



Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# Evaluación de un sistema de posicionamiento pasivo basado en IEEE 802.11 en zonas sin cobertura 2-way TOA

---

Proyecto final de carrera de ingeniería de telecomunicaciones  
especialidad en sistemas electrónicos.

**Autor:** Marta Malpartida Tablado

**Director:** Israel Martín Escalona

**Departamento:** Ingeniería telemática

**Fecha:** 2 de julio de 2012

## Resumen

En este proyecto se evalúa el comportamiento del algoritmo passive-TDOA en zonas de oscuridad, es decir en aquellas zonas en las que no es posible la localización del usuario utilizando el sistema 2-way TOA, al disponer de suficientes estaciones base en su zona de cobertura como para ello. Se ha modificado una herramienta de simulación, inicialmente preparada para la simulación del passive-TDOA con una única estación activa, para su evaluación con múltiples estaciones activas. Se han analizado múltiples escenarios, contemplando varios tamaños de área de simulación y número de estaciones activas, con el objetivo de reflejar condiciones a las que se podría enfrentar el sistema en un despliegue real. Por último se ha realizado un análisis de la calidad de servicio ofrecido por el algoritmo passive-TDOA en dichos escenarios, poniendo especial atención en la precisión obtenida por dicho algoritmo.

**Palabras clave:** posicionamiento en interiores, zonas de oscuridad, passive-TDOA, escalabilidad.

# Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mi tutor, Israel Martín, por ofrecerme este proyecto que ha sido un gran reto para mí. Ya que, aparte de brindarme una gran oportunidad académica durante su realización no sólo he tenido que utilizar todos los conocimientos adquiridos en la carrera sino que también me ha permitido adquirir de nuevos. Así mismo, agradecerle su paciencia, ayuda y sus consejos.

En segundo lugar, dar las gracias a toda mi familia. En especial a mis padres que siempre han trabajado y han procurado brindarme la mejor educación posible. Y a mi hermana, que junto a mis padres, ha estado celebrando conmigo las alegrías y apoyándome en los malos momentos que he vivido durante el transcurso de la carrera y de mi vida.

Finalmente, agradecer a mis amigos en especial a María, Marta, Xavier, Alex y Borja, porque siempre que les he necesitado han estado ahí para arrancarme una sonrisa y hacer desaparecer el estrés.

En definitiva, muchas gracias a todos por todo lo que me habéis aportado y demostrado estos meses, porque la realización de este proyecto no habría sido posible sin vuestro ánimo y apoyo.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>2</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>5</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>9</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>10</b>
<b>1. Objetivos</b> .....	<b>12</b>
<b>2. Introducción</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 Problemática de la localización</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2 Definición del problema</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3 Métricas</b> .....	<b>15</b>
<b>2.4 Tecnologías de la localización</b> .....	<b>15</b>
2.4.1 Cell ID .....	16
2.4.2 Multilateración circular .....	17
2.4.3 Multilateración hiperbólica.....	19
2.4.4 Fingerprinting.....	20
2.4.5 Angle Of Arrival.....	21
2.4.6 Sistema de navegación inercial .....	22
<b>2.5 Técnicas de localización</b> .....	<b>22</b>
2.5.1 Outdoors .....	23
2.5.2 Indoors .....	25
<b>3. Passive TDOA</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 Passive-TDOA en zonas de oscuridad</b> .....	<b>30</b>
<b>4. Simulador</b> .....	<b>33</b>
<b>5. Metodología y escenarios</b> .....	<b>35</b>
<b>5.1 Procedimiento de simulación</b> .....	<b>35</b>
<b>5.2 Escenarios simulados y métricas obtenidas</b> .....	<b>36</b>
5.2.1 Escenario con una estación activa .....	37
5.2.2 Escenario con dos estaciones activas .....	38

5.2.3 Escenario con cuatro estaciones activas.....	39
<b>6. Resultados .....</b>	<b>41</b>
<b>6.1 Selección de estaciones base por distancia .....</b>	<b>42</b>
6.1.1 Resultados para dos estaciones activas.....	42
6.1.2 Resultados para cuatro estaciones activas .....	51
<b>6.2 Selección aleatoria de estaciones base.....</b>	<b>58</b>
6.2.1 Resultados para dos estaciones activas.....	58
6.2.2 Resultados para cuatro estaciones activas .....	61
<b>7. Conclusiones y trabajos futuros .....</b>	<b>64</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>66</b>

# Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Dibujo de la métrica de posicionamiento ángulo.....	15
<b>Figura 2.</b> Posicionamiento utilizando Cell ID++ con una antena omnidireccional.....	17
<b>Figura 3.</b> Posicionamiento de un dispositivo con multilateración circular .....	18
<b>Figura 4.</b> Posicionamiento de un dispositivo con multilateración hiperbólica .....	20
<b>Figura 5.</b> Posicionamiento de un dispositivo con AOA .....	22
<b>Figura 6.</b> Funcionamiento del A-GPS.....	24
<b>Figura 7.</b> Ejemplos de escenarios de <i>urban canyon</i> .....	26
<b>Figura 8.</b> Funcionamiento de un sistema de posicionamiento IrDA .....	26
<b>Figura 9.</b> Funcionamiento del algoritmo passive-TDOA .....	30
<b>Figura 10.</b> Funcionamiento del algoritmo passive-TDOA en zonas de oscuridad.....	31
<b>Figura 11.</b> Diagrama de flujo del algoritmo passive-TDOA en zonas de oscuridad.....	32
<b>Figura 12.</b> Interfaz gráfica del simulador utilizado en la realización del proyecto.....	33
<b>Figura 13.</b> Diagrama de flujo del procedimiento de la simulación .....	35
<b>Figura 14.</b> Escenario con una estación activa.....	37
<b>Figura 15.</b> Escenario con dos estaciones activas.....	38
<b>Figura 16.</b> Escenario con cuatro estaciones activas.....	39
<b>Figura 17.</b> Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la <i>simulación 1</i> para el caso en que el área de simulación mide 20m de lado.....	43
<b>Figura 18.</b> Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la <i>simulación 1</i> para el caso en que el área de simulación mide 50m de lado.....	44

**Figura 19.** Gráfica de la probabilidad de filtrado en la *simulación 1* de 20m de lado . 45

**Figura 20.** Gráfica de la probabilidad de filtrado en la *simulación 1* de 50m de lado . 46

**Figura 21.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 2* para el caso en que el área de simulación mide 20m de lado..... 46

**Figura22.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 2* para el caso en que el área de simulación mide 50m de lado..... 47

**Figura 23.** Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la *simulación 1* de 20 m de lado ..... 48

**Figura24.** Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la *simulación 2* de 20 m de lado ..... 48

**Figura 25.** Comparación del error de posicionamiento de la estación activa con la pasiva en el caso de emplear un criterio de filtrado más estricto ..... 50

**Figura 26.** Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la simulación con el criterio más estricto de filtrado ..... 50

**Figura 27.** Gráfica de la probabilidad de filtrado en la *simulación 2* de 20m de lado . 51

**Figura 28.** Gráfica de la probabilidad de filtrado en la simulación con un criterio de filtrado más estricto..... 51

**Figura 29.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 1* para el caso en que el área de simulación mide 20 m de lado..... 52

**Figura 30.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 1* para el caso en que el área de simulación mide 50 m de lado..... 53

**Figura 31.** Gráfica de la probabilidad de filtrado en la *simulación 1* de 20m de lado . 53

**Figura 32.** Gráfica de la probabilidad de filtrado en la *simulación 1* de 50m de lado . 54

<b>Figura 33.</b> Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la <i>simulación 2</i> para el caso en que el área de simulación mide 20 m de lado.....	55
<b>Figura 34.</b> Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la <i>simulación 2</i> para el caso en que el área de simulación mide 50 m de lado.....	55
<b>Figura 35.</b> Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la <i>simulación 1</i> de 20 m de lado .....	55
<b>Figura 36.</b> Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la <i>simulación 2</i> de 20 m de lado .....	56
<b>Figura 37.</b> Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la simulación con el criterio más estricto de filtrado .....	57
<b>Figura 38.</b> Gráfica de la probabilidad de filtrado en la <i>simulación 2</i> de 20m de lado .	57
<b>Figura 39.</b> Gráfica de la probabilidad de filtrado en la simulación con un criterio de filtrado más estricto.....	57
<b>Figura 40.</b> Gráfica de la comparación del error de posicionamiento para el funcionamiento del sistema en media de la <i>simulación 2</i> para el caso en que el área de simulación mide 20 m de lado.....	59
<b>Figura 41.</b> Gráfica de la probabilidad de filtrado para el escenario de una estación activa en la <i>simulación 2</i> de 20m de lado .....	59
<b>Figura 42.</b> Gráfica de la probabilidad de filtrado para el escenario de dos estaciones activas en la <i>simulación 2</i> de 20m de lado.....	60
<b>Figura 43.</b> Gráfica de la comparación del error de posicionamiento para el funcionamiento del sistema en media de la simulación 2 para el caso en que el área de simulación mide 50 m de lado.....	60
<b>Figura 44.</b> Gráfica de la probabilidad de filtrado para el escenario de dos estaciones activas en la <i>simulación 2</i> de 50m de lado .....	61

**Figura 45.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento para el funcionamiento del sistema en media de la *simulación 2* para el caso en que el área de simulación mide 20 m de lado..... 61

**Figura 46.** Gráfica de la probabilidad de filtrado para el escenario de cuatro estaciones activas en la *simulación 2* de 20m de lado ..... 62

**Figura 47.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento para el funcionamiento del sistema en media de la *simulación 2* para el caso en que el área de simulación mide 50 m de lado..... 63

**Figura 48.** Gráfica de la probabilidad de filtrado para el escenario de cuatro estaciones activas en la *simulación 2* de 50m de lado ..... 63

# Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Parámetros de la simulación.....	36
<b>Tabla 2.</b> Simulaciones realizadas para el escenario de una estación activa.....	38
<b>Tabla 3.</b> Simulaciones realizadas para el escenario de dos estaciones activas.....	39
<b>Tabla 4.</b> Simulaciones realizadas para el escenario de cuatro estaciones activas.....	40
<b>Tabla 5.</b> Tabla resumen de todos los escenarios simulados.....	42
<b>Tabla 6.</b> Tabla resumen de los escenarios simulados para el comportamiento del sistema en media .....	58

# Acrónimos

<b>A-GPS</b>	Assisted GPS
<b>AOA</b>	Angle Of Arrival
<b>E-OTD</b>	Enhanced Observed Time Difference
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronic Engineers
<b>INS</b>	Inertial Navigation System
<b>LBS</b>	Location Based Service
<b>LLS</b>	Line-of-sight
<b>NLOS</b>	Non line-of-sight
<b>NMR</b>	Network Measurement Report
<b>OTDOA</b>	Observed Time Difference Of Arrival
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>RMSE</b>	Root Mean Square Error
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator
<b>RTT</b>	Round Trip Time
<b>SIR</b>	Signal to Interference Ratio
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>TDOA</b>	Time Difference Of Arrival
<b>TOA</b>	Time Of Arrival

<b>TTF</b>	Time To First Fix
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>UWB</b>	Ultra-Wide Band
<b>WiFi</b>	Wireless Fidelity
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network

# 1. Objetivos

---

El objetivo final de este proyecto es hacer un análisis del comportamiento de una tecnología de posicionamiento pasiva, denominada passive-TDOA, en situaciones en las que no se dispone de suficientes nodos de referencia como para posicionarse de forma activa. De este objetivo general se desprenden los siguientes objetivos específicos.

1. Construcción de la herramienta de simulación con la que evaluar la técnica de localización pasiva en zonas de oscuridad.
2. Evaluar los resultados obtenidos con dicho sistema en diferentes escenarios y estudiar así su comportamiento.
3. Identificar aspectos que podrían mejorar el algoritmo de posicionamiento analizado.

## 2. Introducción

---

### 2.1 Problemática de la localización

Hoy en día, los avances en la tecnología permiten a la población acceder a gran cantidad de información, como es la localización geográfica de los distintos usuarios de una red. Esta información permite que un usuario tenga acceso a servicios que pueden serle de gran utilidad.

A este conjunto de servicios de valor agregado basados en la localización del usuario se los conoce como servicios basados en localización (LBS). Algunos de estos servicios quedan descritos a continuación.

- **Servicios de información:** Éstos proporcionan la localización de un lugar en el que el usuario está interesado, como puede ser la posición de un restaurante o una farmacia cercana al lugar en el que se encuentra.
- **Servicios de navegación:** Son aquellos que guían al usuario desde un lugar de origen hasta un emplazamiento concreto. Un ejemplo de este tipo de servicios es el servicio de navegación GPS habitualmente disponible en el ámbito de la automoción.
- **Servicios de emergencia:** Permiten ubicar a una persona que está en peligro y hacerle llegar la ayuda que necesita de una forma más rápida y eficaz. Este servicio se emplea habitualmente de forma conjunta con los servicios de llamada de emergencia, como por ejemplo E-112 (Europa) o E-911 (EE.UU).
- **Seguimiento de flotas:** Este servicio se emplea para el rastreo de un conjunto de recursos, con el objetivo de optimizar su uso o cualquier parámetro derivado del mismo. Un ejemplo de este tipo de servicios es el de gestión de la posición de una flota de taxis o de camiones.

Estos servicios se pueden proporcionar en ámbitos de exterior o en zonas de interior. Para zonas de exterior existen soluciones de posicionamiento global, como GPS, que ofrecen una gran calidad de servicio (especialmente en términos de

precisión). En el caso de interiores, no hay una tecnología global que permita obtener la localización con suficiente calidad en todos los casos.

Existe una clara tendencia en el ámbito de posicionamiento consistente en aprovechar las redes de comunicaciones para el posicionamiento de los usuarios que operan en la misma. Bajo esta premisa, una de las tecnologías de comunicación con mayor despliegue en interiores es el estándar IEEE 802.11. Es por ello que gran parte de la comunidad investigadora está dedicando multitud de esfuerzos en desarrollar técnicas de localización que ofrezcan una calidad de servicio adecuada empleando para ello la infraestructura WiFi existente.

## 2.2 Definición del problema

El problema de obtener la posición involucra a tres tipos de nodos:

- **Nodos de referencia**, es decir, nodos cuya posición es conocida por el resto de nodos en la red.
- **Nodos asentados**, que son nodos con capacidades de posicionamiento que emplean un conjunto de métricas y la ubicación conocida de los nodos de referencia para obtener su posición. Una vez posicionados, los nodos asentados pueden considerarse por otros nodos como nodos de referencia.
- **Nodos sin posición conocida**, que son aquellos capaces de posicionarse con las localizaciones de los anteriores.

El objetivo de un sistema de posicionamiento es convertir tantos nodos sin posición conocida como se pueda, en nodos asentados.

En determinadas condiciones, los nodos sin posición conocida son incapaces de obtener una posición, por no disponer de suficientes recursos a su alcance. En este proyecto se analiza el comportamiento de un sistema que es capaz de acometer el posicionamiento en ese tipo de escenarios.

## 2.3 Métricas

En los sistemas de localización se pueden utilizar diferentes métricas para obtener la posición de un nodo. Las que se utilizan con mayor frecuencia se describen a continuación.

- **Potencia:** El nivel de señal recibida en el nodo a posicionar y la relación entre la señal recibida y la interferencia medida (SIR).
- **Tiempo:** Mide el tiempo de propagación de una señal entre dos nodos, o una variante de dicho tiempo de propagación.
- **Ángulo:** Mide el ángulo de llegada de una señal a un nodo, es decir, el ángulo con el que se recibe la señal transmitida desde o hacia el nodo a posicionar.

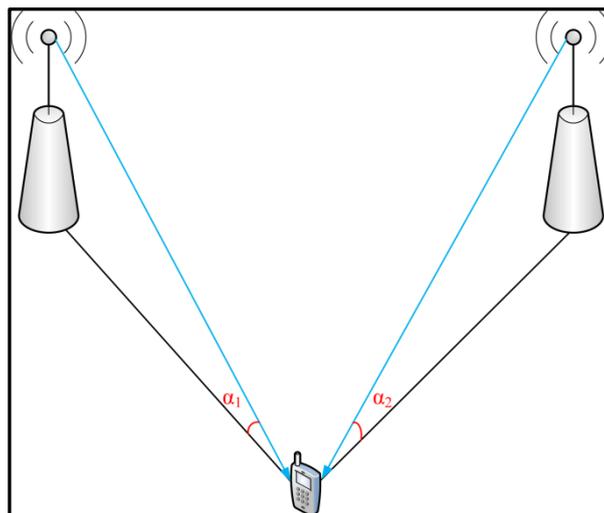


Figura 1. Dibujo de la métrica de posicionamiento ángulo.

- **Presencia/Proximidad:** Conjunto de métricas con las que se identifica el contexto del nodo a posicionar, es decir, el conjunto de elementos cercanos al nodo y que son relevantes para establecer la ubicación del mismo.

## 2.4 Tecnologías de localización

A continuación se explican algunas de las tecnologías más empleadas para localizar un nodo y que utilizan las métricas descritas en el apartado anterior.

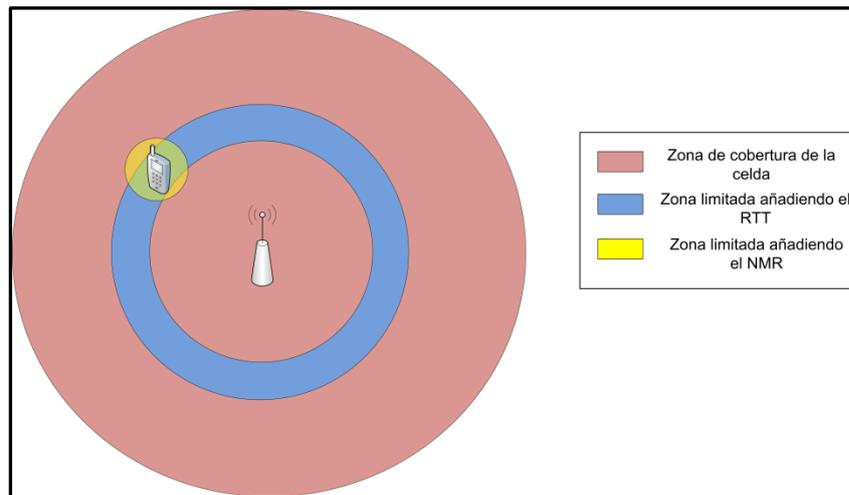
Durante las siguientes explicaciones se utilizan distintos términos para referirse al nodo sin posición de forma indistinta (nodo, usuario, dispositivo, etc.).

