



Projecte Fi de Carrera

**Enginyeria Tècnica de Telecomunicació
Especialitat en Sistemes Electrònics**

Posicionamiento con una red de sensores
inalámbricos (WSN): implementación para una
aplicación real.

Daniel Egea Roca

Director: José A. López Vicario

Departamento de Telecomunicaciones e ingeniería de sistemas

**Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE)
Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)**

Juliol 2009

El sotasignat, José A. López Vicario, Professor/a de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de la UAB,

CERTIFICA:

Que el treball a què correspon aquesta memòria ha estat realitzat sota la seva direcció per en Daniel Egea Roca.

I per tal que consti firma la present.

Signat: José A. López Vicario

Bellaterra, 28 de Juliol de 2010

La realización de este trabajo de final de carrera no habría sido posible sin la ayuda de mi tutor, Dr. José López Vicario que me ha guiado y dirigido durante todo lo que ha durado el TFC, y la colaboración de Albert Bel en la resolución de muchas de mis dudas en la programación de las motas y de Albert Inglés en la toma de muchas de las medidas realizadas en el proyecto.

También me gustaría agradecer, en primer lugar, a toda mi familia, especialmente mis padres y hermanos, por apoyarme siempre en los momentos más duros y ayudar en todo lo que estaba a su alcance.

Por supuesto, gracias a todos mis amigos y compañeros de clase por estar a mi lado siempre y colaborar en todo lo posible.

“Normalmente no rezo, pero si estás ahí, por favor, sálvame Superman!”

- Homer J. Simpson

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Motivación	11
1.1.1 Proyecto XALOC (<i>Xarxes de sensors per a la gestió d'Aparcaments públics i LOCALització</i>).....	12
1.2 Estructura del proyecto.....	15
2. CONCEPTOS DE REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN).....	17
2.1 Características.....	18
2.2 Aplicaciones de las WSN.....	19
2.3 Hardware utilizado.....	21
2.4 Sistemas operativos.....	24
2.4.1 TinyOS.....	24
2.5 Lenguajes de programación.....	25
2.5.1 NesC.....	26
2.6 Programas utilizados.....	28
2.6.1 Motas anclas.....	28
2.6.2 Mota a posicionar.....	29
2.6.3 Mota base.....	29
3. Conceptos de posicionamiento.....	31
3.1 Estimación de la distancia.....	32
3.1.1 ToA (<i>Time of Arrival</i>) y TDoA (<i>Time Difference of Arrival</i>).....	32
3.1.2 Identificador de fuerza de la señal recibida (RSSI).....	33
3.1.2.1 Ventajas e inconvenientes	33
3.1.2.2 Leyes de propagación.....	35
3.1.2.3 Modelos de propagación.....	37
3.2 Parametrización del escenario.....	38
3.2.1 Cálculo de parámetros.....	40
3.3 Estimación de la posición.....	43
3.3.1 Técnicas de posicionamiento adicionales.....	46
4. Campaña de medidas.....	51
4.1 Escenarios de trabajo.....	51
4.1.1 Escenario1: Escenario descampado.....	51
4.1.3 Escenario2: Parking de 40 metros de longitud.....	52
4.1.4 Escenario3: Parking exterior.....	52
4.1.5 Escenario4: Parking interior.....	53
4.2 Cálculo de los parámetros.....	54
4.2.1 Escenario1.....	54
4.2.2 Escenario2.....	57
4.2.3 Escenario 3.....	59
4.2.4 Escenario 4.....	61
4.3 Cálculo de la posición.....	62
4.3.1 Posicionamiento 1.....	63
4.3.2 Posicionamiento 2.....	65
4.3.4 Conclusiones posicionamiento.....	71
4.4 Medidas en el interior del vehículo.....	73
4.4.1 Posicionamiento interior.....	75
4.4.2 Conclusiones posicionamiento interior.....	81
4.5 Posicionamiento alternativo.....	82
4.5.1 Método para 2 motas anclas.....	82
4.5.2 Método para 1 mota ancla.....	83

5. Conclusiones.....	86
6. Bibliografía.....	89
ANEXO 1: Medidas para el cálculo de parámetros.....	92
ANEXO 2: Medidas de posición.....	94
ANEXO 3: Códigos de los programas utilizados en las motas.....	99

