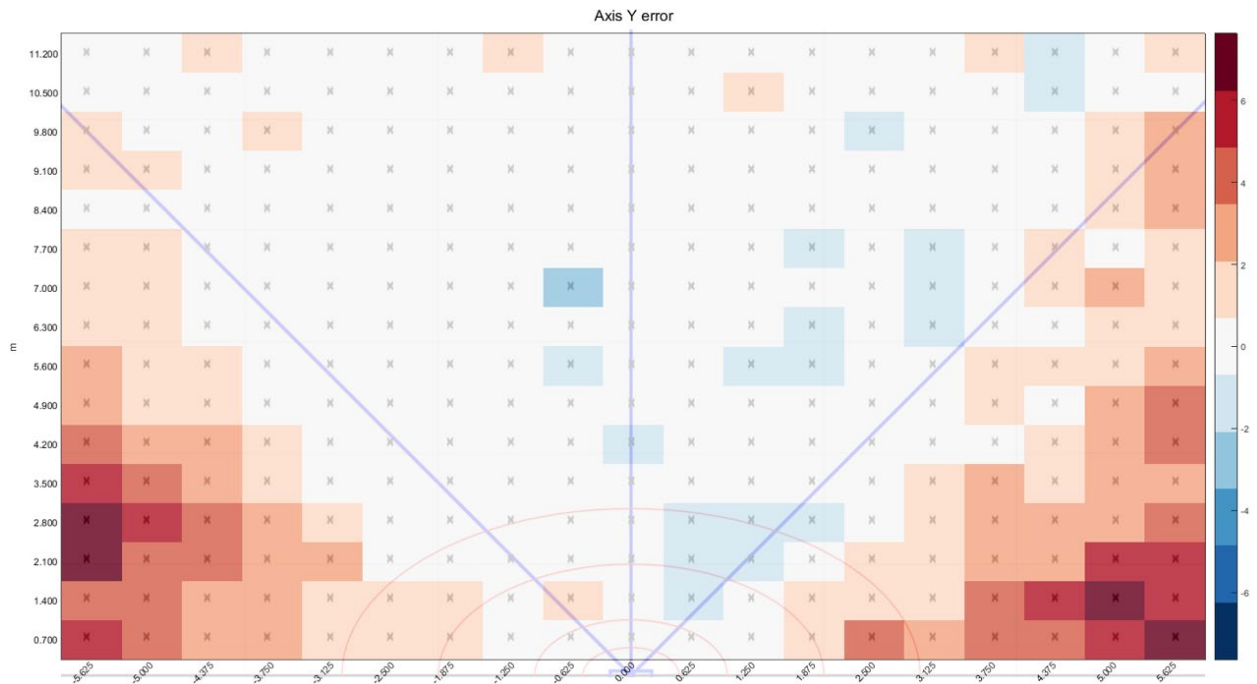


Figura 51 2D con Error en el Eje Y

Para este experimento, llevado a cabo en el entorno exterior se obtiene diferentes resultados, y estos se muestran en los diferentes mapas de calor.

El parámetro RTT recogido para cada punto de la rejilla, se obtiene un precisión alta con un error de $\pm 1\text{m}$ cuando el dispositivo se encuentra en el FOV a distancias mayores de 5000 mm. Si el dispositivo se encuentra fuera de la zona de FOV, el error cometido cuando se genera este dato aumenta hasta un valor de $\pm 4\text{m}$. Esto se debe a que el dispositivo y el dispositivo AP no tienen visión entre ellas, sino que la señal fue generada cuando el dispositivo apunta en dirección hacia la pared y no apunta en dirección del dispositivo AP. Por tanto el viaje que hace la señal cuando inicia la sesión FTM y obtiene este valor es mayor, dando como resultado valores altos. Este resultado se refleja en Figura 48.