### 2.4.1 Cell ID

Las redes inalámbricas actuales están diseñadas de forma que dividen el área de cobertura en celdas de menor tamaño, identificadas por una transceptor (por ejemplo una estación base, un punto de acceso, etc.), y que permiten reducir el número de usuarios que atender así como ofrecer planificaciones de red avanzadas. En este caso la posición del usuario se estima por proximidad, es decir, asumiendo que coincide con la ubicación de la estación base de la celda en la que el usuario se encuentra. Todo ello redundando en una gran escalabilidad del sistema y un bajo tiempo de respuesta. Esta última característica se debe a que frecuentemente la información de la celda en la que se encuentra el usuario ya está incluida en la petición de localización (por ejemplo en UMTS) o bien es conocida por el propio dispositivo (por ejemplo en el caso de IEEE 802.11), por lo que el dispositivo a posicionar no tiene necesidad de realizar ningún cálculo. Por otra parte, la precisión del sistema es proporcional a la densidad de estaciones base en la red y al tamaño de las celdas: cuanto mayor sean las celdas y menor sea el número de estaciones base, mayor será el error de posicionamiento cometido.

Una mejora de esta tecnología es Cell ID++ [1] que utiliza el método descrito anteriormente para calcular la posición de un dispositivo, pero haciendo uso de información adicional con el que mejorar la precisión obtenida, como puede ser el tiempo que tarda la señal en ir y volver desde un usuario a una estación base, RTT (*round-trip time*), o el *Network Measurement Report* (NMR). Este último conjunto de datos permiten calcular la distancia entre el conjunto de estaciones base al alcance del usuario y éste, empleando para ello el nivel de atenuación que sufre la señal durante la transmisión. Por lo tanto, Cell ID++ es capaz de reducir el área de localización a un anillo haciendo uso de la información aportada por el RTT, para posteriormente,

tal y como se puede observar en la Figura 2, utilizar la información del NMR para limitar así el área y obtener, finalmente, la localización del usuario.



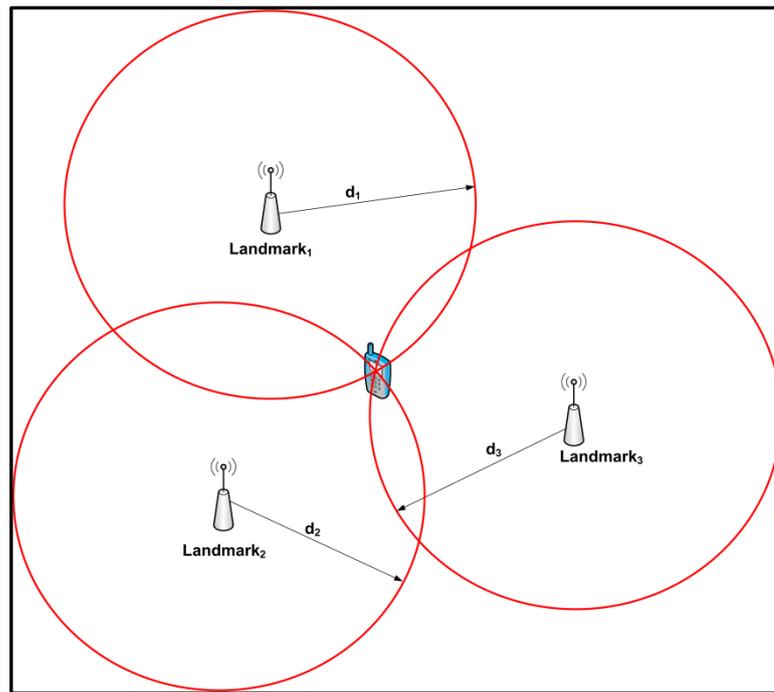
**Figura 2.** Posicionamiento utilizando Cell ID++ con una antena omnidireccional.

#### 2.4.2 Multilateración circular

La multilateración circular consiste en obtener la distancia entre las diferentes estaciones base y el nodo a posicionar, para después trazar una circunferencia cuyo radio son las mencionadas distancias y que establecen el conjunto de posibles posiciones en las que se encuentra el usuario. El punto en el que las circunferencias se entre cruzan corresponde a la posición del nodo a posicionar.

Para realizar una multilateración circular las medidas utilizadas para obtener la localización de un usuario tienen que realizarse empleando un único reloj, es decir, que todos los nodos de la red tienen que estar sincronizados.

En función de la métrica utilizada para obtener las distancias se pueden distinguir dos tipos de multilateración circular: la basada en tiempo y la basada en potencia. Los siguientes apartados se encargan de detallar cada uno de ellos.



**Figura 3.** Posicionamiento de un dispositivo con multilateración circular.

#### 2.4.2.1 Multilateración basada en tiempo

La multilateración circular basada en tiempo posiciona un dispositivo utilizando una métrica basada en tiempo. Una tecnología que utiliza este mecanismo es el Time Of Arrival (TOA). Esta tecnología estima la distancia entre nodos a partir del tiempo de propagación, medidos en uno o varios nodos a partir del tiempo de llegada de una o varias señales. La posición del dispositivo se corresponde por consiguiente con el lugar en el que se entre cruzan las circunferencias generadas por los tiempos de llegada. Por cada nodo de referencia se obtiene una ecuación que relaciona la distancia y los tiempos de transmisión ( $t_{tx}$ ) y recepción ( $t_{rx}$ ) del mensaje de la siguiente manera:

$$d = c \cdot (t_{rx} - t_{tx}) \quad (1)$$

La precisión de esta tecnología depende de la relación señal ruido (SNR) de la señal, del ancho de banda empleado, del bloqueo sufrido por la señal y del

procedimiento seguido para la obtención de los tiempos de llegada de la señal.

#### 2.4.2.2 Multilateración circular basada en potencia

Esta tecnología calcula la posición del nodo con modelos matemáticos que son capaces de predecir, teniendo en cuenta las condiciones del medio, a que distancia se encuentra el nodo a posicionar, a partir del nivel de potencia de señal que éste está recibiendo.

Un ejemplo de modelo analítico de canal es el propuesto por Okumura-Hata, que relaciona la distancia ( $d$ ), la potencia recibida ( $P_{rx}$ ), la potencia transmitida ( $P_{tx}$ ) y las pérdidas a un metro ( $P_{1m}$ ) con la siguiente fórmula:

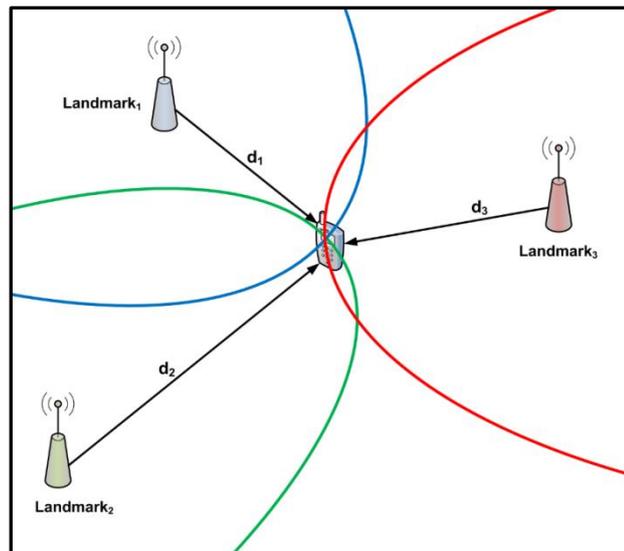
$$P_{rx} = P_{tx} - P_{1m} - 10\alpha \log_{10} d \quad (2)$$

Una particularización de dicho modelo es el propuesto por Hata [2], dirigido a frecuencias de 150 a 1500MHz que con la variación del factor de corrección ( $a(h_m)$ ) contempla la variación en el nivel de potencia que recibe el nodo a posicionar en zonas urbanas.

$$L_p(dB) = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 18.32 \log_{10} h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b) \cdot \log_{10} d \quad (3)$$

#### 2.4.3 Multilateración hiperbólica

La multilateración hiperbólica calcula la localización de un nodo midiendo la diferencia entre dos caminos seguidos por una misma señal que se origina o acaba en el nodo a posicionar y que involucra dos nodos de referencia. Estas diferencias de distancia trazan hipérbolas con las posibles posiciones del usuario, siendo el punto en el que éstas se entre cruzan la posición del mismo.



**Figura 4.** Posicionamiento de un dispositivo con multilateración hiperbólica.

La multilateración hiperbólica, como la circular, puede medir las diferencias de distancia empleando tiempo o potencia. Sin embargo, lo más frecuente en este caso es utilizar como métrica el tiempo.

La multilateración hiperbólica evita que tenga que haber sincronización entre las estaciones base y el usuario, aunque las estaciones base si que tienen que estar sincronizadas entre sí. Por lo tanto, generalmente éstas deben de tener un reloj único. Con cada diferencia de tiempos de llegada se obtiene una ecuación y el sistema de ecuaciones se resuelve de forma similar a como se procedía para el caso de multilateración circular.

#### 2.4.4 Fingerprinting

Fingreprinting es una técnica basada en la medición del los niveles de señal recibidos en el nodo a posicionar, sin que éstos tengan que tener un reflejo con la distancia que separa dicho nodo de los nodos de referencia empleados en la localización. Para su funcionamiento, en primer lugar, se construye una base de datos midiendo el nivel de potencia de la señal recibida (RSSI) de un dispositivo móvil en diferentes puntos de la zona de funcionamiento del sistema. Dichos puntos conformarán el tamiz de posibles emplazamientos del usuario y por tanto tienen que corresponderse con emplazamientos característicos y suponer un número suficiente. Una

vez creada dicha base de datos, el sistema puede ponerse en marcha. Cuando está operativa, el sistema se mide el nivel de señal recibida por el nodo a posicionar y se obtiene su localización mediante un algoritmo que se encarga de comparar los datos obtenidos por el nodo a posicionar y los previamente almacenados en la base de datos.

Los algoritmos encargados de dictaminar la coincidencia entre los datos medidos y los almacenados pueden ser de dos tipos: deterministas o probabilísticos. Los primeros utilizan un estadístico basado en el RSSI para determinar la posición física. Un ejemplo de ello es el algoritmo que compara el valor medido de potencia con los almacenados en la base de datos y determina que la posición del nodo es aquella cuyo valor de RSSI en la base de datos más se aproxima al medido. Por otro lado, los algoritmos probabilísticos tienen en cuenta, además del RSSI, otros elementos que influyen en la propagación de la señal, como la temperatura o el movimiento de las personas en el momento de calcular la posición, obteniendo de esta forma mucha más precisión.

#### 2.4.5 Angle Of Arrival (AOA)

El angle of arrival determina la posición a partir de los ángulos de llegada que forma la señal que se envía desde los nodos de referencia al nodo a posicionar o viceversa. La principal ventaja de esta tecnología de posicionamiento es que son necesarios pocos nodos para poder determinar la posición (ej. 2 nodos de referencia son suficientes para un posicionamiento en 2 dimensiones) y que no es necesaria la sincronización entre ellos. Su principal desventaja es que el hardware empleado para medir la dirección de la señal (ej. arrays de antenas ) es complejo y frecuentemente costoso. Así mismo, la precisión de la medida aumenta con la distancia, debido a la apertura angular, tal y como se muestra en la Figura 5. Habitualmente, los sistemas de detección del ángulo de llegada hacen uso de información de la distancia que separa a los elementos involucrados, reduciendo todavía más los requerimientos en términos de nodos de referencia.

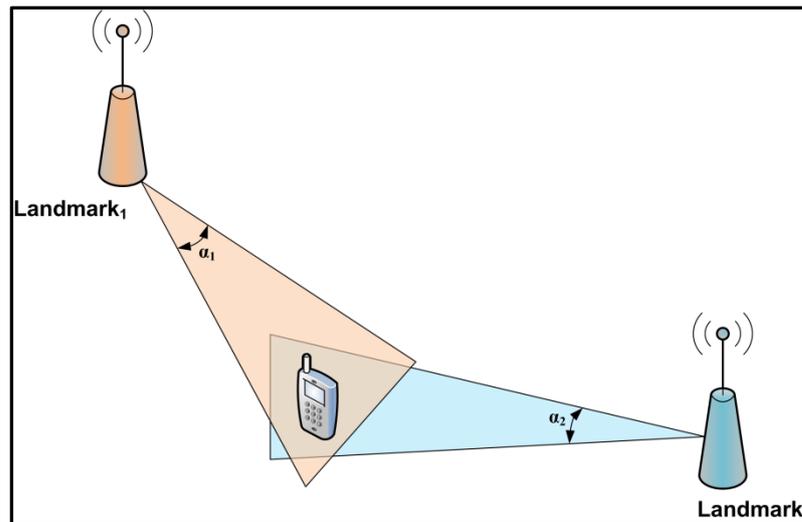


Figura 5. Posicionamiento de un dispositivo con AOA.

### 2.4.6 Sistema de navegación inercial (INS)

Un sistema de navegación inercial (INS) obtiene el posicionamiento a partir de la información ofrecida por un conjunto de sensores inerciales, habitualmente acelerómetros y giróscopos. Los primeros miden la aceleración lineal y los segundos miden la velocidad angular. Con estos datos el INS es capaz de determinar la posición, la velocidad y la dirección del dispositivo.

Hay que tener presente que el funcionamiento del sistema depende de una correcta estimación de las condiciones iniciales y que al error de ésta se añadirán los errores introducidos por los propios sensores inerciales.

## 2.5 Técnicas de localización

Las técnicas de localización se pueden clasificar según el medio en el que realicen el posicionamiento. Según este criterio se pueden clasificar en dos grandes grupos: escenarios de exterior (outdoors) y escenarios de interior (indoors). Las siguientes secciones describen las principales técnicas de localización empleadas en dichos entornos.

## 2.5.1 Outdoors

Las técnicas que se describen a continuación son aquellas que operan en el exterior, es decir, al aire libre.

### 2.5.1.1 Posicionamiento por satélite

El posicionamiento por satélite hace referencia a aquellas técnicas que utilizan satélites que orbitan alrededor de la tierra. Actualmente, los principales sistemas de posicionamiento basados en satélite son el sistema de posicionamiento global (GPS), Galileo y GLONASS.

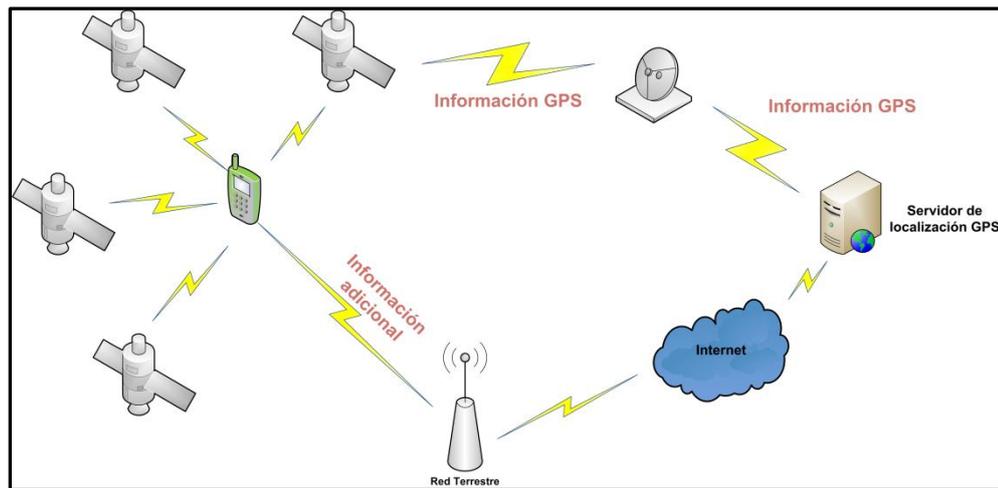
El GPS [3] agrupa un grupo de tecnologías de posicionamiento que utiliza los satélites de la red NAVSTAR para localizar las estaciones móviles. En esta red, todos los satélites están perfectamente sincronizados.

Para el posicionamiento con GPS, dado que emplea TOA, son necesarios al menos tres satélites para una posición 3D y dos para la 2D. Pero, dado que generalmente el reloj del dispositivo a posicionar no tiene la misma precisión que el de los satélites es necesario un satélite más para sincronizar el reloj del usuario y poder obtener la localización.

No obstante, aunque la tecnología GPS tiene una alta precisión y una excelente cobertura espacial presenta algunas limitaciones. Una de ellas es el tiempo que tarda el terminal a posicionar en cargar los mapas y en poder hacer las solicitudes de localización (Time-to-first-fix o TTFF). Este retardo puede llegar a ser de hasta 12.5 minutos. Así mismo, el sistema GPS requiere de visión directa entre el terminal y los satélites. En consecuencia, tiene un mal funcionamiento en núcleos urbanos muy densos y en interiores.

Para solventar estos problemas existen tres técnicas de localización GPS que hacen uso de las redes inalámbricas terrestres para ayudar en el posicionamiento de los usuarios. La primera de ellas es el GPS diferencial, que utiliza la información recibida de los satélites en posiciones ya conocidas para poder corregir las medidas obtenidas en posiciones

desconocidas y obtener así una mayor precisión. También, en interiores se usa el Indoor-GPS que se ayuda de información procedente de redes terrestres con el objetivo de poder mejorar la sensibilidad del receptor GPS. Finalmente, el GPS asistido (A-GPS) normalmente utiliza información adicional como la predicción de la órbita de los satélites para disminuir el TTFF.