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día los sensores pueden encontrarse en gran número de sistemas y dispositivos electrónicos. La mayor parte de estos sensores carecen de la capacidad de procesar y analizar los datos que detectan, limitándose a funcionar como un transductor que realiza la medición de una o más variables del entorno y envía dicha información a un procesador central. Sin embargo, se está apreciando la llegada de una nueva generación de sensores, dotados de inteligencia propia, capaces de organizarse a sí mismos y de interconectarse de forma inalámbrica con otros semejantes. Surgen así las llamadas redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSN), consistentes en redes formadas por multitud de sensores individuales que intercambian información entre sí sin necesidad de cables y mediante un protocolo de comunicación preestablecido.

Este trabajo de final de carrera (TFC) ha consistido en el diseño e implementación de un sistema de localización. Lo particular de este sistema es que se realizará a partir de una red de sensores inalámbricos, que utiliza el protocolo IEEE 802.15.4 conocido como ZigBee. Este estándar se caracteriza por ser seguro, fiable, con una tasa de bits baja (kbps), de corto alcance y que proporciona un bajo consumo de energía.

Para la implementación del sistema hemos buscado obtener una alta precisión, pero todo dentro de las posibilidades, ya que los nodos sensores (motas) no disponen de grandes recursos (capacidad de procesado, consumo, niveles de potencia,...). Por ello para el cálculo de las posiciones emplearemos la fuerza de la señal recibida (**RSS**, Received Signal Strength), que es el nivel de potencia recibido medido en dBm, y a partir de este nivel se puede estimar la distancia que separa un nodo de la red de otro. No obstante, la utilización de la RSS para el cálculo de la distancia presenta una serie de problemas, ya que la relación distancia/RSS no es constante dado la presencia de reflexiones, difracciones y multitrayecto. Por lo tanto, los valores que puede tomar la RSS en una misma situación pueden no ser constantes. Por ello para el cálculo preciso de la distancia necesitaremos parametrizar el escenario de tal manera que obtengamos unas buenas medidas de la distancia.

Así, como queremos que nuestro sistema sea preciso en cualquier tipo de escenario, teniendo en cuenta que la mota se situará en el interior de un vehículo, se obtendrán distintos parámetros para diferentes escenarios y se escogerá aquel que proporcione mejores resultados en el cálculo de la posición.

Para el cálculo de la posición se utilizará un método denominado “triangulación” en el que a partir de la posición de tres motas conocidas y con las distancias de estas motas a la mota desconocida (calculadas a partir de la RSS) calcula la posición desconocida

El objetivo principal de este proyecto es determinar la posición de un dispositivo que se encuentra en un vehículo a partir de una WSN formada por nodos cuya posición es conocida. Para ello tomaremos medidas de la potencia recibida en función de la distancia para poder parametrizar distintos escenarios y posteriormente poder observar qué parámetros proporcionan unos mejores resultados en los distintos escenarios analizados en el interior del vehículo. Finalmente se analizarán los resultados del posicionamiento obtenido con nuestro sistema mediante MATLAB para comprobar la precisión de nuestro sistema de posicionamiento.

1.1 Motivación

La principal motivación de este proyecto es el diseño e implantación de un sistema de localización basado en una WSN. No obstante, este sistema de localización podría servir de base para la plataforma de localización de usuarios necesaria para implementar el proyecto XALOC (*Xarxes de sensors per a la gestió d'Aparcaments públics i Localització*) que llevará a cabo la empresa WorldSensing.

El proyecto XALOC pretende desarrollar una plataforma basada en una WSN capaz de realizar tareas de detección de plazas de aparcamiento libres en exteriores y localización de vehículos. Con esta información será posible guiar a los conductores hacia las plazas de aparcamiento disponibles dentro del área de interés.

Por lo tanto, este proyecto tiene una motivación adicional que es proporcionar la tarea de localización de vehículos necesaria para el proyecto XALOC.

A continuación se explicará con más detalle el proyecto XALOC.