Las funciones monopulso caracterizada para cada ranging en la cámara anecoica producen una estimación del DOA de cada punto muestreado. Se observa que cuando el dispositivo emisor de señal se encuentra dentro de la zona de FoV se tiene una alta precisión, tal y como se observa en la Figura 49.

Con los parámetros anteriores se calcula la posición X e Y, y el error al estimar estas posiciones se refleja en la Figura 50, como ya se vio en las gráficas descritas anteriormente, la precisión en el cálculo de la posición X e Y del dispositivo móvil es alta, siempre y cuando éste se encuentre dentro del FoV. En el campo cercano, la exactitud del posicionamiento del dispositivo móvil difiere en 1m.

Hay un error de ± 2 metros cuando el dispositivo móvil se mueve en dirección de las X, en los ranging superiores a 6 metros. En los puntos que son se encuentran en un ranging menor a 6 metros y dentro del FoV, el error es cero. Se aprecia esto en la Figura 51.

En el eje Y hay un menor error siempre que el dispositivo esté dentro del FoV. Este error es de $\pm 1\text{m}$, en todo el área medida.

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto era crear un prototipo de sistema RADAR WIFI usando como técnicas de localización la métrica RTT y función de localización generada por el sistema monopolso.

Mediante la realización de este trabajo se ha demostrado que la combinación de las dos técnicas, WiFi RTT y el sistema monopolso, son capaces de determinar de forma simultánea la distancia el DoA de un dispositivo IoT. En este trabajo se ha empleado un smartphone como dispositivo IoT.

El sistema creado muestra una alta precisión a la hora de estimar la posición de los dispositivos móviles que se encuentra dentro del FoV, $[-30^\circ +30^\circ]$, y se ha testeado hasta una distancia de 12 metros.

En este trabajo se muestran los resultados de la caracterización de la función monopolso en cámara anecoica y en el patio de la ETSIT de la UPCT.

6. FUTURAS LINEAS

Este proyecto se puede caracterizar para entornos interiores y exteriores con LOS y NLOS, para así terminar de caracterizar este prototipo y terminar de concluir la exactitud de la precisión que tienen estas dos técnicas a la hora de localizar el dispositivo móvil.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. L. Gomez-Tornero, D. Canete-Rebenaque, J. A. Lopez-Pastor, and A. S. Martinez-Sala, "Hybrid Analog-Digital Processing System for Amplitude-Monopulse RSSI-Based MIMO WiFi Direction-of-Arrival Estimation," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 12, no. 3, pp. 529–540, Jun. 2018, doi: 10.1109/JSTSP.2018.2827701.
- [2] Compulab, "Compulab – fit IoT," 2020. <https://fit-iot.com/web/compulab/> (accessed Mar. 08, 2020).
- [3] Compulab - Manual, "WiFi Indoor Location Device (WILD) software - fit-PC wiki." [http://fit-pc.com/wiki/index.php/WiFi_Indoor_Location_Device_\(WILD\)_software](http://fit-pc.com/wiki/index.php/WiFi_Indoor_Location_Device_(WILD)_software) (accessed Sep. 17, 2020).
- [4] A. Cía, "ASUS Shop – ROG Phone 3 ZS661KS-1A002EU - 8GB/256GB - Strix Edition." <https://eshop.asus.com/es-ES/smartphones/rog-phone-3/rog-phone-3-zs661ks-1a002eu-8gb-256gb-strix.html> (accessed Sep. 17, 2020).
- [5] M. Poveda-Garcia *et al.*, "Amplitude-Monopulse Radar Lab Using WiFi Cards," *2018 48th Eur. Microw. Conf. EuMC 2018*, pp. 464–467, 2018, doi: 10.23919/EuMC.2018.8541674.
- [6] "antenas y accesorios | para redes inalámbricas." <https://interline.pl/antennas/PANEL-14-2.4GHz?pdf=1> (accessed Sep. 11, 2020).
- [7] M. Ibrahim *et al.*, "Verification: Accuracy evaluation of WiFi fine time measurements on an open platform," *Proc. Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Networking, MOBICOM*, pp. 417–427, 2018, doi: 10.1145/3241539.3241555.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO I: CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO JOCTO WILD

Este dispositivo ha sido configurado con el software que se encuentra en [3].