**Figura 6.** Funcionamiento del A-GPS.

GLONASS [4] es un sistema de posicionamiento desarrollado por el gobierno ruso, formado por 24 satélites. Para posicionar al usuario, como en el caso del GPS, son necesarios por lo menos tres satélites para poder realizar una multilateración circular y obtener una posición 3D. Pero, como se ha mencionado anteriormente, por lo general el reloj del usuario no está sincronizado con el de los satélites y es necesario un cuarto satélite para obtener la localización en 3D.

Finalmente, Galileo [5] es un sistema que está en desarrollo por la Unión Europea y se espera que al utilizar satélites que transmitirán señales a más potencia que las utilizadas por GPS, éstas se detecten mejor por el dispositivo a posicionar. Es decir, que se obtenga menos error en su localización y permita su uso en un conjunto de escenarios mayor.

### 2.5.1.2 Sistemas basados en las comunicaciones móviles celulares

Este sistema de localización comprende un conjunto de técnicas que se basan en aprovechar las redes de comunicaciones móviles para posicionar dispositivos móviles que operan en ellas. Son varias las técnicas permitidas en este tipo de redes [6]. La más simple es el Cell ID, con lo que la localización del usuario a posicionar sería la de la estación base que le está dando cobertura. En este caso el error de posicionamiento sería mayor en zonas rurales que en núcleos urbanos, dado que en ellas las celdas son de mayor tamaño.

Otras técnicas, más elaboradas son las basadas en multilateración. En este grupo se enmarca el Enhanced Observed Time Difference [7] (E-OTD), que consiste en posicionar el dispositivo móvil midiendo sólo el tiempo de bajada y utilizando TOA o TDOA para realizar la multilateración circular o hiperbólica basada en tiempo. Otra técnica que se utiliza para posicionar en comunicaciones móviles es el Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA) [8]. Ésta es similar a la anterior pero utiliza TDOA para hallar la posición.

Así mismo, se pueden implementar tecnologías relacionadas con la potencia de señal recibida como el fingerprinting [9]. No obstante, ésta, a diferencia de las expuestas anteriormente, no está incluida en los estándares recomendados por los organismos competentes para su uso en redes de comunicación móvil celular.

### 2.5.2 Indoors

Las técnicas de localización Indoor son aquellas que se utilizan en espacios de interior o con grandes dificultades a nivel de recepción de señal, como por ejemplo el escenario de *urban canyon* [10].



Figura 7. Ejemplos de escenarios de *urban canyon*.

### 2.5.2.1 Sistemas de posicionamiento IrDA

Estos sistemas utilizan dispositivos con infrarrojos. En consecuencia, los dos dispositivos, el que realiza la localización y el que tiene que posicionarse, tienen que estar en visión directa. El dispositivo a localizar, como se puede observar en la Figura 8, emite un código identificativo de forma periódica por el transmisor de infrarrojos y se posiciona mediante la tecnología Cell ID [11]. Por lo tanto, la precisión del sistema se limita a la habitación en la que se encuentran los dispositivos.

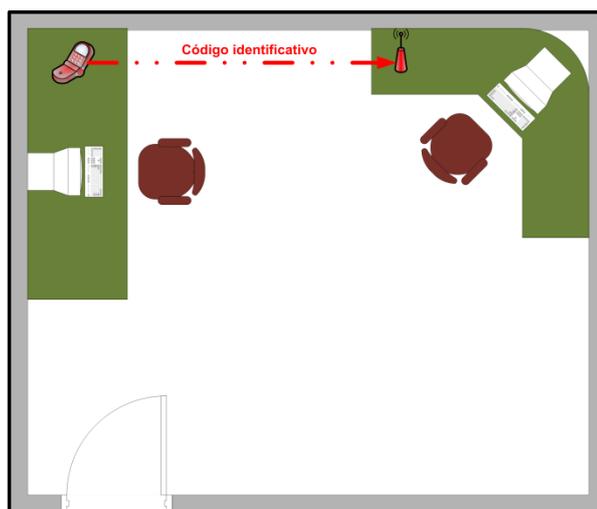


Figura 8. Funcionamiento de un sistema de posicionamiento IrDA.

### 2.5.2.2 Sistemas de posicionamiento con ultrasonidos

En las técnicas de posicionamiento con ultrasonidos [12] se envían señales del espectro de frecuencias que no son apreciables por el oído humano. Para posicionar un nodo con esta técnica se utilizan las tecnologías TOA y TDOA, descritos anteriormente. Igual que en la técnica anterior, tanto el nodo transmisor como el receptor tienen que estar en la misma habitación dado que las señales de ultrasonidos no son capaces de atravesar paredes. Sin embargo, en este caso no es necesaria la visión directa para que los dispositivos reciban la señal correctamente. Esta técnica tiene como ventaja que es inmune a las interferencias electromagnéticas.

### 2.5.2.3 Ultra-Wide Band (UWB)

Ultra-Wide Band representa una tecnología de comunicación en la que cada señal de radio transmitida ocupa un espectro frecuencial superior a 500 MHz. Por lo tanto, es capaz de transmitir mayor cantidad de información en menor tiempo que otras técnicas como el WiFi. Cuando se utiliza el UWB para localizar se hace uso de pulsos muy cortos en la transmisión, para que al utilizar tecnologías como el TDOA [13] o TOA [14] el sistema sea más preciso si la señal enviada por los nodos llega al mismo tiempo. Por ejemplo, en el caso de utilizar TOA la precisión del sistema es de sólo 1 metro de error en el 95% de los casos, cotas difícilmente alcanzadas por otro tipo de tecnologías de localización en interiores. El coste y la complejidad de este tipo de soluciones hace sin embargo que su despliegue esté muy limitado.

### 2.5.2.3 WLAN

Las técnicas basadas en redes WLAN pueden utilizar la mayoría de las tecnologías descritas en apartados anteriores. Una de ellas, frecuentemente empleada, es el fingerprinting. Ésta, a pesar de que el nivel de potencia de la señal recibida está disponible en todos los dispositivos, presenta dos inconvenientes. El primero es que la realización de la base de datos es costosa y el segundo son los cambios en el medio, como puede ser el cambio de sitio de los muebles, influye negativamente en la precisión del sistema.

Para mejorar lo segundo se pueden utilizar sistemas con algoritmos probabilísticos que por ejemplo tengan en cuenta el movimiento de las personas en el momento de determinar la posición [15].

También, hay técnicas que utilizan la multilateración basada en potencia. En concreto, la propuesta de H. Lim [16] calcula el modelo de propagación en el momento de realizar la localización, midiendo en tiempo real parámetros como la variación de temperatura y humedad. De esta forma se obtiene una mayor precisión que en caso de emplear siempre el mismo modelo de propagación de señal.

Con esta tecnología de comunicación, también se pueden emplear técnicas basadas en la medición de los tiempos de llegada. De esta forma, se puede utilizar la multilateración basada en tiempo implementando TOA [17] o TDOA [18] para obtener la localización del dispositivo.

Finalmente, para situaciones en las que el escenario es de no visibilidad directa entre los elementos a posicionar (NLOS), es posible utilizar técnicas que combinan las tecnologías TOA y AOA [19] para obtener una posición más precisa del dispositivo.

## 3. Passive-TDOA

---

El algoritmo passive-TDOA permite posicionar una estación móvil utilizando la información de otras estaciones móviles cercanas que se están posicionando utilizando la técnica 2-way TOA.

El caso más sencillo en el que se puede implementar este algoritmo es el formado por cuatro estaciones base, una estación activa y la estación pasiva.

El proceso de posicionamiento empieza cuando la estación activa obtiene su posición utilizando el método 2-way TOA, es decir, que se posiciona realizando una multilateración circular basada en los tiempos de transmisión y recepción de los mensajes que intercambia con las diferentes estaciones base. Al mismo tiempo, la estación pasiva, que es aquella que no emplea una técnica activa como 2-way TOA para obtener su posición, recibe los mensajes que la estación activa intercambia con las estaciones base. Es decir, como se puede observar en la Figura 9 la estación activa envía el mensaje para posicionarse (1) a la estación base 1 en un tiempo  $t_1$  y recibe la respuesta de la estación base (2) en un tiempo  $t_2$ . De estos dos tiempos es posible obtener el tiempo de ida y vuelta de la señal y por ende la distancia que separa al nodo activo y a la estación base. A su vez, los mensajes (1) y (2) son recibidos por la estación pasiva en los tiempos  $t_3$  y  $t_4$  respectivamente. La diferencia entre estos dos tiempos proporciona una hipérbola de posibles posiciones en las que se encuentra el nodo pasivo. De esta forma, el algoritmo, con todos los tiempos de llegada de la estación pasiva, calcula un conjunto de diferencias temporales con las que puede obtener la posición de la estación mediante la tecnología de multilateración hiperbólica [20]. Dicha posición finalmente se puede resolver empleando uno de los múltiples algoritmos existentes para sistemas basados en multilateración, como pueden ser el *Linear Least Squares* o el *Non Linear Least Squares* [21].

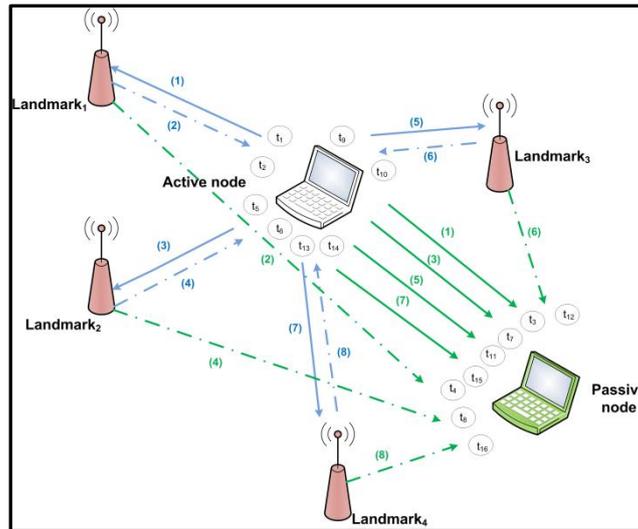


Figura 9. Funcionamiento del algoritmo passive-TDOA.

Finalmente, el hecho de que el Passive-TDOA calcule la localización de una estación con los mensajes que otras intercambian con las estaciones base evita que el proceso de localización inyecte tráfico en la red, lo que se traduce en mejorar la escalabilidad del sistema de localización y por ende de la red de comunicaciones en la que se apoya.

### 3.1 Passive-TDOA en zonas de oscuridad

En este estudio, se definen las zonas de oscuridad como aquellas en que una estación móvil no es capaz de posicionarse mediante el algoritmo de 2-way TOA. En dichas zonas, la estación móvil no dispone de las suficientes estaciones base en su zona de cobertura como para poder ejecutar el algoritmo de multilateración y por tanto no es capaz de proporcionar una posición válida.

En este supuesto el passive-TDOA puede calcular la posición de la estación pasiva, empleando para ello los mensajes que intercambian las estaciones activas cercanas con las estaciones base que se encuentran en su área de cobertura. Dichas estaciones base serán por lo tanto comunes a las estaciones activas y pasivas, tal y como se puede observar en la Figura 10 (caso de 2 estaciones activas y 2 estaciones base comunes).

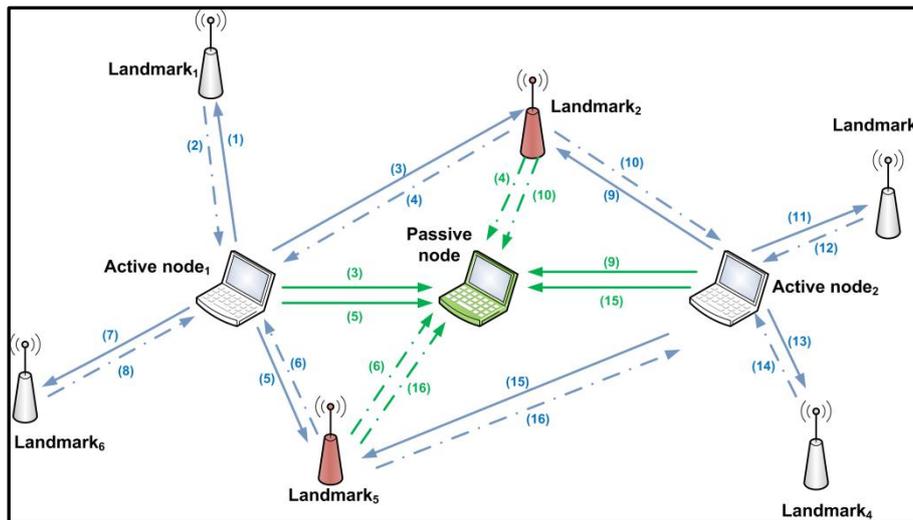


Figura 10. Funcionamiento del algoritmo passive-TDOA en zonas de oscuridad.

El algoritmo de passive TDOA parte de dos matrices que contienen las coordenadas de las estaciones base ( $AP$ ) y de las estaciones activas ( $Ac$ ) que ya se han posicionado utilizando 2-way TOA.

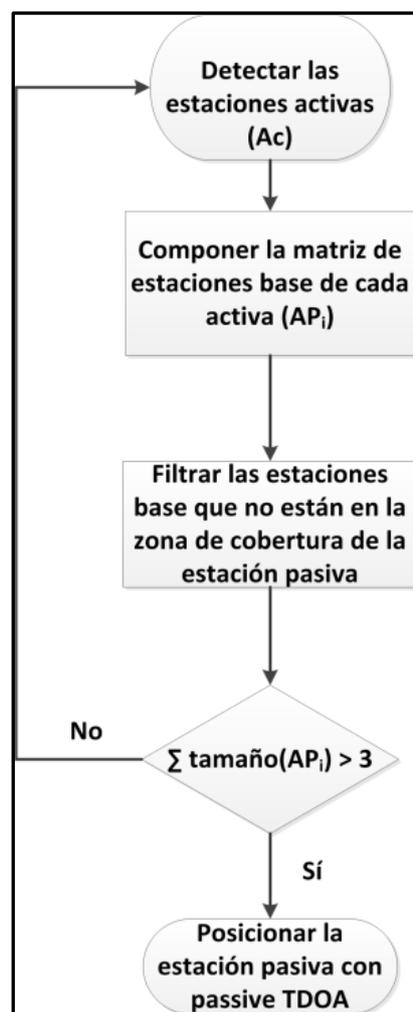
$$AP = \begin{bmatrix} AP_1(x) & AP_1(y) \\ \vdots & \vdots \\ AP_n(x) & AP_n(y) \end{bmatrix} \quad Ac = \begin{bmatrix} Ac_1(x) & Ac_1(y) \\ \vdots & \vdots \\ Ac_m(x) & Ac_m(y) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para el caso de las zonas de oscuridad, se compone la matriz con las coordenadas de las estaciones base comunes ( $APC_k$ ), es decir, de aquellas que están implicadas en el posicionamiento de la estación pasiva y que están a su vez en la zona de cobertura de las estaciones activas. Como se indica en la Figura 11, ésta se obtiene eliminando de la matriz  $AP$  todas las coordenadas de aquellas estaciones base que no se encuentran en el área de cobertura de la estación pasiva. Este proceso se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$APC_k = (AP \cap Ac_i) \cap (AP \cap PN_k) \quad \forall i, i=1,2,\dots,n. \quad (5)$$

Donde  $i$  es el número de estación activa considerada,  $k$  hace referencia a la  $k$ -ésima estación pasiva y  $AP$ ,  $Ac$  y  $PN$  representan la estación base, la estación activa y la estación pasiva respectivamente.

Con todos estos datos el algoritmo passive-TDOA calcula la diferencia de los tiempos de llegada que recibe la estación pasiva. Es decir, que se obtiene una ecuación por cada mensaje enviado desde una estación activa a una estación base común (junto a su correspondiente respuesta) y se genera un sistema de ecuaciones con el que es posible obtener la posición de la estación pasiva.



**Figura 11.** Diagrama de flujo del algoritmo passive-TDOA en zonas de oscuridad.

## 4. Simulador

Para comprobar el funcionamiento del algoritmo descrito en el apartado anterior del proyecto se ha modificado un simulador que está implementado en Matlab y que permitía evaluar el funcionamiento del passive TDOA en escenarios con una única estación activa.

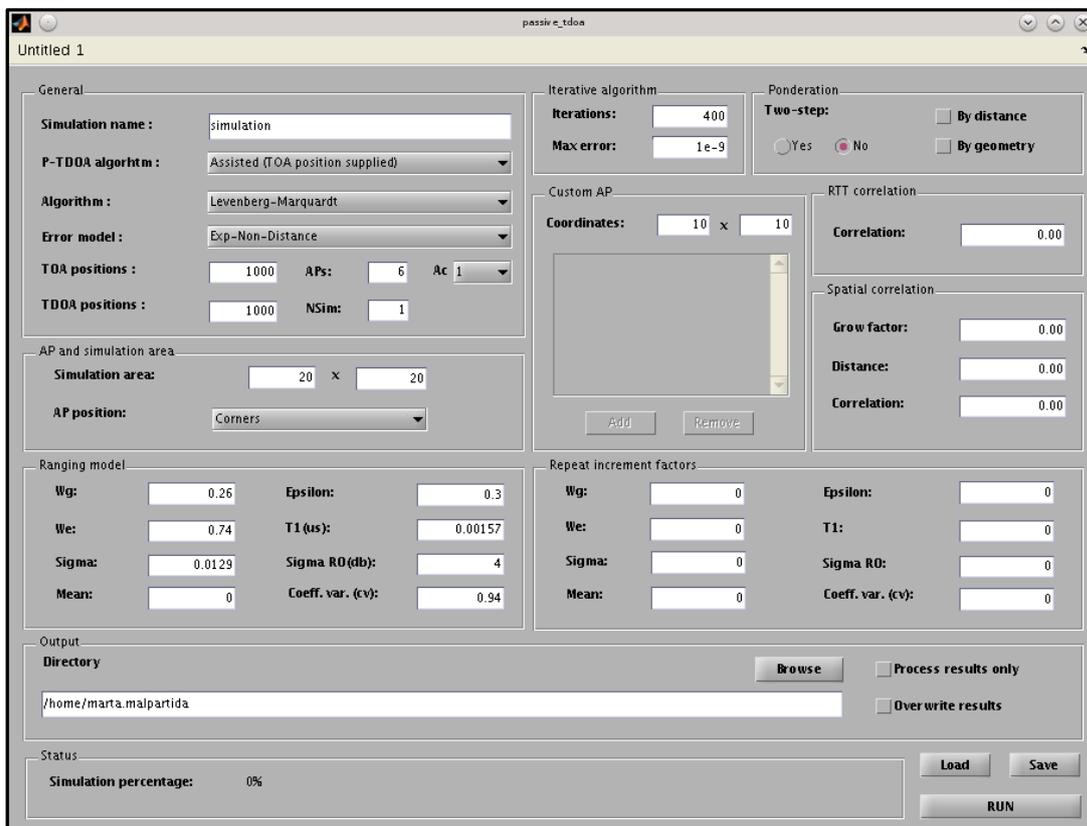


Figura 12. Interfaz gráfica del simulador utilizado en la realización del proyecto.