1.1.1 Proyecto XALOC (Xarxes de sensors per a la gestió d'Aparcaments públics i LOCalització).

El consorcio del proyecto está formado, como ya se ha comentado, por la empresa WorldSensing (líder del consorcio), la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) y el Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Cataluña (CTT), siendo la entidad financiadora AGAUR (Agencia de Gestión de Ayudas Universitarias y de Recerca) que forma parte de la Generalitat de Cataluña.

-Motivación del proyecto XALOC.

En la actualidad, un 80% de la población europea reside en áreas urbanas. Esta distribución de población junto con el hecho que en dichas áreas se consume gran parte de los recursos energéticos, plantea numerosos retos a la sostenibilidad de las ciudades. Por ejemplo, el transporte urbano se enfrenta diariamente a problemas de congestión i es el responsable de hasta un 70% de las emisiones contaminantes en las áreas urbanas.

Por este motivo, resulta fundamental emprender a nivel europeo acciones que permitan mejorar la eficiencia energética en entornos urbanos, con especial énfasis en la gestión del tráfico y la energía. Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) son una de las principales ramas de investigación claves para la reducción de las emisiones contaminantes i, de esta manera, contribuir al desarrollo más sostenible de las ciudades.

El proyecto XALOC (Xarxes de sensors per a la gestió d'Aparcaments públic i LOCalització) se plantea como una contribución del sector de las TIC a los objetivos de sostenibilidad mencionados anteriormente. Las TIC proporcionan nuevas herramientas para la recogida, gestión y control de información en entornos urbanos. Partiendo de esta información XALOC desarrollará un sistema que facilite una gestión ágil del transporte, así como la optimización de las estrategias de control del tránsito mediante múltiples interacciones entre la ciudad, los conductores y los vehículos.

-Plataforma XALOC.

Como ya se ha dicho, el proyecto XALOC desarrollará una plataforma basada en una red de sensores inalámbricos capaz de realizar tareas de detección de plazas de aparcamiento libres en exteriores y localización de vehículos. Mediante la utilización de dicha información será posible guiar a los conductores hacia las plazas de aparcamiento disponibles dentro del área de interés. Los sensores de la red se sitúan en el pavimento de la calle justo en el centro de las áreas azules y verdes (ver figura 1.1). Estos sensores, denominados nodos, detectan la presencia o ausencia de vehículos y transmiten esta información a un supernodo que actuará de pasarela a Internet.

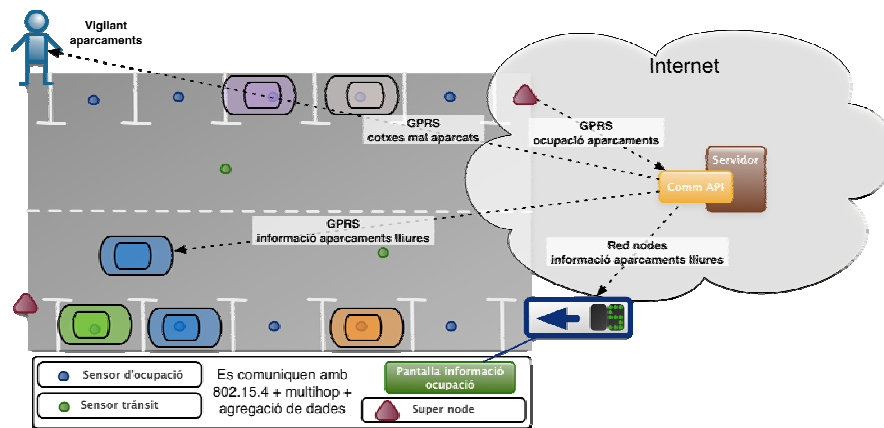


Figura 1.1. Situación plataforma XALOC.

Este supernodo envía los datos a un servidor central, que los procesa y los envía a paneles indicativos situados en la calle, cuya misión es mostrar información del estado de ocupación actual de la zona en cuestión. El encaminamiento entre los datos en la red se realiza con técnicas de comunicaciones avanzadas, que se encargan de transmitir la información de nodo a nodo y de manera energéticamente eficiente hasta llegar al supernodo (comunicaciones *multihop*).