Se flashea la SD y se actualiza el software e instala los paquetes que hacen falta para realizar el proyecto. Este dispositivo va a funcionar en paralelo de tres maneras:

8.1.1. MODO AP PARA RESPONDER A LAS PETICIONES DEL PROTOCOLO FTM

Se debe modificar el fichero que se encuentra en la ruta *'etc/hostapd.conf'*

El hostapd es el encargado de proveer los servicios del AP y convertir la interfaz WIFI en modo AP. Se inicia automáticamente con el arranque del sistema

Si se quiere trabajar a 2.4 Ghz la configuración es la siguiente:

```
#####..... HOSTAPD 2.4 GhZ.....#####
interface=wlan0 #### interfaz sobre la cual se emite la red local creada
driver=nl80211 #### driver que tiene el dispositivo Jocto Wild instalado
logger_syslog=-1
logger_syslog_level=2
logger_stdout=-1
logger_stdout_level=2
ctrl_interface=/var/run/hostapd
ctrl_interface_group=0
ssid=COMPULAB ##### nombre de la red inalambrica creada
hw_mode=g #####
channel=6 ##### canal de emision para esta red inalambrica
macaddr_acl=0
auth_algs=1
ignore_broadcast_ssid=0
wmm_enabled=1
wmm_ac_bk_cwmin=4
wmm_ac_bk_cwmax=10
wmm_ac_bk_aifs=7
wmm_ac_bk_txop_limit=0
wmm_ac_bk_acm=0
ieee80211n=1
ht_capab=[SMPS-DISABLED][HT40-][HT40+]
ieee80211ac=0
require_ht=0
require_vht=0
vht_oper_chwidth=0
eap_server=0
own_ip_addr=192.168.5.1 ##### red local creada para conectarse con el
smartphone
#own_ip_addr=127.0.0.1 ##### si funciona como AP, esta es la dirección IP
del dispositivo
wpa=2
wpa_passphrase=indoorlocation ### contraseña de la red inalámbrica
creada
wpa_key_mgmt=WPA-PSK
wpa_pairwise=CCMP
```

```
ftm_responder=1 ##### se debe activar para que Responda a las peticiones
FTM de cualquier cliente.
#ftm_initiator=1
```

Si se quiere modificar el canal del AP, se edita y se vuelve a **recargar el archivo** con el siguiente comando '\$ hostapd /etc/hostapd.conf' previamente se tiene que apagar la interfaz que se usará como Punto de Acceso (AP).

Para reiniciar el servicio hostapd se usa: Killall hostapd

Systemctl restart hostapd.service

Para generar direcciones IP para los dispositivos que se quieran conectar a esta red inalámbrica se usa la siguiente configuración en el archivo '/etc/dnsmasq.conf':

```
#interfaz para la escucha de peticiones DHCP y DNS
interface=wlan0

# habilita el servidor DHCP para asignar direcciones IP del rango establecido
y un tiempo de concesión
dhcp-range=192.168.5.100,192.168.5.150,255.255.255.0,12h

#deshabilitamos la resolucion DNS contra el fichero resolv.conf
no-resolv
server=8.8.8.8
server=8.8.4.4
server=192.168.55.254 ## GATEWAY DE CAJA_SEGURA
server=192.168.1.38 ## GATEWAY MY_HOME
```