La interfaz gráfica, mostrada en la Figura 12, permite al usuario seleccionar los parámetros de la simulación. Dicha interfaz está estructurada de acuerdo a los múltiples conceptos involucrados, dando lugar a secciones claramente diferenciadas. La primera de ellas, denominada *General*, contiene los campos que se emplean para dar nombre a la simulación y seleccionar: el tipo de algoritmo passive-TDOA (es decir, asistido o autónomo [22]), el algoritmo matemático (por ejemplo, Gauss-Newton[23], Levenberg-Marquardt[24], etc.) , el modelo de error (por ejemplo, dependiente o no de la distancia[25]), el número de veces a posicionar de forma

aleatoria la estación activa y la pasiva, el número de estaciones base consideradas y el número de simulaciones consecutivas que se quiere realizar.

En el segundo campo, *AP and simulation area*, se puede escoger el tamaño del área de simulación y dónde se emplazarán las distintas estaciones base (por ejemplo, distribución uniforme en la periferia, aleatoria en el área de simulación, etc.). En la sección *Ranging model* se introducen los valores de los parámetros del modelo de error que se ha seleccionado previamente. Dichos parámetros servirán para establecer la potencia del error de ranging, así como la caracterización del entorno que se deriva del modelo (por ejemplo visibilidad directa entre elementos o LOS, NLOS, etc.).

En la sección *Output* se escribe el directorio donde el programa guarda los resultados, permite lanzar una simulación de nuevo pero sólo procesando los datos anteriormente obtenidos y permite indicar si al obtener los nuevos resultados se quiere sobrescribir los anteriores o no. El campo *Status* por su parte indica al usuario el estado de la simulación.

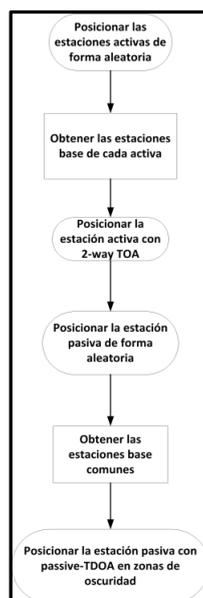
Para la realización del trabajo aquí presentado, es decir la evaluación del comportamiento del algoritmo passive-TDOA en zonas de oscuridad, se ha añadido a la interficie inicial un campo que permite seleccionar el número de estaciones activas. Así mismo, se ha modificado todo el código, preparado inicialmente para su funcionamiento con una única estación activa, para que funcionara con más de una y permitir de este modo la simulación de los escenarios que se describen en el siguiente apartado.

## 5. Metodología y escenarios

### 5.1 Procedimiento de simulación

El procedimiento seguido para realizar la simulación queda descrito en la Figura 13. Tal y como se indica, el simulador utilizado, para obtener las posiciones de la estación pasiva y los errores que de ellas se derivan, en primer lugar, posiciona las estaciones activas de forma aleatoria. Seguidamente, calcula las estaciones base comunes a las estaciones activas y a la estación pasiva, así como las estaciones base que son propias de cada una de las estaciones activas. Una vez las estaciones activas conocen las estaciones base que se encuentran en su área de cobertura se obtiene su posición.

A continuación, como ya se conocen las posiciones de las estaciones activas y cuales son las estaciones base comunes, se procede al posicionamiento de la pasiva. Para ello, se posiciona la estación pasiva 1000 veces de forma aleatoria y se obtiene para cada vez los resultados de ésta. Todo el procedimiento descrito se repite para 1000 posiciones aleatorias de las estaciones activas involucradas en la simulación.



**Figura 13.** Diagrama de flujo del procedimiento de la simulación.

## 5.2 Escenarios simulados y métricas obtenidas

Para poder evaluar el comportamiento del sistema se han diseñado tres escenarios distintos. Todos ellos tienen en común que el área de simulación es cuadrada y que cada simulación se realiza para dos tamaños de dicha área: 20 metros y 50 metros de lado. En todos los casos las estaciones base se sitúan en el perímetro del área de simulación de forma equidistante.

El modelo de error de ranging, que define el error cometido al estimar las distancias, que se ha tenido en cuenta para realizar las simulaciones es el exponencial dependiente de la distancia [25], se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$e_r = w_1 \cdot N(0, \sigma) + w_2 \cdot \text{Exp}(cT_1 d^\epsilon y), \quad (6)$$

donde  $\sigma$  es la desviación típica,  $c$  es la velocidad de propagación,  $T_1$  es la mediana de la dispersión de retardo a 1 kilómetro de distancia,  $d$  es la distancia en kilómetros,  $\epsilon$  es un factor de escala que marca el impacto de la distancia en el modelo de error de ranging e  $y$  es una variable aleatoria lognormal. Y dado que el objetivo del proyecto es analizar el comportamiento del sistema en zonas de oscuridad se ha dado más importancia a la componente NLOS del modelo (es decir la exponencial) y hacer así más verosímil los escenarios simulados. Por ello, en el cálculo del error los pesos  $w_1$  y  $w_2$  tienen valores 0.26 y 0.74 respectivamente. Variando el parámetro  $T_1$  se ha procedido a evaluar el comportamiento del sistema para diferentes potencias de error de ranging. En la Tabla 1 están descritos todos los valores de los parámetros del modelo de error utilizados. Donde  $\sigma_{ly}$  es la desviación típica de la variable aleatoria lognormal,  $y$ .

$\sigma$	$T_1$	$\epsilon$	$\sigma_{ly}$	$\rho$	$w_1$	$w_2$
0.0129m	1.57-12.57ns	0.3	4.0	0.94	0.26	0.74

**Tabla 1.** Parámetros de la simulación.

Así mismo, todos los escenarios para estimar la posición y obtener los resultados utilizan el algoritmo de mínimos cuadráticos no lineales propuesto por *Levenberg-Marquard* [24].

A continuación se describen los tres escenarios que se han simulado. Éstos se pueden clasificar en función del número de estaciones activas involucradas en el proceso de localización.

### 5.2.1 Escenario con una estación activa

El primer escenario simulado está compuesto, como se puede observar en la Figura 14, por cuatro estaciones base (situadas en las esquinas del área de simulación), una estación activa y una pasiva.

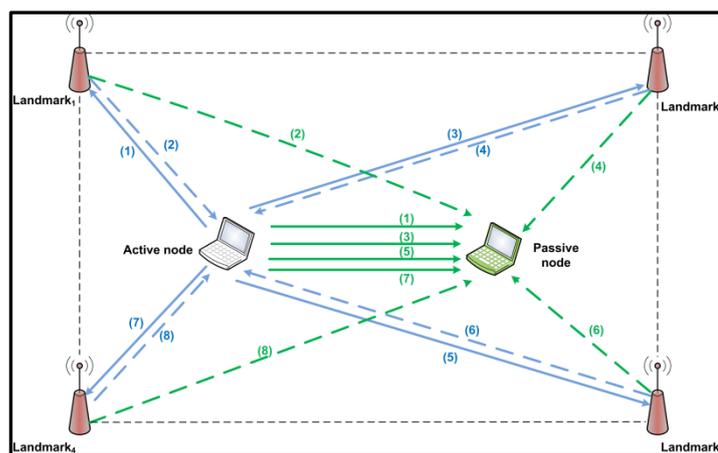


Figura 14. Escenario con una estación activa.

Para este escenario se realizan dos simulaciones distintas: *simulación 1* y *2*. La primera calcula la posición lineal de la activa y la pasiva realizando el centroide de las cuatro estaciones base (*simulación 1*). En la segunda simulación (*simulación 2*) se diferencia de la anterior en que el cálculo de la posición lineal de la activa se realiza resolviendo el sistema de ecuaciones obtenido con *Linear Least Squares (LLS)*. En ambas simulaciones la posición no lineal de la estación activa y de la pasiva se obtiene con *Non Linear Least Squares (NLLS)*. La Tabla 2 resume los algoritmos empleados en las simulaciones realizadas para el escenario descrito.

	Simulación 1		Simulación 2	
	Estación activa	Estación pasiva	Estación activa	Estación pasiva
Lineal	Centroide APs	Centroide APs comunes	LLS	Centroide APs comunes
No lineal	NLLS	NLLS	NLLS	NLLS

Tabla 2. Simulaciones realizadas para el escenario de una estación activa.

### 5.2.2 Escenario con dos estaciones activas

El segundo escenario consta de seis estaciones base dos de las cuales son comunes a las dos estaciones activas y a la estación pasiva.

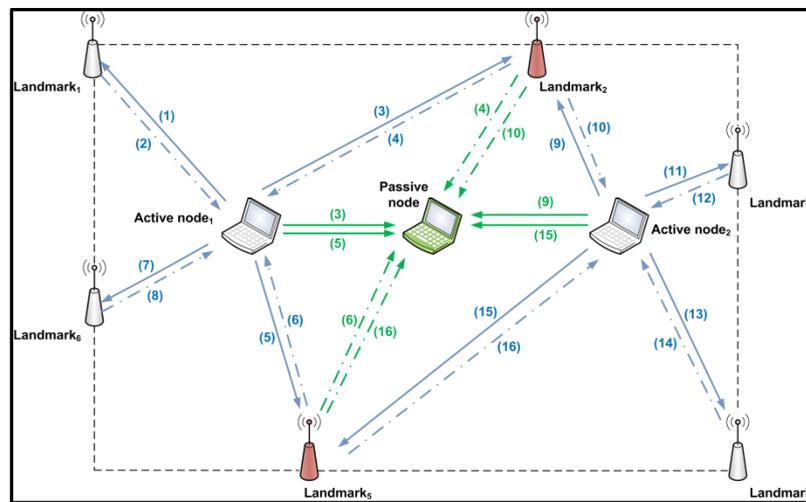


Figura 15. Escenario con dos estaciones activas.

Como en el caso descrito anteriormente se han llevado a cabo dos simulaciones distintas. En la primera de ellas la posición lineal de cada estación activa se calcula con el centroide de las cuatro estaciones base que están en el área de cobertura de dicha estación. No obstante, para obtener la posición lineal de la estación pasiva se realiza el centroide de las estaciones base comunes.

En la segunda simulación como en el caso de tener una estación activa, se estima la posición lineal de la activa utilizando LLS. Y en el caso del cálculo de la posición lineal de la estación pasiva se resuelve el siguiente sistema de ecuaciones obtenido con el algoritmo passive-TDOA con LLS.

$$\begin{bmatrix} X_{i1j1} & Y_{i1j1} & T_{i1j1} - R_{i1j1} & 0 \\ X_{i1j2} & Y_{i1j2} & T_{i1j2} - R_{i1j2} & 0 \\ X_{i2j1} & Y_{i2j1} & 0 & T_{i2j1} - R_{i2j1} \\ X_{i2j2} & Y_{i2j2} & 0 & T_{i2j2} - R_{i2j2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ R_{i1k} \\ R_{i2k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{ij1} \\ \vdots \\ B_{iju} \end{bmatrix}$$

(7)

Como en el escenario de una estación activa todas las posiciones no lineales se calculan con NLLS.

	Simulación 1		Simulación 2	
	Estación activa	Estación pasiva	Estación activa	Estación pasiva
Lineal	Centroide APs de cada activa	Centroide APs comunes	LLS	LLS
No lineal	NLLS	NLLS	NLLS	NLLS

Tabla 3. Simulaciones realizadas para el escenario de dos estaciones activas.

### 5.2.3 Escenario con cuatro estaciones activas

Este escenario está formado por trece estaciones base, siendo una de ellas común para las cuatro activas.

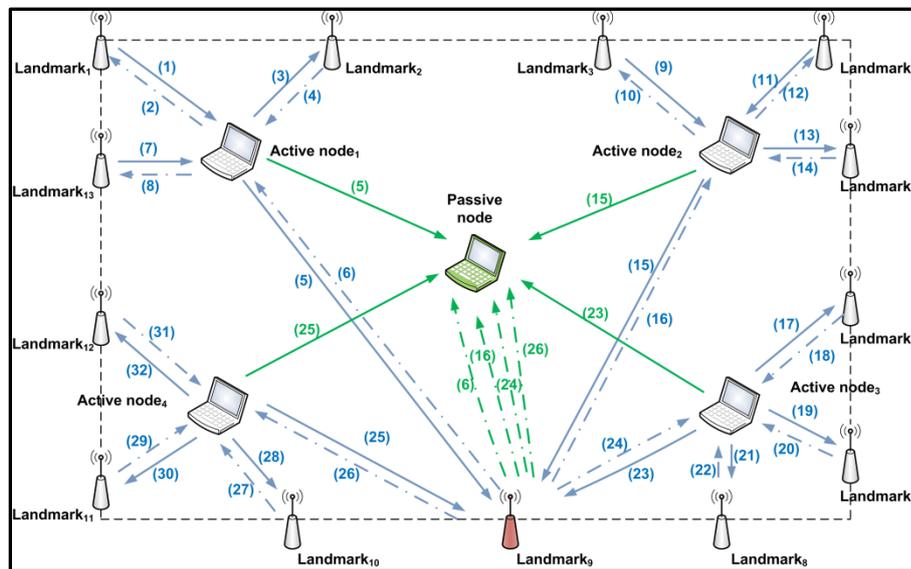


Figura 16. Escenario con cuatro estaciones activas.

En este caso también se realizan dos simulaciones. En la primera, se calcula la posición lineal de las cuatro estaciones activas con el centroide de las

estaciones base de cada activa. La posición lineal de la pasiva se obtiene con el centroide de la estación base común, es decir, que se corresponde a la posición de dicha estación base común.

En la segunda simulación se estima la posición lineal de las estaciones activas con LLS. En cambio, el sistema de ecuaciones obtenido para el cálculo de la posición lineal de la pasiva no se puede linealizar, por lo que no se puede resolver con LLS. En consecuencia, dicha posición se obtiene realizando el centroide con las posiciones de la estación base común y las estaciones activas.

Como en los dos escenarios anteriores la posición no lineal de las estaciones activas y de la pasiva se calcula utilizando NLLS.

	Simulación 1		Simulación 2	
	Estación activa	Estación pasiva	Estación activa	Estación pasiva
Lineal	Centroide APs de cada activa	Centroide AP común	LLS	Centroide de las activas y la común
No lineal	NLLS	NLLS	NLLS	NLLS

**Tabla 4.** Simulaciones realizadas para el escenario de cuatro estaciones activas.

## 6. Resultados

---

En este apartado se analizan los resultados obtenidos con las simulaciones descritas anteriormente, que se encuentran resumidas en la tabla 5, comparando los escenarios de dos y cuatro estaciones activas con el de una. Es decir, se comparan dos escenarios que simulan dos casos en los que la estación a posicionar se encuentra en una zona de oscuridad con un escenario que tiene todas las estaciones base necesarias para posicionarse.

Además, los resultados obtenidos de la segunda simulación de los escenarios de dos y cuatro estaciones activas se comparan con los resultados obtenidos de simular el comportamiento que éstos tienen cuando se determinan de forma aleatoria las estaciones base propias de cada estación activa. En vez de seleccionar las estaciones base comunes, como se hace en las primeras simulaciones, por proximidad a las estaciones activas y a la pasiva. De esta manera se evalúan todas las distribuciones posibles de los elementos dispuestos en el área de simulación y se obtiene cual es el funcionamiento en media del sistema.

En el análisis de los resultados sólo se muestran los resultados de una estación activa ya todas ellas son independientes y por tanto, los resultados obtenidos en cada una de ellas son estadísticamente equivalentes. Cabe puntualizar que para evitar errores aberrantes se han filtrado todas aquellas posiciones cuyo error de posicionamiento era superior a dos veces el ancho del área de simulación. Así mismo, las gráficas mostradas en las siguientes secciones son las del error de posicionamiento, con los errores aberrantes ya filtrados y únicamente para el caso no lineal, ya que para la obtención de la posición no lineal se utiliza la lineal.

	Simulación 1		Simulación 2	
	Estación activa	Estación pasiva	Estación activa	Estación pasiva
<b>1 Activa</b>				
Lineal	Centroide APs	Centroide APs comunes	LLS	Centroide APs comunes
No lineal	NLLS	NLLS	NLLS	NLLS
<b>2 Activas</b>				
Lineal	Centroide APs de cada activa	Centroide APs comunes	LLS	LLS
No lineal	NLLS	NLLS	NLLS	NLLS
<b>4 Activas</b>				
Lineal	Centroide APs de cada activa	Centroide APs comunes	LLS	Centroide con las APs de cada activa y las comunes
No lineal	NLLS	NLLS	NLLS	NLLS

**Tabla 5.** Tabla resumen de todos los escenarios simulados.

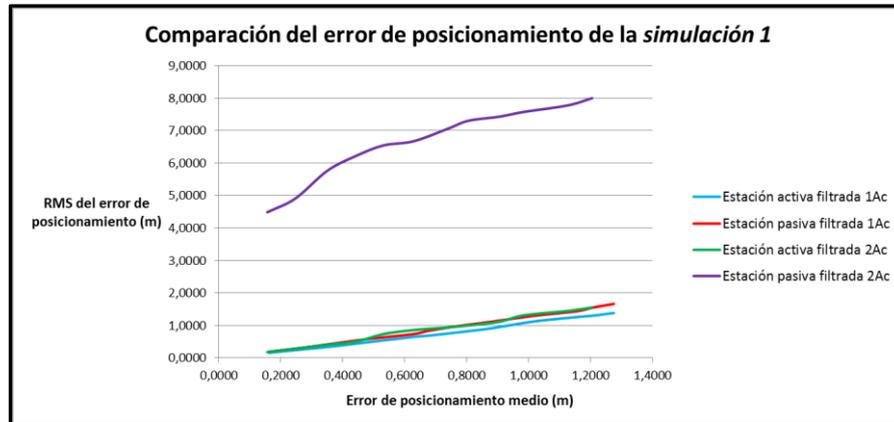
## 6.1 Selección de estaciones base por distancia

En los siguientes apartados se evalúan los resultados obtenidos en los escenarios de dos y cuatro estaciones activas en el caso en el que las estaciones base comunes son determinadas por proximidad a las estaciones activas. Para ello se ha empleado el estadístico RMS sobre las distancias entre las estaciones base y las activas, para penalizar en el cálculo aquellas estaciones base más alejadas.