Por otro lado, también se aprovechará la plataforma de sensores para poder localizar a los usuarios que quieran encontrar aparcamiento. En concreto se diseñará un navegador portátil para el usuario que aprovecha las señales de comunicaciones, propias de la red de sensores, con el objetivo de posicionarse dentro del entorno urbano.

Una vez localizado, el navegador se comunica con el servidor central de XALOC para conocer el nombre de aparcamientos libres en la zona y su ubicación. Acto seguido, se transmite toda esta información al usuario y la actualiza periódicamente. Cabe destacar que la tecnología de posicionamiento y localización es totalmente novedosa y ofrece grandes ventajas respecto navegadores convencionales basados en GPS como son un mejor comportamiento en entornos urbanos, un tiempo de posicionamiento más reducido y mejor cobertura del servicio.

Por lo tanto, las funciones principales del sistema XALOC son las siguientes:

- 1 Detectar plazas de aparcamiento libres.
- 2 Determinar la localización del usuario con intención de aparcar.
- 3 Guiar a los conductores hacia las plazas de aparcamiento libres más cercanas mediante paneles en la calle i/o mensajes de navegadores portátiles basados en el posicionamiento que ofrece el propio sistema.

El sistema XALOC permite una mejor gestión del tránsito en entornos urbanos todo atacando directamente al tránsito de agitación, es decir, el que resulta de los vehículos que circulan sin rumbo específico buscando aparcamiento. Una disminución del volumen del tránsito de agitación permitirá mejorar la fluidez de la circulación de manera sustancial en entornos urbanos con el objetivo de contribuir en una reducción efectiva de la contaminación y un aumento de la satisfacción del ciudadano.

-Papel de la UAB.

La Universidad Autónoma de Barcelona se ha encargado en este proyecto de:

- Diseñar e implementar el sistema de posicionamiento basado en la utilización de las redes de sensores de la plataforma XALOC. Este punto es el objetivo de nuestro TFC.
- Implementación del navegador portátil encargado de guiar al usuario.

1.2 Estructura del proyecto.

Este proyecto está estructurado en cinco capítulos siendo este el primero. En el segundo se estudia las redes de sensores inalámbricos, comentando sus características, sus aplicaciones, los sistemas operativos y lenguajes de programación utilizados en las WSN, además se comentará los dispositivos utilizados a lo largo del proyecto y los programas utilizados para realizar las medidas a lo largo del TFC. El tercer capítulo se centra en los conceptos de posicionamiento, comentando distintas maneras para estimar la distancia y distintos modelos para la predicción de las pérdidas por propagación. A continuación se comentará la manera de conseguir dichos parámetros (γ y n) a partir de las medidas tomadas de la RSSI. Una vez explicado cómo parametrizar el escenario se comentará distintos métodos para la estimación de la posición, en concreto se expondrá una técnica general y otras técnicas adicionales que serán utilizadas para los casos en que la primera técnica no se pueda aplicar. El cuarto capítulo se centra en la campaña de medidas, comentando los escenarios donde se han realizado las medidas para el cálculo de los parámetros del canal, las medidas realizadas para el cálculo de dichos parámetros y para la elección de los parámetros que proporcionan unos mejores resultados en el cálculo de la posición. También se comentará el posicionamiento en el interior del vehículo con los parámetros obtenidos y se analizarán los resultados obtenidos con los métodos alternativos estudiados en el capítulo 3 Por último, en el capítulo final se expondrán las conclusiones generales del proyecto.

Al final de la memoria se incluyen tres ANEXOS para incluir distinta información. En el primero se incluirán distintos cálculos de parámetros adicionales a los comentados con detalle en el capítulo 4. En el segundo, se adjuntan más medidas de posiciones realizadas a lo largo del proyecto. Por último, en el ANEXO 3 se encuentran los códigos utilizados para la programación de las motas.

2. CONCEPTOS DE REDES DE SENSORES

INALÁMBRICOS (WSN)

Los avances en las comunicaciones inalámbricas, en la micro-fabricación e integración de circuitos, y de los microprocesadores empotrados (embedded microprocessors) han permitido una nueva generación de redes de sensores de larga escala disponible para aplicaciones comerciales y militares. Esta nueva generación de redes de sensores ha aparecido gracias al desarrollo de dispositivos sensores de tamaño reducido, bajo coste y consumo mínimo capaces de procesar información de manera local y que pueden comunicarse de forma inalámbrica, trabajando de forma cooperativa.