Y se modifica las interfaces de red y las direcciones IP de cada una de ellas en el fichero '**/etc/network/interfaces.d**':

```
# interfaces(5) file used by ifup(8) and ifdown(8)
# Include files from /etc/network/interfaces.d:
source-directory /etc/network/interfaces.d

auto lo
iface lo inet loopback

### RED PARA CONECTARSE A CAJA_SEGURA Y TOMAR LAS
MUESTRAS
auto enp2s0
allow-hotplug enp2s0
iface enp2s0 inet static
address 192.168.55.141
```

```

### INTERFAZ EN MODO DHCP PARA QUE ADQUIERA UNA IP DE LA
RED A LA QUE SE ###CONECTE MEDIANTE CABLE RJ45.
auto eno1
allow-hotplug eno1

iface eno1 inet dhcp

### CONFIGURACION DE LA INTERFAZ PARA LA RED INALAMBRICA
###QUE SE VA A CREAR
auto wlan0
allow-hotplug wlan0
iface wlan0 inet static
address 192.168.5.1
netmask 255.255.255.0

```

Una vez se haya modificado todas las configuraciones recargamos el fichero de las interfaces de red para tener la nueva configuración usando el siguiente comando:
‘sudo /etc/init.d/networking restart’

Cuando todo está funcionando correctamente tendremos una interfaz de red con esta configuración:

```

Interface wlan0
    ifindex 4
    wdev 0x1
    addr d0:c6:37:d2:1e:a5
    ssid COMPULAB
    type AP
    wiphy 0
    channel 6 (2437 MHz), width: 20 MHz, center1: 2437 MHz
    txpower 22.00 dBm

```

Para que este AP esté en modo Responder-FTM se debe activar y esto se hace con un comando WILD. Previamente con el comando ‘ftm-role’ se averigua en que modo está y si no es el responder se elige con la opción que te da o ejecutas el comando ‘wild -mr’.

```

wild man page
NAME
    wild - set up and control the FTM device
SYNOPSIS
    Get Version:
        wild -v
    Set WILD mode:
        wild -mi : Initiator mode
        wild -mr : Responder mode
        wild -mo: FTM off mode
        wild -mg : Get current mode
    Responder mode settings:

```

```

wild -c <channel>,<bandwidth>: Set channel and bandwidth
Initiator mode commands:
wild -s : Scan responders
wild -l
    List responders and status
        E <mac> = enabled
        D <mac> = disabled
wild -e <mac> : Enable responder with given mac
wild -d <mac> : Disable responder with given mac
Ranging parameters:
wild -pd,<ms>: Define delay between ranging requests in milliseconds
wild -pb,<n> : Define ranging burst length
wild -pl,<on|off>: Enable/disable local ranging file acquisition
wild -pr,<on|off> : Enable/disable sending ranging data using curl
wild -pu,<url> : Set remote server URL.
Execute ranging:
wild -rb: Single ranging request. Returns when ranging is complete.
wild -rs : Start ranging (a burst of length as defined in pb with delay as
defined pd milliseconds) This should be non-blocking (spawn ranging
process and return immediately) Only one instance of ranging process
allowed.
wild -rq: Quit ranging (terminate ranging process)
DESCRIPTION
    WiFi Indoor Location Device (WILD) software configuration tool

```

8.1.2.SERVIDOR MQTT

```

sudo apt-get update
sudo apt-get install mosquitto: permite a un dispositivo funcionar como servidor mqtt.
sudo apt-get install mosquitto-clients : un cliente puede subscribirse o publicar un topic.

```

Configuración del Servidor MQTT:

El fichero de configuración nos permitirá modificar las características de nuestro broker. Se encuentra en `/etc/mosquitto/mosquitto.conf`:

```

# Place your local configuration in /etc/mosquitto/conf.d/
#
# A full description of the configuration file is at
# /usr/share/doc/mosquitto/examples/mosquitto.conf.example

pid_file /var/run/mosquitto.pid

persistence true
persistence_location /var/lib/mosquitto/
log_dest file /var/log/mosquitto/mosquitto.log
include_dir /etc/mosquitto/conf.d

```

Comandos necesarios para manejarlo:

- Comprobación del estado:

'\$sudo systemctl status mosquitto' ó '\$sudo service mosquitto status'

```
● mosquitto.service - Mosquitto MQTT v3.1/v3.1.1 Broker
  Loaded: loaded (/lib/systemd/system/mosquitto.service; enabled; vendor preset: enabled)
  Active: active (running)
    Docs: man:mosquitto.conf(5)
          man:mosquitto(8)
 Main PID: 610 (mosquitto)
   Tasks: 3 (limit: 4379)
  Memory: 2.6M
  CGroup: /system.slice/mosquitto.service
          └─610 /usr/sbin/mosquitto -c /etc/mosquitto/mosquitto.conf
```

- Parar el servidor

\$sudo systemctl stop mosquitto

- Arrancar el servidor

\$sudo systemctl start mosquitto

\$mosquitto -c /etc/mosquitto/mosquitto.conf -p 1883

- Hacer que mosquitto no arranque al iniciar el sistema

\$sudo systemctl disable mosquitto

- Hacer que mosquitto arranque al iniciar el sistema

\$sudo systemctl enable mosquitto

- Para publicar un topic se usa:

Mosquitto_pub -h 'ip_equipo' -t 'nombre_topic' -m 'mensaje_para_ese_topic'

- Para suscribirse a un topic se usa:

Mosquitto_sub -d -t 'nombre_topic' -v

8.1.3.SERVIDOR SSH

Para poder manejar el Jocto Wild cuando está en la cámara anecoica se hace de forma remota usando el protocolo SSH. La configuración que se ha hecho es la siguiente:

En el fichero *'/etc/sshd_config'*:

```
Port 22 #####Puerto de escucha de este protocolo
#AddressFamily any
#ListenAddress 0.0.0.0
#ListenAddress ::

ListenAddress 192.168.55.141

### IP de este equipo cuando está conectado a Caja_Segura
### esta IP debe quedarse fija o estática cuando se configure interfaces de red en el fichero '/etc/network/interfaces' #####las
#ListenAddress 192.168.1.125
### IP de este equipo cuando está conectado a My_home
```

- Se recarga la configuración anterior con el siguiente comando:

'sudo service sshd restart'.

- Para conectarse desde un equipo remoto se debe ejecutar el siguiente comando:

ssh compulab@192.168.55.141

contraseña: compulab.

8.2. ANEXO II: CONFIGURACIÓN PARA EL CONTROL DEL JOCTO WILD A TRAVÉS DE UN PC

Para la recolecta de datos se usan varios scripts. Para recoger la métrica RTT se ejecuta un script que queda en segundo plano a la escucha de estas tramas. Cada trama recibida la van almacenando en un archivo txt.