### 6.1.1 Resultados para dos estaciones activas

A continuación, se comparan los resultados de las simulaciones del escenario de una estación activa con el de dos estaciones activas.

En primer lugar, se comparan los resultados de simular el escenario con una estación activa con el de simular dos estaciones activas en las condiciones descritas en la tabla 5 para la *simulación 1*. Es decir, para el caso de calcular las posiciones lineales de las estaciones activas y la pasiva con el centroide de las estaciones base en la zona de cobertura de cada activa y el centroide de las estaciones base comunes respectivamente.



**Figura 17.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 1* para el caso en que el área de simulación mide 20m de lado.

En la Figura 17 se muestra la comparación del error que se produce al posicionar la estación activa y la pasiva en ambos escenarios simulados cuando el área de simulación es de 20 metros de lado. Como se puede observar en la gráfica hay poca diferencia entre el error de posicionamiento de la estación activa en el caso de haber una o dos. Esta diferencia aumenta con el aumento de la potencia del error de ranging. Esto es debido a que en el escenario de dos estaciones activas la elección del conjunto de estaciones base para cada una de las estaciones activas es susceptible de generar peores geometrías para el posicionamiento que en el escenario de una sola estación activa. En este último caso, el error por impacto de geometría es menor que en el caso de dos estaciones activas, puesto que sólo hay una estación activa que se posiciona aleatoriamente en el área de simulación y las estaciones base siempre están posicionadas en las esquinas del área de simulación, proporcionando unos resultados óptimos desde el punto de vista de la geometría.

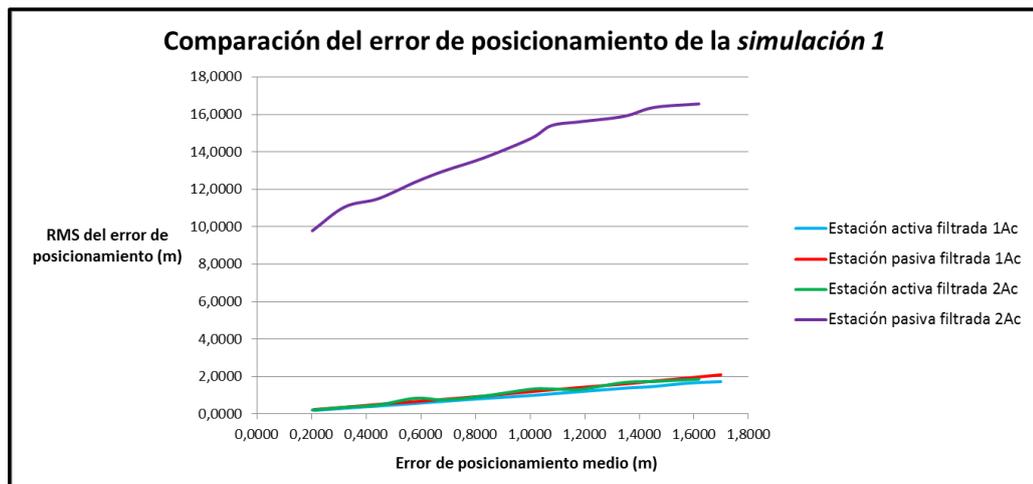
En el posicionamiento de la estación pasiva la diferencia de error entre ambos escenarios es mucho mayor que para el caso de posicionar la estación activa. Esto es consecuencia de que al posicionar la estación pasiva se dan geometrías más dispares. La razón es que la estación pasiva, para posicionarse, requiere de la posición con las dos estaciones activas, que tal y como se ha visto vienen acompañadas de un mayor error (si se compara con

el escenario de una única estación activa). Además, el hecho de seleccionar las estaciones base bajo el criterio de proximidad condiciona la geometría, haciendo que el comportamiento del algoritmo de NLLS sea más tendiente a divergir para una misma potencia de error de ranging. La consecuencia, un RMS del error de posicionamiento claramente superior al caso de operar con una única estación activa. El RMS del error de posicionamiento es calculado como:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_p^2)} \quad \forall i, i = 1, 2, \dots, n.$$

(8)

Donde  $i$  es el número de estaciones activas y  $e_p$  es el módulo del error de posicionamiento, es decir, la distancia entre la posición real y la estimada.

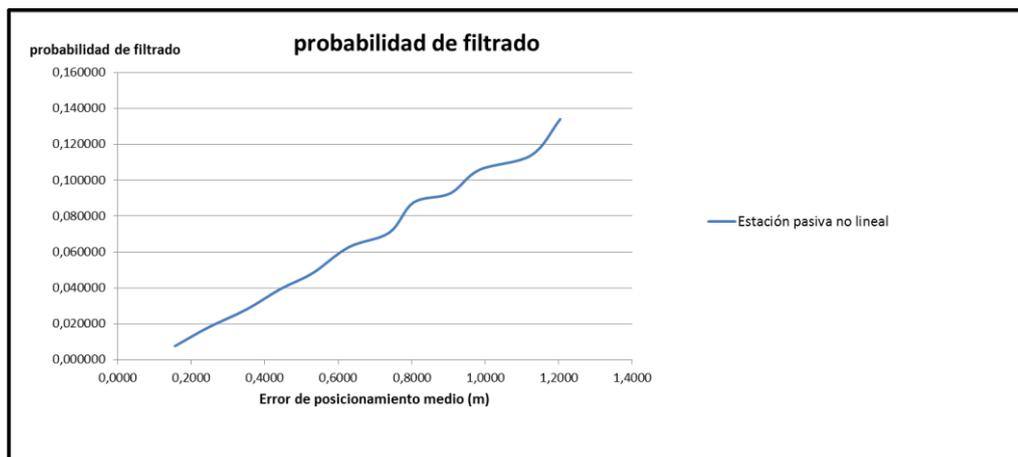


**Figura 18.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 1* para el caso en que el área de simulación mide 50m de lado.

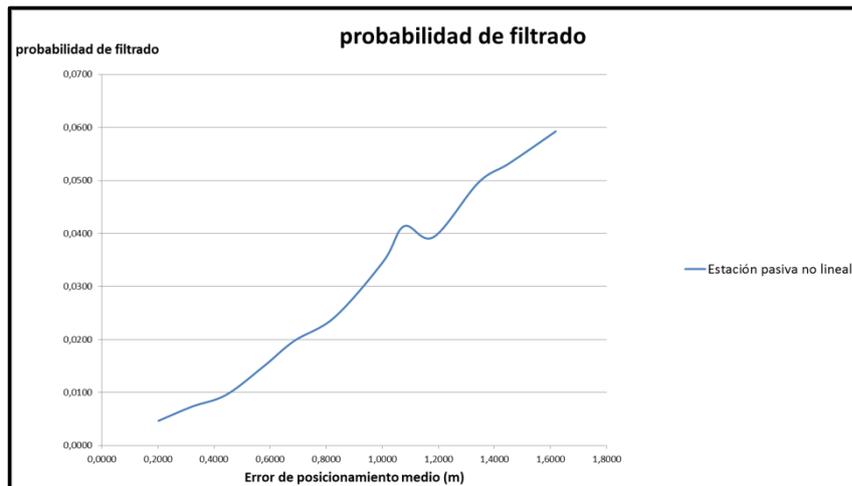
En la Figura 18 se muestra la comparación del error de posicionamiento para los mismos escenarios que en la Figura 17, pero obtenidos en un área de simulación de 50 metros de lado. Si se comparan ambas gráficas se observa que el error de posicionamiento medio ha aumentado respecto a la

simulación realizada con 20 metros de lado, porque el modelo de error utilizado para realizar las simulaciones es dependiente de la distancia.

Así mismo, como en la simulación anterior, las diferencias de error entre ambos escenarios son debidas al impacto de la geometría. También, se puede observar que respecto a la otra simulación aumenta el RMS del error de posicionamiento. Esto es consecuencia de que con el nuevo tamaño del área de simulación únicamente se filtran todas las posiciones cuyo error de posicionamiento es superior a 100 metros, mientras que en el caso anterior se filtraban todos aquellos errores que superaban los 40 metros. Por lo tanto, en este caso la probabilidad de filtrado (Figuras 19 y 20) es mucho menor y se calcula las posiciones de las estaciones activas y la pasiva con un mayor número de posiciones erróneas lo que influye directamente en el aumento del error de posicionamiento.

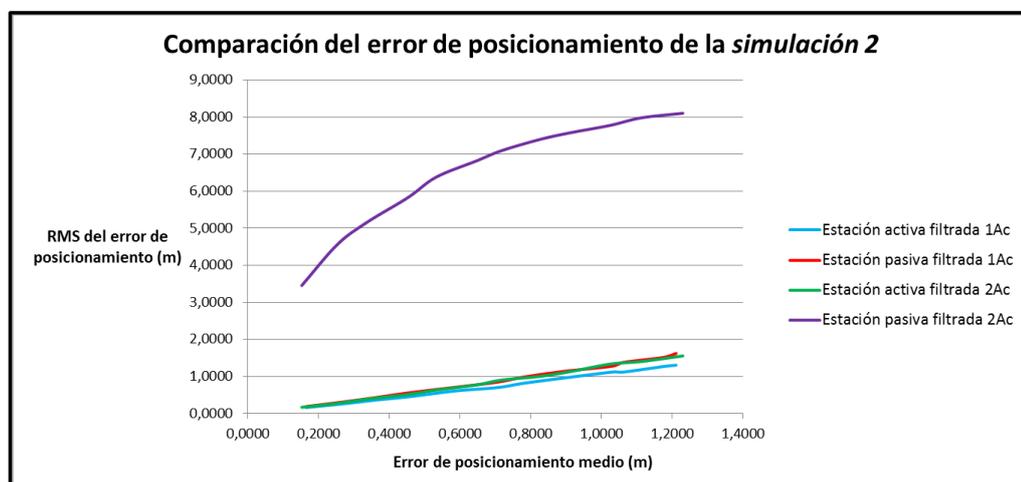


**Figura 19.** Gráfica de la probabilidad de filtrado en la *simulación 1* de 20m de lado.

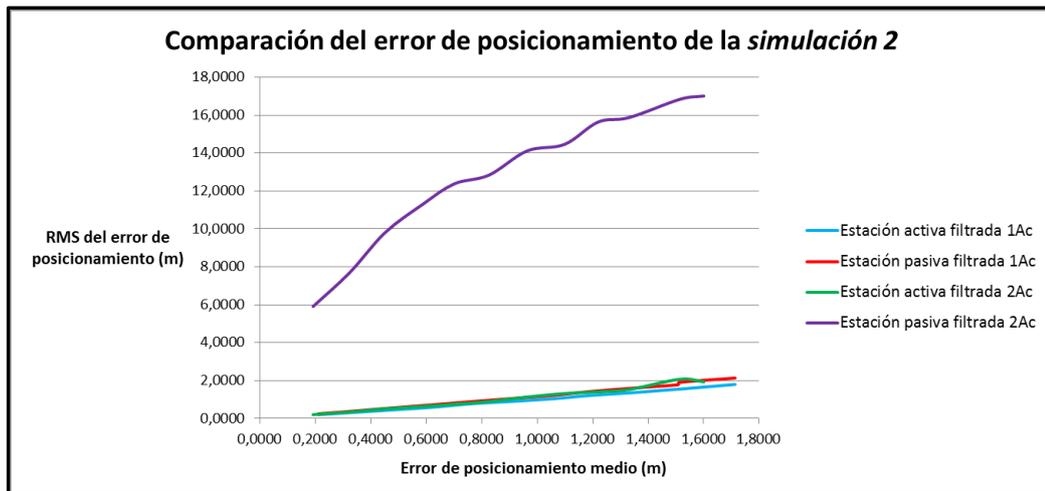


**Figura 20.** Gráfica de la probabilidad de filtrado en la *simulación 1* de 50m de lado.

Seguidamente, se comparan los resultados obtenidos realizando la *simulación 2*, que es aquella en la cual las posiciones lineales se calculan con LLS. Las posiciones lineales de la pasiva en el caso del escenario de una estación activa se estiman como en el caso anterior y en el escenario de dos estaciones activas se utiliza LLS con el sistema de ecuaciones descrito en la sección 5.2.2 de este proyecto.

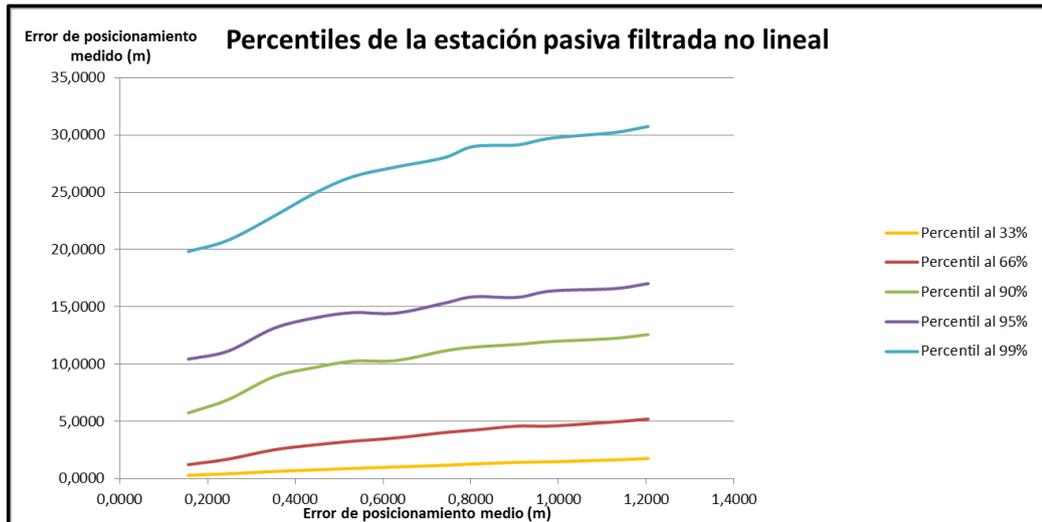


**Figura 21.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 2* para el caso en que el área de simulación mide 20m de lado.

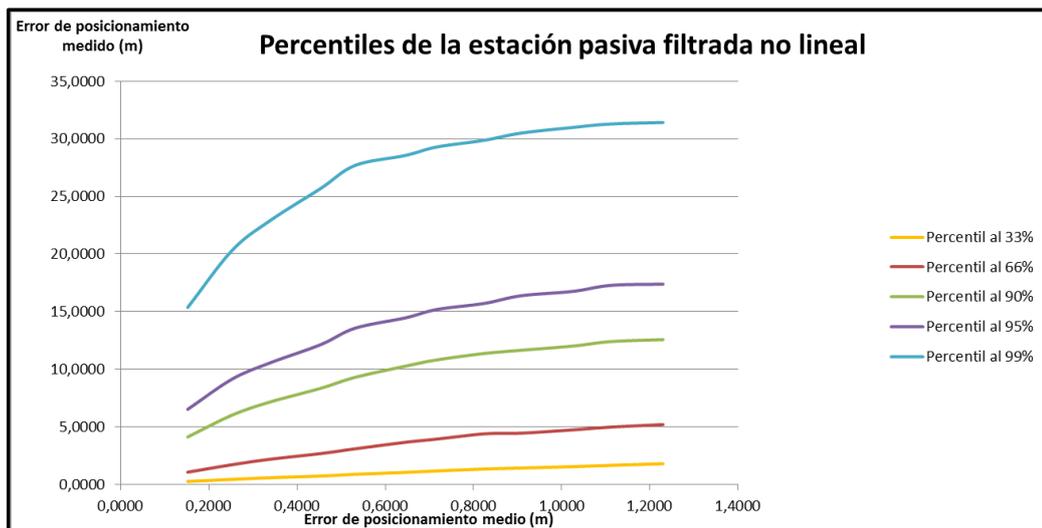


**Figura22.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 2* para el caso en que el área de simulación mide 50m de lado.

Comparando las gráficas de las Figuras 21 y 22, que se corresponden a los errores de posicionamiento de la *simulación 2* para 20 metros y 50 metros de lado respectivamente, se observa que igual que en el caso de la *simulación 1* para potencias de error de ranging pequeñas al utilizar LLS en vez del centroide el error es menor. Sin embargo, a medida que el error de ranging aumenta, el RMS del error de posicionamiento tiende a los valores del caso anterior. Esto es debido a que, conforme aumenta la potencia del error de ranging, su impacto en el algoritmo se hace más patente, amplificando el impacto de la geometría en el error de posicionamiento. Así mismo, en el caso de 50 metros el RMS de error de posicionamiento es mayor que en el caso de 20 metros porque las posiciones erróneas que se consideran dentro del criterio de filtrado es mucho mayor que en el caso de 20 metros.