Así una red de sensores inalámbricos (WSN) consiste en muchos de estos nuevos dispositivos sensores, denominados *nodos sensor*, distribuidos geográficamente en un lugar concreto para cumplir una función determinada de forma cooperativa. Normalmente, cada nodo sensor es equipado con uno o más dispositivos transductores (temperatura, humedad, presión, aceleración,...) y se comunican entre ellos de forma inalámbrica dentro de su rango de cobertura. Además de estos nodos sensores, en una WSN podemos encontrar otro tipo de nodos, denominados *nodos repetidores*, que se encargan de encaminar los datos hacia la estación base que se encuentra conectada a un ordenador que puede comunicarse hacia el exterior a través de Internet o una red de área local (LAN).

A continuación comentaremos ciertos conceptos de las redes de sensores inalámbricos que han sido necesarios considerar para la realización del TFC. Entre estos conceptos se encuentran las características principales de las WSN así como sus ventajas e inconvenientes y sus aplicaciones. Comentaremos también los dispositivos necesarios para formar dicha red de sensores además de los sistemas operativos y lenguajes de programación disponibles para la manipulación de los nodos sensores. Por último se comentará por encima los programas realizados para poder realizar las distintas medidas con las motas.

2.1 Características.

A la hora de diseñar una WSN hay que tener en cuenta las siguientes características [3]:

- **Hardware limitado:** A la hora de diseñar aplicaciones para los nodos de las WSN hay que tener en cuenta que cada nodo tiene capacidades limitadas de procesamiento, almacenamiento, comunicación, y que además disponen de una energía y ancho de banda limitado.

- **Topología de la red:** Dado a la movilidad del canal móvil, nos encontraremos con una topología de red dinámica, ya que los nodos pueden aparecer o retirarse de la red según el estado del canal. Esto se debe tener en cuenta por el hecho que los nodos tienen una gran probabilidad de fallo y por lo tanto cuantos más nodos se sitúen en la red mayor será el rendimiento de ésta y viceversa.

- **Soporte limitado para el desarrollo de software:** A la hora de desarrollar aplicaciones para los nodos de la red, se debe tener en cuenta el conjunto de funciones software de las que se dispone para poder tratar de forma adecuada la aplicación a desarrollar.

Teniendo en cuenta estas características, las WSN proporcionan ventajas sobre los sistemas tradicionales centralizados. Las redes que contienen un gran número de nodos sensores pueden mejorar la relación señal a ruido (SNR, Signal-to-Noise Ratio) reduciendo las distancias medias de comunicación entre nodos. Esto se consigue realizando conexiones *multi-hop*, que consisten en la comunicación entre nodos más cercanos e ir propagando la información hasta llegar al destino, de esta manera la distancia media (distancia entre hop) es mucho menor que la distancia total entre origen y destino. Con esta técnica, además de incrementar la SNR, se consigue un incremento en la eficiencia energética en las comunicaciones [1]. Además durante esta transmisión multihop se puede incluir información relevante proveniente de otros sensores, situados en el camino [2]. No obstante, las grandes ventajas son la robustez y la escalabilidad de la red.

2.2 Aplicaciones de las WSN.

A continuación se comentarán varias aplicaciones de las WSN para remarcar su fuerte impacto en la actualidad y su evidente crecimiento en un futuro próximo. En [4] podemos encontrar aplicaciones adicionales a las explicadas en esta memoria.

➤ **Monitorización del entorno:** Los nodos sensores pueden usarse para monitorizar condiciones y movimientos de animales o plantas salvajes en hábitats hostiles, donde se desea la mínima alteración de los habitantes. Los nodos también pueden monitorizar la calidad del aire y indicios de contaminación medioambiental, incendios no controlados, u otro desastre natural o realizado por los humanos. De hecho, la monitorización del entorno es una de las primeras aplicaciones de las WSN. En estas aplicaciones se deben tener en cuenta el tiempo de vida de los sensores y la sincronización entre nodos sensores, ya que necesitamos que los sensores duren un largo tiempo y nos proporcionen los valores medidos indicando el instante de la toma de medida, para así poder hacer un historial de medidas durante un gran periodo de tiempo.