El archivo script '*obtenerRSSiap.sh*':

```
#!/bin/bash
source setCampos.sh  ## en este script tenemos la captura del formato de datos a
usar.
clear -x
echo
directorio="/home/compulab/RTT/"  ##directorio raíz para guardar la Doc del
proyecto

### ficheros necesarios para almacenar la RSSI leída, funcionan cuando no se usa
socat.

nombre="apRSSI.txt"
nameFileRSSI="RXrssi.txt"
fichDestino="$directorio$nombre"
SAVETOFILE="$directorio$nameFileRSSI"

if [ -f $SAVETOFILE ];
then
    echo ">>>> El archivo \$fichDestino: \$fichDestino SI existe"
    listado=$(ls -l | grep $nameFileRSSI)
    echo "$listado"
else
    touch $SAVETOFILE && chmod +x $SAVETOFILE
    touch $fichDestino && chmod +x $fichDestino
    listado=$(ls -l | grep $nameFileRSSI)
    echo "$listado"
fi

SAVETOFILE=$directorio"RXdata.txt"

INTER=$(awk -F "/" '/8086:24F3/&&($0=FILENAME)&&($0=$5)'
/sys/class/net/*/device/uevent)

echo "la interfaz de escucha es: $INTER"

MAC=04:d9:f5:f2:5c:1e #mac del roc phone

echo "Guardamos el resultado anterior en una variable, filtrando por \MAC=$MAC
\n"

## con esta función obtenemos la RSSI de cada antena filtrado por la MAC de
teléfono móvil.

function obtenerRSSI()
{
local camposRSSI=$(iw dev wlan0 station dump | grep -A 9 "$MAC" | grep "signal:" |
cut -d "[" -f 2 | cut -d "]" -f 1)
```

```

}

if [ -z "$camposRSSI" ]; then
    echo "El valor rssi es nulo"
fi

## Habilitación en segundo plano de mensajes MQTT, se habilita la suscripción a un
topic y los mensajes ## que reciban serán tratados a posteriori. Esta habilitación en
segundo plano se consigue usando el comando screen

killall screen
screen -dmS activarSUB ./confMQTT/activarSub.sh
screen -ls

## se envía por medio de un socket UDP los datos hacia el ordenador que los
gestionará.

IPUDP=192.168.1.7 #IP del PC
PORTUDP=1883 #puerto de escucha

## bucle que escuchará iterativamente la señal RSSI usando la función creada para
ello. Se lo pasa al #script setCampos.sh para formar la trama con el formato
adecuado y la envía al PC por medio de socat. #Socat permite crear un socket UDP.

for i in {1..10000..1}
do
    RESULTADO=$(obtenerRSSI)
    RES=$(echo $RESULTADO |./setCAMPOS.sh |cut -d " " -f 2-9 | tr -d [:blank:]
| tee socat - udp-sendto:$IPUDP:$PORTUDP)

    echo -e "\n $RES"
done
exit

```

setCampos.sh: este script forma el nuevo formato de datos que se envía al PC, este formato es el siguiente: "timestamp_sniffer, distancia_RTT, distancia_stdDevMn_RTT, numAttemptedMeasurements, numSuccessfulMeasurements, zona, rssi1, rssi2"

- Timestamp_sniffer: timestamp del frame recibido.
- distancia_RTT: valor RTT obtenido cuando se ejecuta el protocolo FTM.
- distancia_stdDevMn_RTT : cuando se ejecuta el protocolo FTM uno de los valores que también ofrece es la desviación en la estimación del RTT.
- numAttemptedMeasurements : indica la cantidad de intentos de medición de las tramas FTM realizadas.
- numSuccessfulMeasurements: indica el número de éxitos al tomar esta medida.
- rssi1 y rssi2 : son los niveles de potencia recibida en las antenas del Jocto Wild.

```

#!/bin/bash
pathFile="/home/complab/RTT/dataMQTT/datosMQTT.txt"
### fichero de almacenamiento de datos MQTT
## El formato de tramas del protocolo FTM recogido en
este fichero es el siguiente:
## timestamp_sniffer, distancia_RTT,
distancia_stdDevMn_RTT, numAttemptedMeasurements,
numSuccessfulMeasurements, zona

while read rxdata
do
    ## Se lee la última fila del archivo txt anterior y se
    coge los parametros necesarios.
    datosMQTT=$(tail -n1 $pathFile |awk -F ";" {'print $1 "," $2
    "," $3 "," $4 "," $5 "," $6'})
    ## con la siguiente linea se añade al formato anterior
    los campos RSSI1 y RSSI2
    echo "$datosMQTT,$rxdata"

done

```

activarSub.sh se encarga de poner activar un suscriptor para el topic que interesa. El contenido del script es el siguiente:

```

#!/bin/bash

#rm -f capturadosMosquitto.txt
### fichero para guardar los datos del topic al que se suscribe. En este caso
el topic se indica con -t y el nombre del topic es wifitracking. Todo lo que
llegue a este suscriptor es enviado al fichero que se encarga de almacenarlo
en $fichero. El envío lo hace el comando tee.

fichero="/home/complab/RTT/dataMQTT/datosMQTT.txt"
stdbuf -o 0 mosquitto_sub -t "wifitracking" -v | stdbuf -o 0 tee -a $fichero

```