**Figura 23.** Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la *simulación 1* de 20 m de lado.



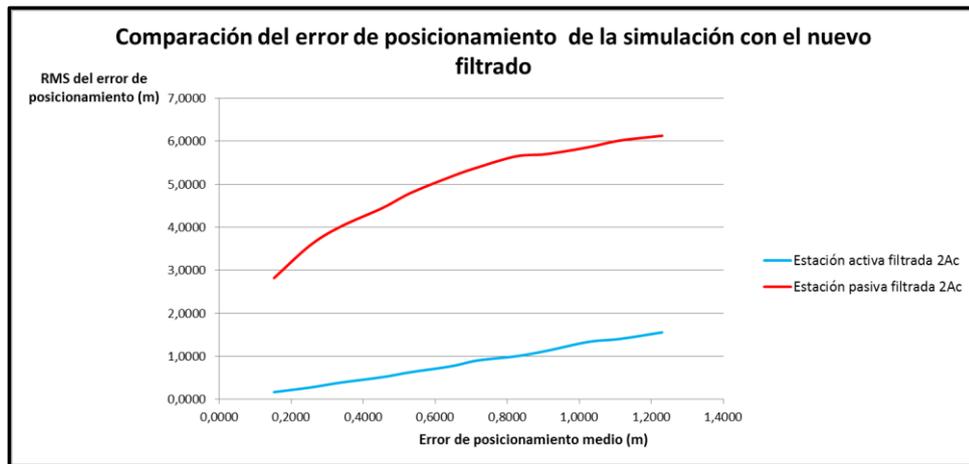
**Figura24.** Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la *simulación 2* de 20 m de lado.

Si se comparan las gráficas de los percentiles de las *simulaciones 1* y *2* para el área de simulación de 20 metros de lado, Figuras 23 y 24, se puede observar que para el caso que se utiliza LLS el error de posicionamiento presenta un comportamiento más estable. También se puede apreciar en la Figura 24 que presenta dos zonas claramente diferenciadas, la primera va desde el valor de error de posicionamiento medio de 0.18 metros hasta 0.9 metros aproximadamente y el error presenta un crecimiento mayor.

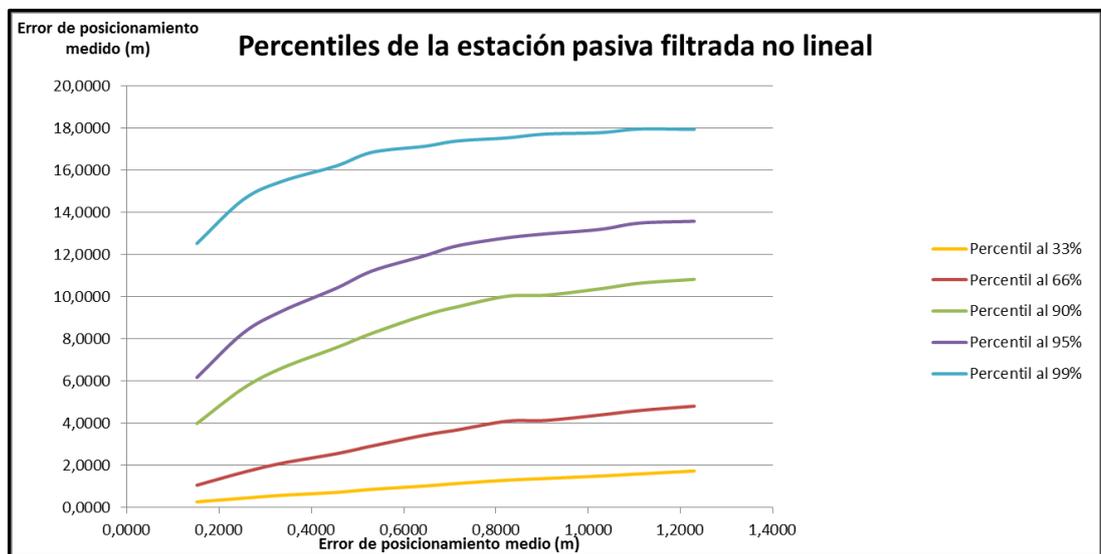
Mientras que a partir de 0.9 metros aproximadamente el error tiene un crecimiento más estable.

En la siguiente simulación se repite la *simulación 2* para el caso de dos estaciones activas y 20 metros de lado utilizando como criterio de filtrado la eliminación de todas las posiciones que presenten un error de posicionamiento mayor al área de simulación. Este criterio supone una aproximación menos conservadora que la inicial pero igualmente defendible, en tanto en cuanto elimina aquellas posiciones que presentan un error superior al proporcionado por un simple cell-ID.

Si se compara la gráfica de la Figura 25 con los resultados obtenidos en la *simulación 2* con el criterio de filtrado anterior se observa que el RMS del error de posicionamiento en la estimación de la posición de la estación pasiva ha disminuido 2 metros aproximadamente. Esto es debido a que la probabilidad de filtrado, Figuras 27 y 28, ha aumentado en el caso de estimar la posición no lineal de la estación pasiva y, además con el nuevo criterio de filtrado también se produce filtrado en la posición lineal de la estación pasiva, que en el caso anterior era 0. Si se comparan los percentiles al 95% y al 99% en ambos casos (Figuras 24 y 26) se observa que la aplicación del nuevo criterio de filtrado se traduce en una notable disminución de dichos percentiles. Esto es debido a que el nuevo criterio de filtrado tiende a eliminar todas aquellas posiciones que proporcionan un error claramente identificable como aberrante. De esta forma, la eliminación de un porcentaje muy reducido de posiciones redundante de forma notable en la disminución del RMS del error de posicionamiento.



**Figura 25.** Comparación del error de posicionamiento de la estación activa con la pasiva en el caso de emplear un criterio de filtrado más estricto.



**Figura 26.** Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la simulación con el criterio más estricto de filtrado.

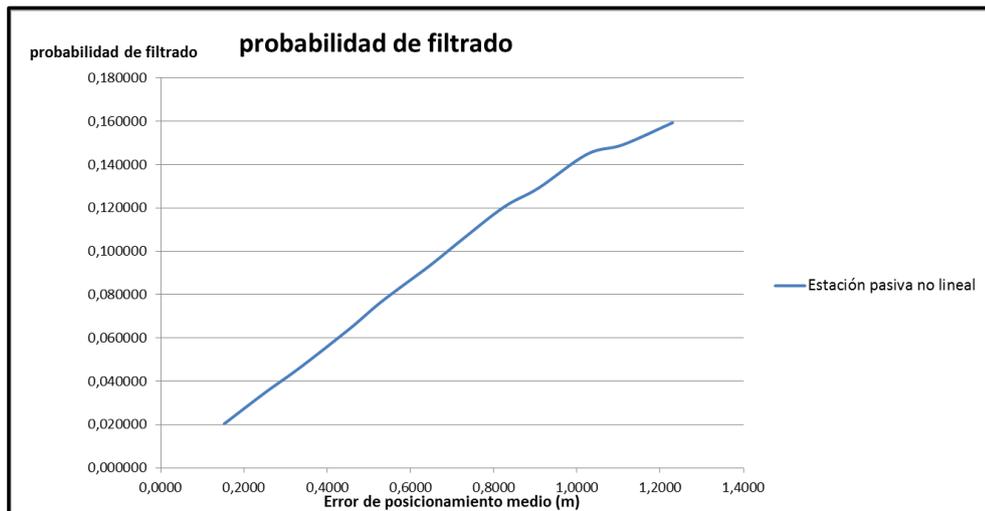


Figura 27. Gráfica de la probabilidad de filtrado en la simulación 2 de 20m de lado.

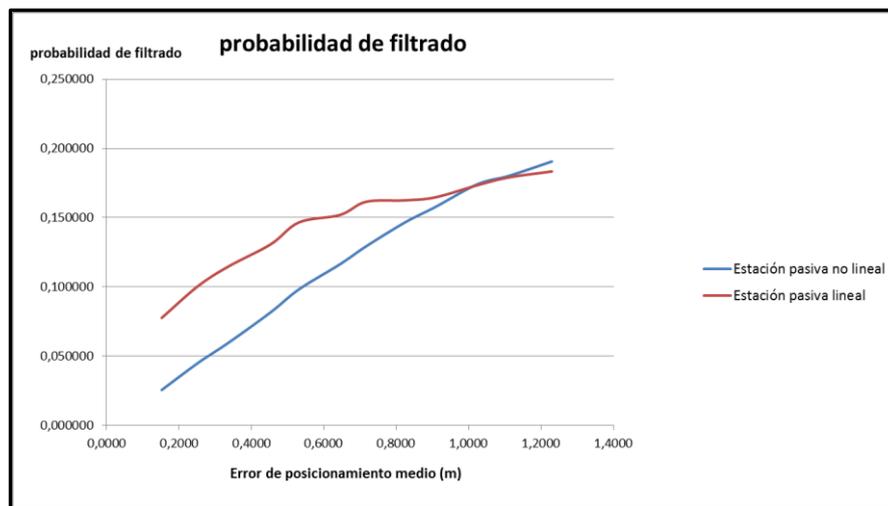
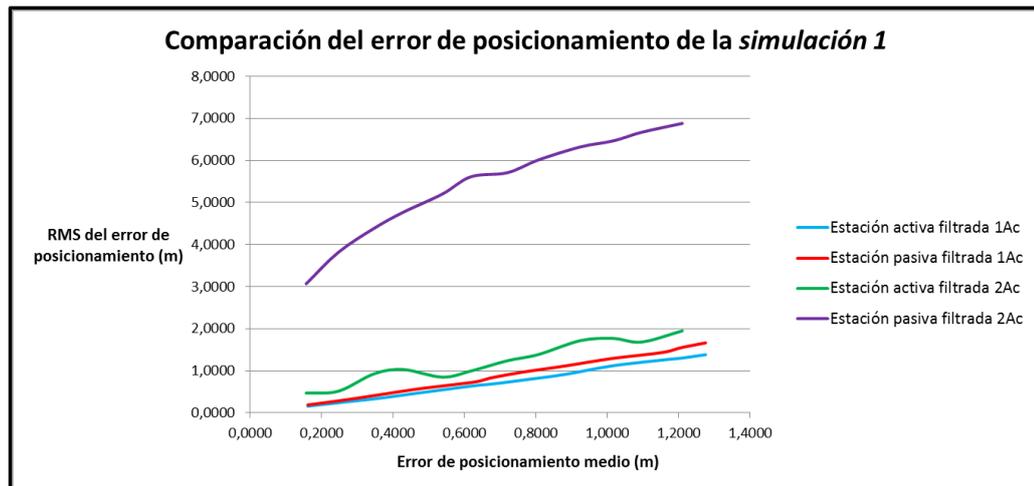


Figura 28. Gráfica de la probabilidad de filtrado en la simulación con un criterio de filtrado más estricto.

### 6.1.2 Resultados para cuatro estaciones activas

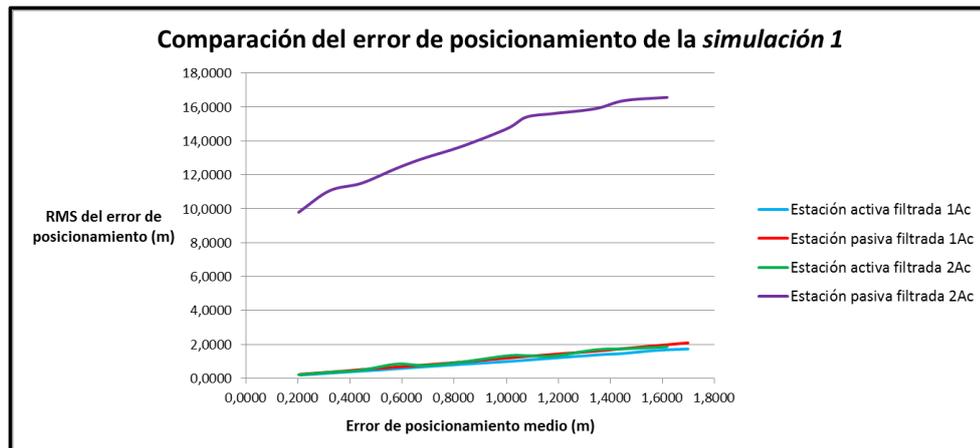
En este apartado se analiza el comportamiento del algoritmo passive-TDOA en el caso a priori más desfavorable, ya que la estación pasiva se posiciona con la ayuda de cuatro estaciones activas y una estación base común.

En primer lugar, se comparan los resultados de la *simulación 1* que utiliza el centroide de las estaciones base propias de cada estación activa para calcular la posición de la activa lineal. La posición de la estación pasiva lineal corresponde a la posición de la estación base común.



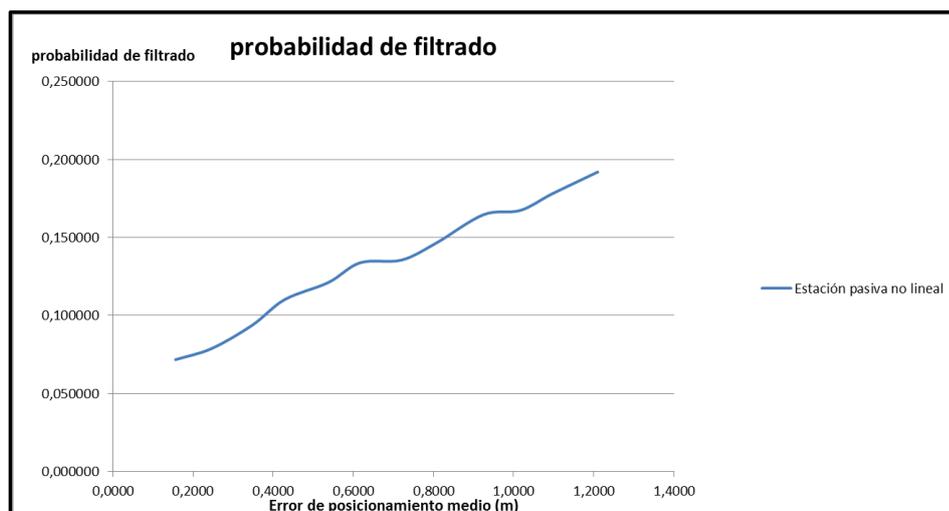
**Figura 29.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 1* para el caso en que el área de simulación mide 20 m de lado.

En la Figura 29 se puede observar que el RMS del error de posicionamiento de la estación activa para el escenario de cuatro activas presenta mayor variabilidad que en el escenario anterior. La diferencia máxima del RMS del error de posicionamiento con el escenario de una estación activa es de 0.8 metros aproximadamente. No obstante, la diferencia entre el error de posicionamiento de la pasiva entre los resultados de ambos escenarios es mucho mayor. Esto es consecuencia de que en el escenario de cuatro estaciones activas en el posicionamiento de la estación activa y de la pasiva hay muchas más probabilidades de tener una geometría más desfavorable. Ya que en el caso de la activa se posiciona con las tres estaciones más cercanas y la estación base común, por lo que si éstas están muy próximas la zona delimitada por las hipérbolas tiende a ser muy grande o si éstas están muy alejadas de la estación base común puede ser que las hipérbolas generadas por las estaciones cercanas y la común no se entrecrucen.

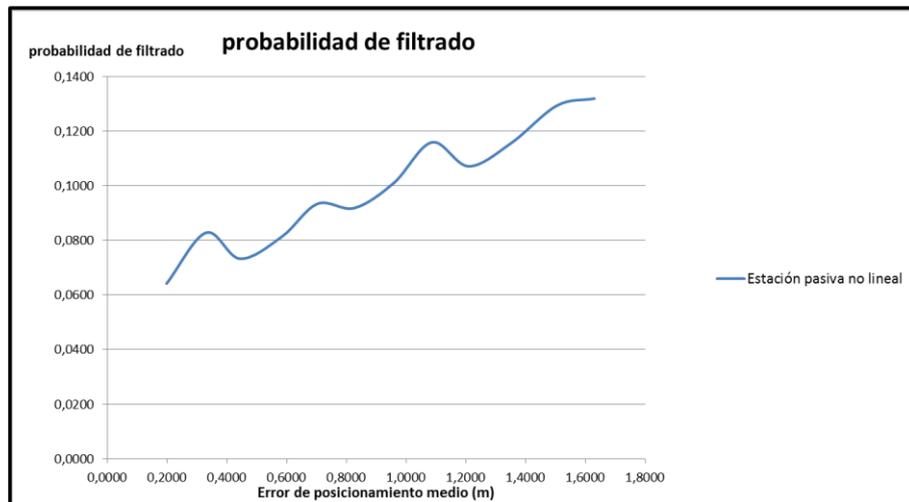


**Figura 30.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 1* para el caso en que el área de simulación mide 50 m de lado.

Si se comparan las gráficas de la *simulación 1* para 20 metros y 50 metros de lado, Figuras 29 y 30, se puede observar que aparte del error inducido por la geometría en el caso de 50 metros el RMS del error de posicionamiento en el caso de la estimación de la posición de la pasiva es mucho mayor que en el caso de 20 metros. Esto es debido a que ahora se filtran los errores a partir de 100 metros en vez de 40 metros con lo que hay una mayor cantidad de posiciones erróneas que no han sido eliminadas, Figuras 31 y 32. Como en el caso de dos estaciones activas, los valores del error de posicionamiento medio han aumentado respecto a la simulación de 20 metros de lado, ya que el modelo del error es dependiente de la distancia.



**Figura 31.** Gráfica de la probabilidad de filtrado en la *simulación 1* de 20m de lado.



**Figura 32.** Gráfica de la probabilidad de filtrado en la *simulación 1* de 50m de lado.

En la Figura 33 se observan los resultados de la *simulación 2* para 20 metros de lado del escenario de cuatro activas que estima la posición lineal de la estación activa con LLS. La posición lineal de la estación pasiva se calcula con el centroide de la estación base común y las activas. Si se compara con los resultados obtenidos con la *simulación 1*, Figura 29, se observa que en el caso de la estación activa el RMS del error de posicionamiento ha disminuido y es más estable que si se calcula su posición con el centroide. No obstante, en el caso de la estación pasiva aunque para valores pequeños de potencia de error de ranging el RMS del error de posicionamiento es menor para valores grandes tiende a los mismos valores de error dado que el impacto de la geometría en estos casos es mayor.

En el caso de realizar la *simulación 2* en un área de simulación de 50 metros de lado el error aumenta respecto al área de 20 metros de lado, porque, como ya se ha dicho anteriormente, se eliminan menos posiciones de erróneas al filtrar sólo aquellas cuyo error sea mayor de 100 metros.

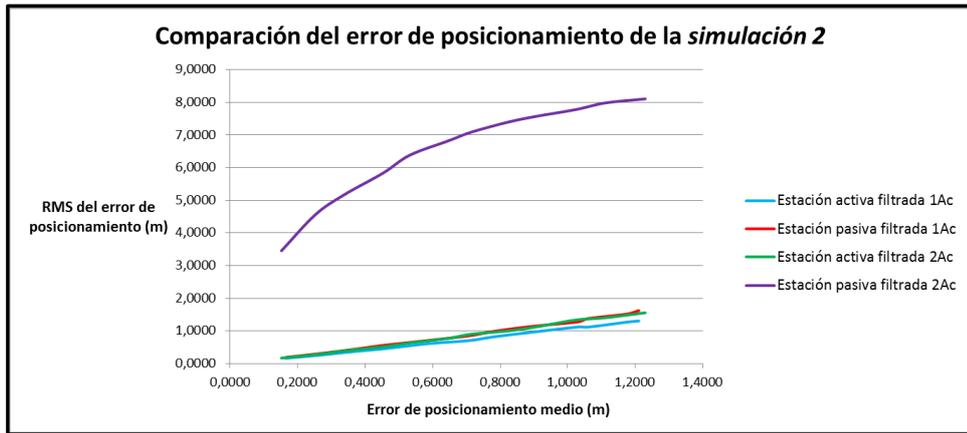


Figura 33. Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la simulación 2 para el caso en que el área de simulación mide 20 m de lado.

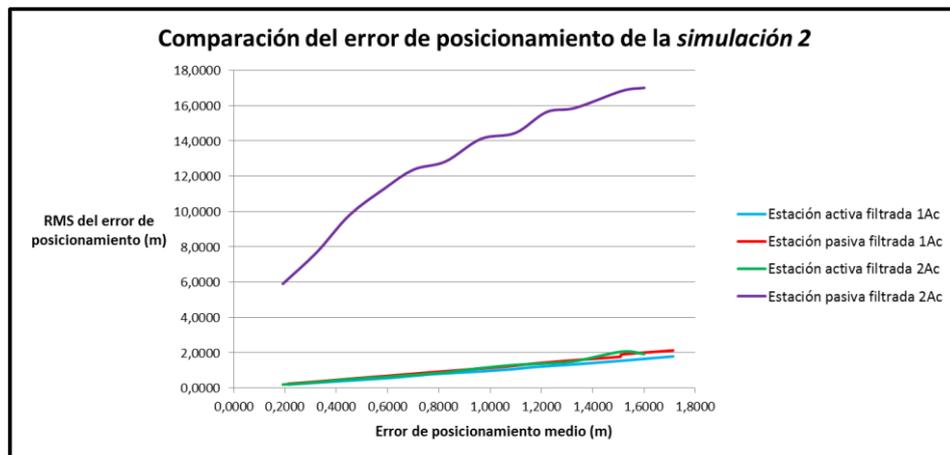


Figura 34. Gráfica de la comparación del error de posicionamiento de la simulación 2 para el caso en que el área de simulación mide 50 m de lado.

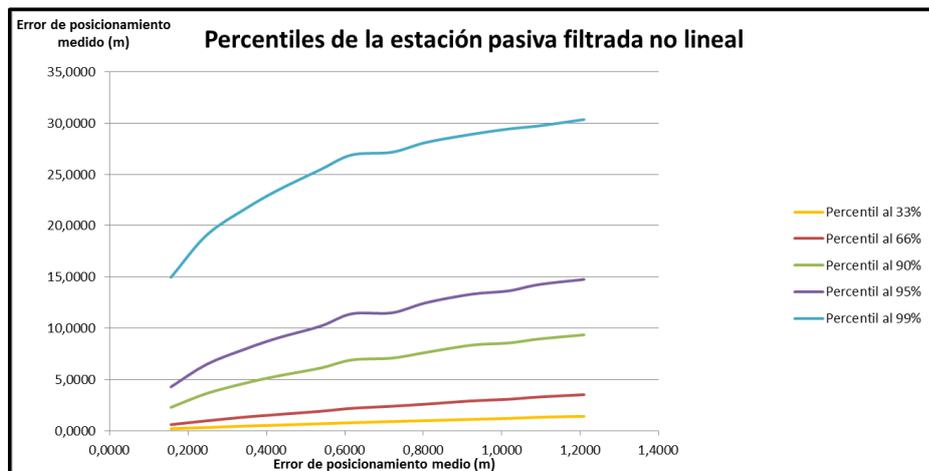
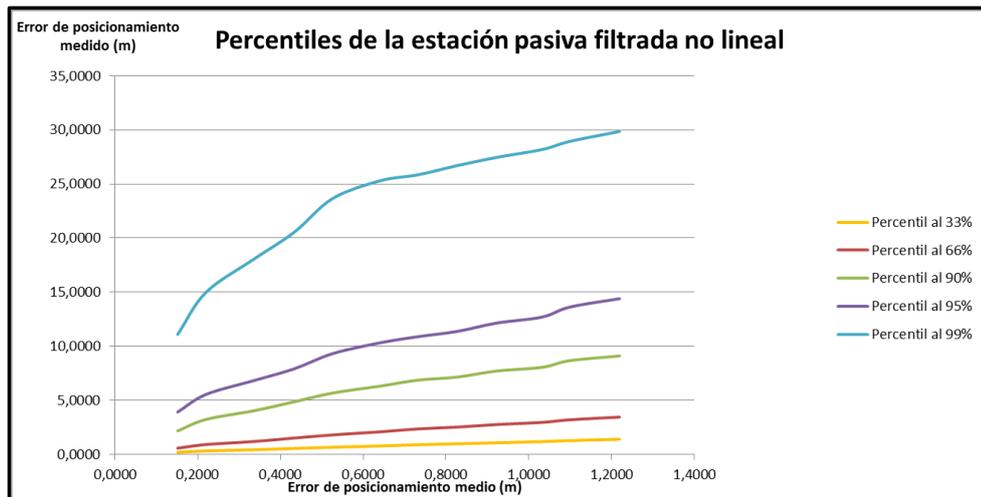


Figura 35. Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la simulación 1 de 20 m de lado.



**Figura 36.** Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la *simulación 2* de 20 m de lado.

Si se comparan los percentiles de la *simulación 1* y *2* para un área de simulación de 20 metros de lado, Figuras 35 y 36, se observa que para el caso en el que se estima la posición lineal de la activa con LLS, el error de posicionamiento es menor, especialmente para valores de error de ranging menor.

Como en el caso del escenario con dos estaciones activas se repite la simulación aplicando un criterio de filtrado más estricto que elimina todas aquellas posiciones cuyo error de posicionamiento es mayor que el área de simulación. Comparando las gráficas de los percentiles de la nueva simulación con la anterior, Figuras 36 y 37, se puede observar que el error de posicionamiento a disminuido y crece de forma más lenta. Esto es debido a que ahora la probabilidad de filtrado es mayor, Figuras 38 y 39, y por lo tanto se eliminan sobretodo aquellas posiciones menos probables, que son las que hacen que más se incremente el RMS del error de posicionamiento. Por ello, los percentiles que más disminuyen respecto a las simulaciones anteriores son el del 95% y el 99%.

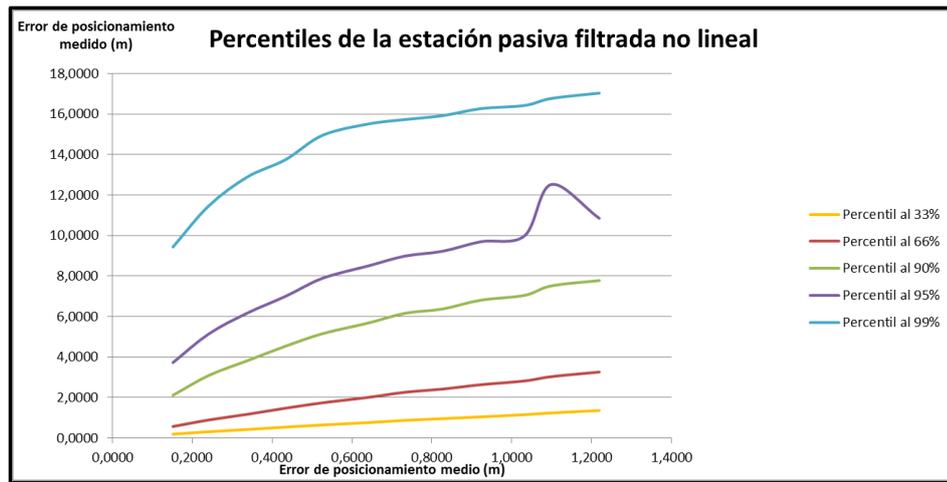


Figura 37. Gráfica de los percentiles de la estación pasiva filtrada no lineal para la simulación con el criterio más estricto de filtrado.

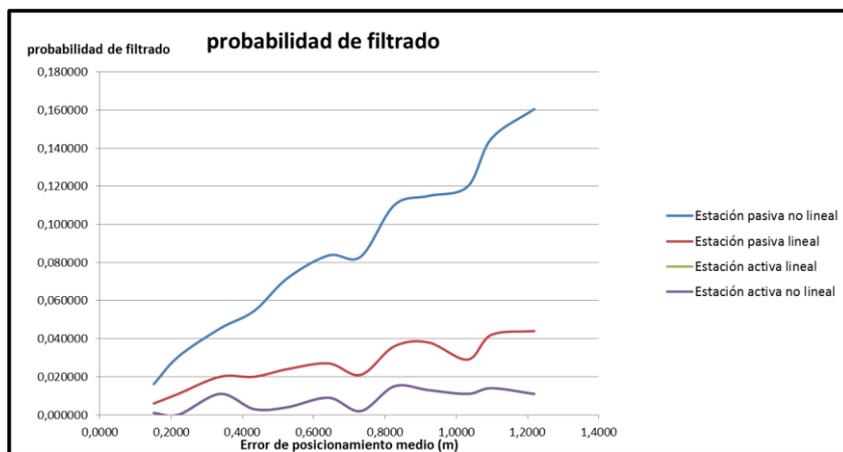


Figura 38. Gráfica de la probabilidad de filtrado en la simulación 2 de 20m de lado.

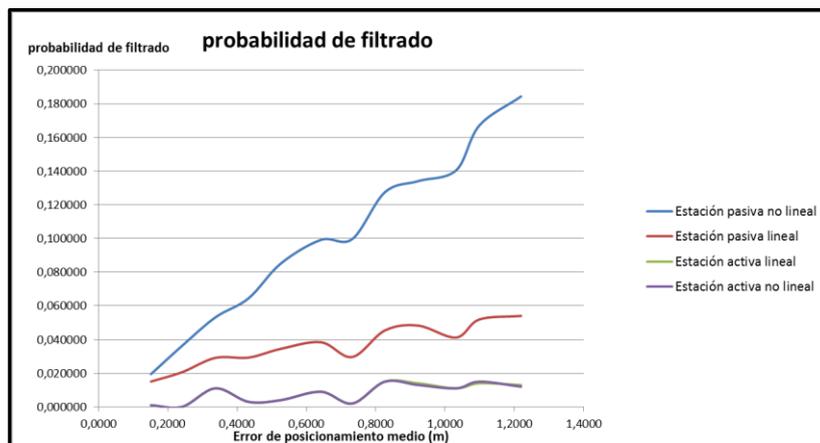


Figura 39. Gráfica de la probabilidad de filtrado en la simulación con un criterio de filtrado más estricto.

## 6.2 Selección aleatoria de estaciones base

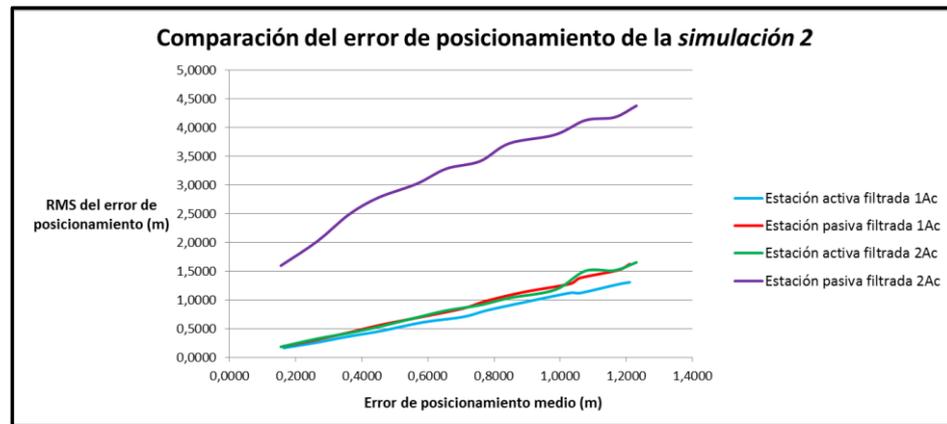
A continuación, se comparan los resultados obtenidos realizando la *simulación 2* con una estación activa con los resultados obtenidos realizando dicha simulación para los otros dos escenarios en el supuesto de que las estaciones base propias de cada activa se determinan de forma aleatoria. En consecuencia, analizando los resultados obtenidos con estas nuevas simulaciones se analiza el comportamiento del sistema en media, para así evaluar el funcionamiento del passive TDOA en cualquier tipo de área oscura, con independencia de la geometría formada entre estaciones base y estaciones activas y pasiva.

Simulación 2		
	Estación activa	Estación pasiva
<b>1 Activa</b>		
Lineal	LLS	Centroide APs comunes
No lineal	NLLS	NLLS
<b>2 Activas</b>		
Lineal	LLS	LLS
No lineal	NLLS	NLLS
<b>4 Activas</b>		
Lineal	LLS	Centroide con las APs de cada activa y las comunes
No lineal	NLLS	NLLS

**Tabla 6.** Tabla resumen de los escenarios simulados para el comportamiento del sistema en media.

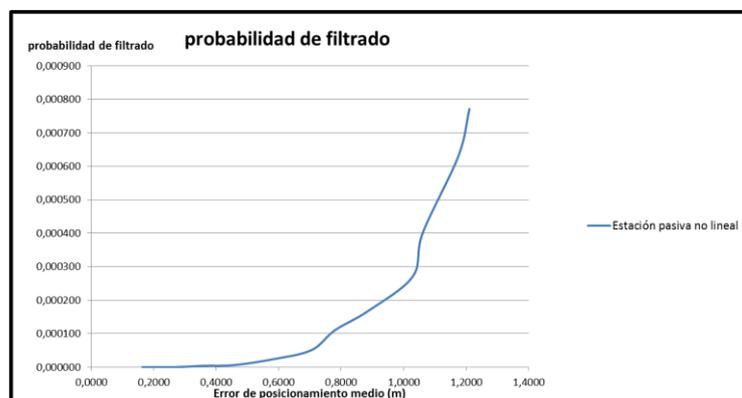
### 6.2.1 Resultados para dos estaciones activas

En la Figura 40 se compara el error de posicionamiento obtenido en el escenario de una estación activa y con el de dos estaciones activas realizando la *simulación 2* para el caso en el que el lado del área de simulación mide 20 metros.

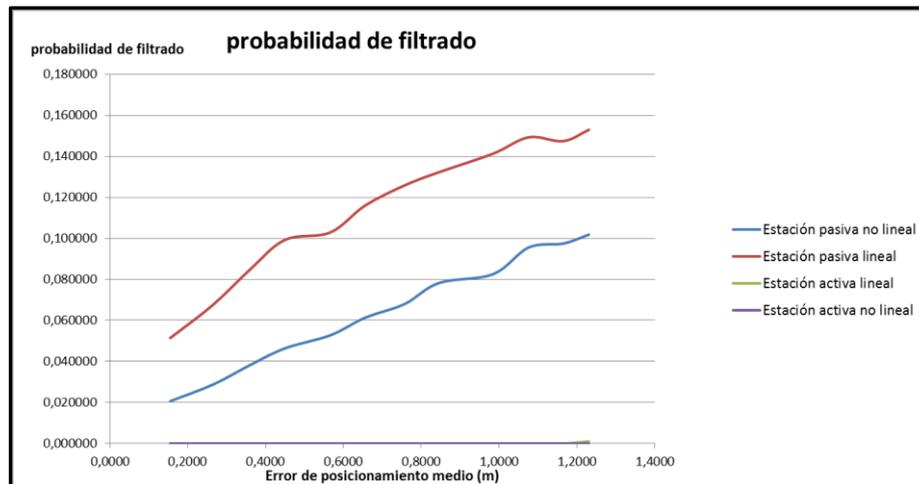


**Figura 40.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento para el funcionamiento del sistema en media de la simulación 2 para el caso en que el área de simulación mide 20 m de lado.

En la Figura 40 se puede observar que la diferencia máxima entre el RMS del error de posicionamiento de las estaciones activas, en los escenarios con una o dos, es de aproximadamente 0.3 metros. No obstante, la diferencia de error de posicionamiento de la estación pasiva entre ambos escenarios es mucho mayor a 2.8 metros aproximadamente. Esto es debido a que al tener dos estaciones activas que se posicionan de forma aleatoria hay más probabilidad de que se produzcan geometrías de posicionamiento más desfavorables que en el caso de una. Es decir, que se dé el caso en que la zona determinada por la multilateración hiperbólica (conjunto de posiciones posibles) sea muy grande o las hipérbolas no lleguen a cruzarse nunca. Por esta razón la probabilidad de filtrado, Figuras 41 y 42, en el escenario de dos estaciones activas es mucho mayor.

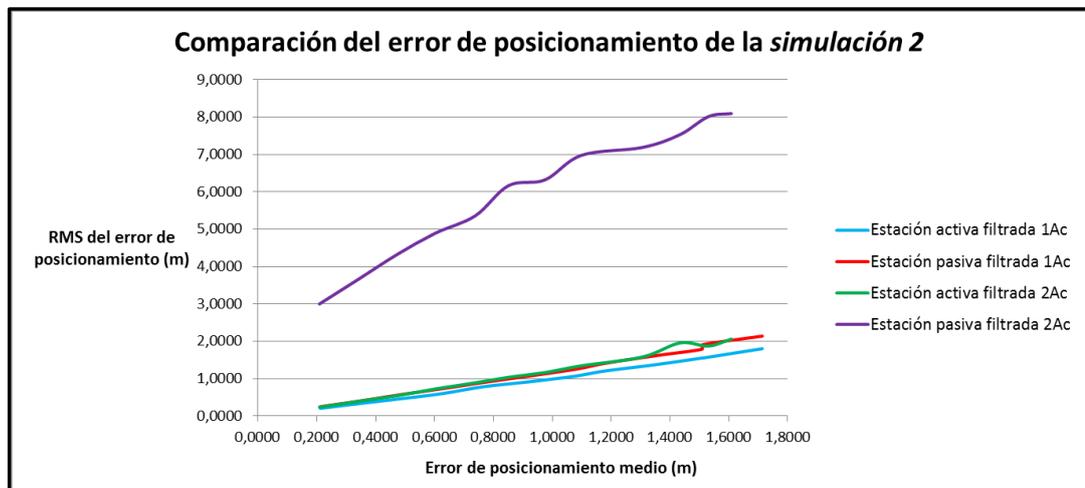


**Figura 41.** Gráfica de la probabilidad de filtrado para el escenario de una estación activa en la simulación 2 de 20m de lado.



**Figura 42.** Gráfica de la probabilidad de filtrado para el escenario de dos estaciones activas en la *simulación 2* de 20m de lado.

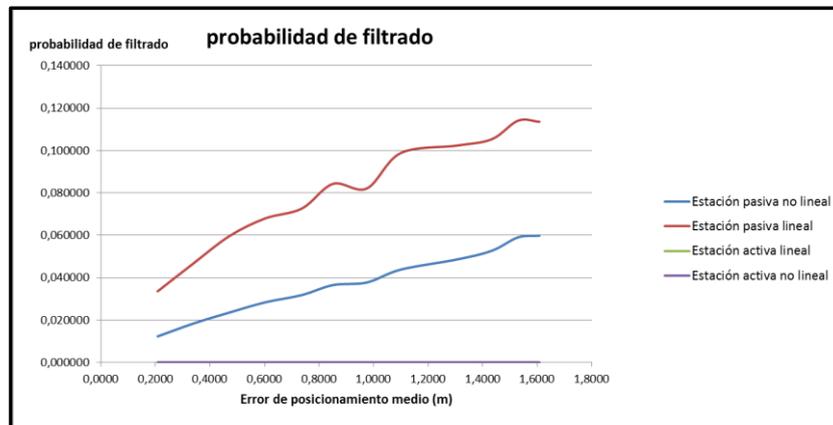
En la Figura 43 está representada la comparación del error de posicionamiento de la *simulación 2* de los escenarios con una estación activa y con dos para el caso en el que el área de simulación mida 50 metros de lado.



**Figura 43.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento para el funcionamiento del sistema en media de la simulación 2 para el caso en que el área de simulación mide 50 m de lado.

Si se comparan los resultados obtenidos para la simulación en un área de simulación de 50 metros de lado con los obtenidos en la de 20 metros se observa que el RMS del error de posicionamiento en el cálculo de la estación pasiva ha aumentado el doble aproximadamente. Esto es debido a que

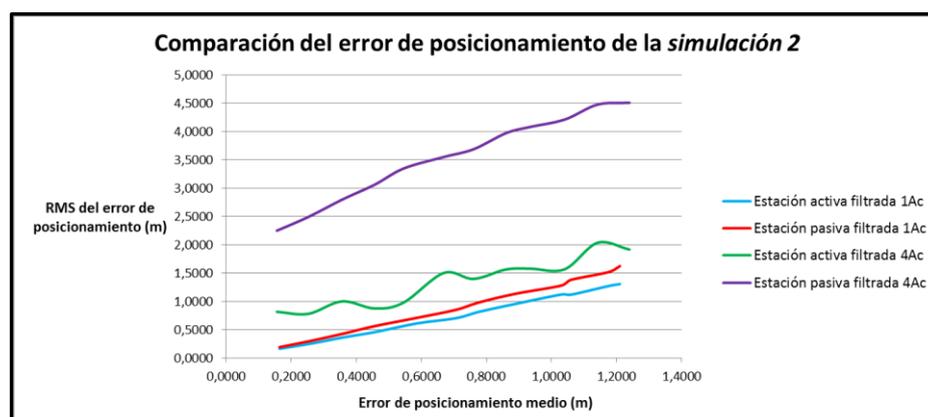
ahora se filtran todas las posiciones cuyo error de posicionamiento es mayor a 100 metros lo que hace que disminuya la probabilidad de filtrado, Figura 42 y 44, y por ende aumente el número de posiciones erróneas no eliminadas y el error de posicionamiento.



**Figura 44.** Gráfica de la probabilidad de filtrado para el escenario de dos estaciones activas en la *simulación 2* de 50m de lado.

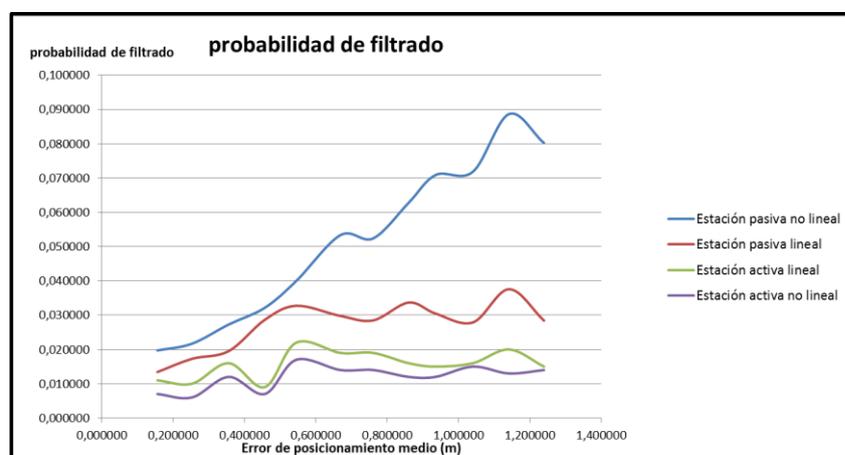
## 6.2.2 Resultados del sistema para cuatro estaciones activas

En la Figura 45 se muestra la gráfica del error de posicionamiento para la *simulación 2* realizada para un área de simulación con 20 metros de lado. Así mismo, en ella se comparan los resultados obtenidos para el escenario de una estación activa y cuatro estaciones activas.



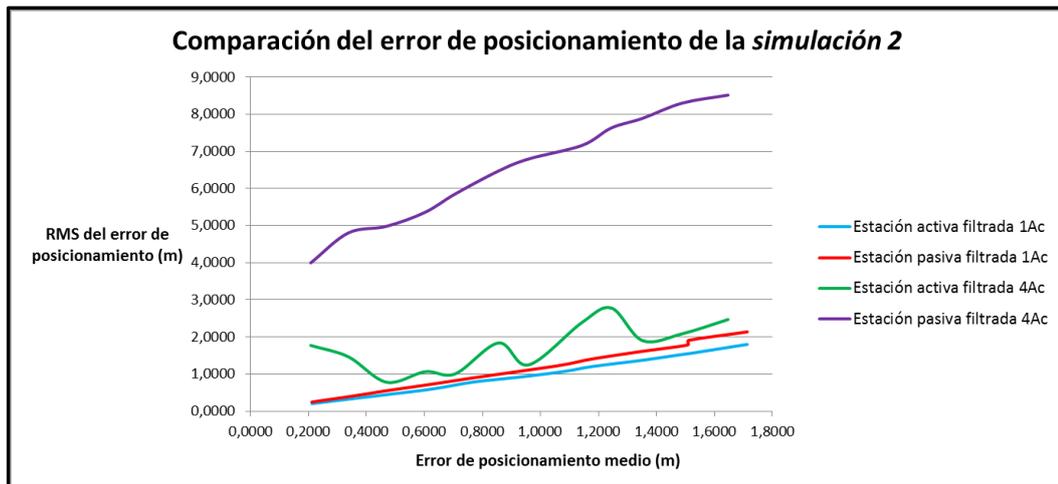
**Figura 45.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento para el funcionamiento del sistema en media de la *simulación 2* para el caso en que el área de simulación mide 20 m de lado.

Se puede observar que el error de posicionamiento resultante de posicionar la estación activa en el caso de cuatro activas es mayor y más inestable. También, se puede ver como el error de posicionamiento de la estación pasiva y las probabilidades de filtrado, Figuras 41 y 46, son mucho mayores en el escenario de cuatro estaciones activas que en el de una. Esto es debido a que con cuatro activas la probabilidad de obtener geometrías de posicionamiento desfavorables es mucho mayor. Dado que en este caso el número de estaciones activas que se posicionan de forma aleatoria es mayor que en el escenario de una estación activa.

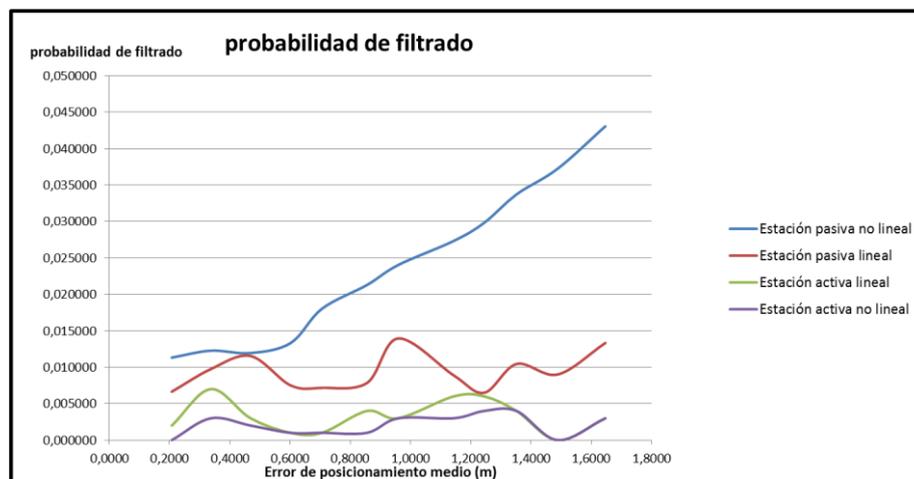


**Figura 46.** Gráfica de la probabilidad de filtrado para el escenario de cuatro estaciones activas en la simulación 2 de 20m de lado.

Como en el caso de dos estaciones activas, si se analizan los resultados de las simulaciones del escenario con cuatro activas para un área de simulación de 50 metros de lado se puede observar que el error de posicionamiento cometido en el cálculo de la estación pasiva ha aumentado aproximadamente el doble en comparación con la de 20 metros de lado (Figuras 45 y 47). Esto es debido a que la probabilidad de filtrado a disminuido al aumentar el área de simulación, dado que el criterio de filtrado es el doble del área de simulación. Por lo tanto, cuando el lado del área de simulación es 50 metros se filtran muchas menos posiciones erróneas que en el caso de 20 metros (Figuras 46 y 48).



**Figura 47.** Gráfica de la comparación del error de posicionamiento para el funcionamiento del sistema en media de la *simulación 2* para el caso en que el área de simulación mide 50 m de lado.



**Figura 48.** Gráfica de la probabilidad de filtrado para el escenario de cuatro estaciones activas en la *simulación 2* de 50m de lado.

## 7. Conclusiones y trabajos futuros

---

En este proyecto se ha adaptado el algoritmo de posicionamiento passive-TDOA para evaluar su comportamiento en zonas de oscuridad. Es decir, en aquellas zonas en las que la estación pasiva no es capaz de posicionarse empleando 2-way TOA, porque no dispone de las estaciones base necesarias para ello. En concreto se analizan y comparan tres escenarios distintos, en función del número de estaciones activas involucradas en la localización: una, dos y cuatro.

Del estudio realizado se concluye que se obtiene un RMS del error de posicionamiento menor y más estable para el caso de dos estaciones activas cuando se calcula la posición de la pasiva lineal utilizando *Linear Least Squares*. Lo mismo ocurre cuando se estima la posición de las estaciones activas lineal en el escenario de cuatro estaciones activas empleando LLS y la posición lineal de la pasiva con el centroide de la estación base común y las estaciones activas.

También, se ha observado que se obtiene un menor error de posicionamiento realizando las simulaciones en un área de simulación de 20 metros de lado que en una de 50 metros. Esto es debido a que la probabilidad de filtrado en éste último caso, al aplicar el criterio de filtrar todas aquellas posiciones cuyo error supera dos veces el lado del área de simulación, es menor. No obstante, en todos los escenarios simulados utilizando un criterio de filtrado más estricto que elimina todas aquellas posiciones cuyo error de posicionamiento es mayor que la medida de un lado del área de simulación se obtiene menor error de posicionamiento.

Evaluando el funcionamiento del sistema en media se han obtenido mejores resultados que en el caso de que las estaciones activas se posicionen con las estaciones base más cercanas, dado que la geometría de posicionamiento en el sistema en media es mejor.

Finalmente, concluir que si el escenario de cuatro estaciones activas se implementara con otra estación base común o activa más se obtendría el número necesario de ecuaciones para linealizar el sistema, y poder así estimar la posición

lineal de la estación pasiva con LLS. En consecuencia, se obtendría un menor error de posicionamiento. No obstante, no se ha llevado a cabo esta solución porque el objetivo del proyecto es evaluar el algoritmo passive-TDOA en los casos más desfavorables y bajo unas condiciones homogéneas (es decir, empleando siempre sistemas de 4 ecuaciones).

# Bibliografía

- [1] J. Borkowski, J. Lempiäinen, "Practical network-based techniques for mobile positioning in UMTS", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol. 2006, pp. 1-15, 2006.
- [2] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. VT-29, No.3, pp. 317-325, August 1980.
- [3] X. Guachang, "GPS: theory, algorithms and applications", Berlin: Springer, 2007.
- [4] <http://www.glonass-center.ru/en/>.
- [5] <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>.
- [6] 3GPP TS 23.271 2004, "Functional stage 2 description of Location Services (LCS)", <http://www.3gpp.org>.
- [7] 3GPP TS 03.71 2004, "Functional description stage 2 Location Services (LCS)", <http://www.3gpp.org>.
- [8] D.Porcino, "Performance of a OTDOA-IPDL positioning receiver for 3G-FDD mode", *IEE Second International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, No. 477, pp. 221-225, 2001.
- [9] C. Takenga, K. Kyamakya, "A low-cost fingerprint positioning system in cellular networks", *IEEE Second International Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)*, pp. 915-920, Aug. 2007.
- [10] I. Martín Escalona, F. Barceló, C. Manete, "A field study an terrestrial and satellite location sources for urban cellular networks", *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-5, 2006.

- [11] E. Aitenbichler, M. Muhlhauser, "An IR local positioning system for smart items and devices", *IEEE 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, pp. 334-339, May 2003.
- [12] E. O. Dijk, C. H. van Berkel, R. M. Aarts, E. J. van Loenen, "3-D indoor positioning method using a single compact station", *Proceedings of the second IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications*, pp. 101-110, 2004.
- [13] D. P. Young, C. M. Keller, D. W. Bliss, K. W. Forsythe, "Ultra-wideband (UWB) transmitter location using time difference of arrival (TDOA) techniques", *IEEE Conference Record Of the Thirty-Seventh Asilomar Conference of Signals, Systems and Computers*, Vol. 2, pp. 1225-1229, Nov. 2003.
- [14] N. S. Correal, S. Kyperountas, Q. Shi, M. Welborn, "An UWB relative location system", *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*, pp. 394-397, Nov. 2003.
- [15] F. Evennou, F. Marx, E. Novakov, "Map-aided indoor mobile positioning system using particle filter", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Vol. 4, pp. 2490-2494, March 2005.
- [16] H. Lim, L. C. Kung, J. C. Hou, H. Luo, "Zero-configuration indoor localization over IEEE 802.11 wireless infrastructure", *Wireless Networks*, Vol. 16, No. 2, pp. 405-420.
- [17] I. A. Ibraheem, J. Schoebel, "Time of arrival prediction for WLAN systems using prony algorithm", *IEEE 4th workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'07)*, pp. 29-32, March 2007.
- [18] R. Yamasaki, A. Ogino, T. Tamaki, T. Uta, N. Matsuzawa, T. Kato, "TDOA location system for IEEE 802.11b WLAN", *IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, Vol. 4, pp. 2338-2343, March 2005.

- [19] S. Al- Jazzar, M. Ghogho, D. McLernon, “ A joint TOA/AOA constrained minimization method for locating wireless devices in non-line-of-sight environment”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 58, pp. 468-472, Jan. 2009.
- [20] I. Martín Escalona, F. Barceló Arroyo, “A new time-based algorithm for positioning mobile terminals in wireless networks”, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2008, pp. 1-10, 2008.
- [21] Y. T. Chan, K. C. Ho, “A simple and efficient estimator for hyperbolic location”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 42, pp. 1905-1915, Aug. 1994.
- [22] I. Martín Escalona, F. Barceló Arroyo, M. Ciurana, “Passive TDOA location in mobile ad-hoc networks”, *IEEE International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, pp. 1218-1225, Oct. 2010.
- [23] C. T. Kelley, “Iterative Methods for Optimization”, SIAM, Vol.18, 1999.
- [24] S. Guardiola, I. Martín Escalona, F. Barceló Arroyo, M.Ciurana, “Impacto del modelo de error en distancia en la simulación de sistemas de localización”, *IX Jornadas de Ingeniería de Telemática – JITEL*, 2010.
- [25] D. W. Marquardt, “An algorithm for Least-Squares estimation of nonlinear parameters”, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431-441, Jun. 1963.