➤ **Medicina:** El cuidado de los ancianos puede beneficiarse en gran parte con el uso de las WSN. De esta manera se podrían monitorizar los signos vitales del paciente y mantenerlo conectado remotamente con las oficinas de los doctores. Nodos sensores instalados en los hogares podrían alertar a los doctores cuando un paciente cae o por algún motivo requiere atención médica inmediata.

➤ **Control de procesos industriales:** Las WSN pueden ser usadas para monitorizar procesos de manufacturas o las condiciones del equipamiento industrial. De esta manera el equipamiento de las fábricas, plantas químicas, centrales nucleares, etc. puede estar controlado en todo momento y en caso de fallos inminentes la WSN nos avisaría. El beneficio que podemos obtener en la utilización de una WSN está en una reducción del coste del servicio de mantenimiento del equipamiento controlado, en un tiempo de trabajo de las máquinas mayor, y en ciertos casos puede llegar a salvar vidas.



Foto 2.1. Fotografías de control de microclimas (izquierda) y monitorización de animales (derecha).

➤ **Control y monitorización de edificios:** Una WSN instalada en un edificio puede disminuir drásticamente costes energéticos monitorizando las condiciones de temperatura y luz en el edificio y regular los sistemas calefactores y de cocina, ventiladores, luces,... Si instalamos sensores en un sistema de ventilación podríamos detectar agentes biológicos o contaminantes químicos. En relación con los sistemas de seguridad de edificios, los sensores pueden detectar intrusiones no autorizadas o diagramas de actividad inusuales en el edificio.



Figura 2.2. Fotografía de control de edificios inteligentes.

Nuestra aplicación de posicionamiento a desarrollar no está directamente relacionada con las aplicaciones comentadas. No obstante, en todo sistema de control y/o monitorización puede ser de gran utilidad el conocimiento de la posición de determinados elementos, por lo tanto nuestra aplicación si que puede llegar a estar relacionada con la mayoría de las aplicaciones de las WSN, pero de una forma indirecta. Podríamos pensar que ya se dispone de alguna aplicación que proporcione algún tipo de posicionamiento con redes de sensores inalámbricas y que por lo tanto nuestro sistema no tiene mucho sentido.

A pesar de la existencia de aplicaciones de posicionamiento para WSN, nuestra aplicación tiene la peculiaridad de que el posicionamiento se realiza en el interior de un coche y que se quiere guiar dicho coche a seguir cierta trayectoria. Por esto necesitamos un diseño que nos permita un posicionamiento simple y preciso dentro de un coche y al alcance de la capacidad computacional de las motas.

2.3 Hardware utilizado.

Como ya hemos comentado, una WSN está formada por un conjunto de dispositivos denominados nodos sensores. De estos nodos sensores encontramos, en la actualidad, en el mercado una gran variedad de tipos de distintos fabricantes. En la figura 2.3 se muestra una comparación de distintos tipos de motas (nodos sensores) del fabricante Crossbow [5]. El tipo de mota que se ha utilizado a lo largo del TFC han sido las motas Mica2 (900 Mhz). En general, las motas se componen de un microprocesador, una memoria flash para almacenar el programa instalado, un modulo de radio para las comunicaciones, algún pin para conexiones de dispositivos como sensores. Además incluyen LEDS que permiten comprobar el correcto funcionamiento del programa y la mota. En nuestro caso, como podemos ver en la figura 2.3, la mota está compuesta por un microprocesador (ATmega128L [7]) de 8 bits a 8 Mhz que dispone de una memoria flash (program memory) de 128 KB y una memoria RAM de 4 KB, además dispone de una memoria externa no volátil de 512 KB. La radio que poseen las motas Mica2 contiene el chip CC1000 [8] que trabaja a una frecuencia de 900 Mhz a una velocidad de 38.4 kbps y utiliza modulación FSK (Frequency Shift Keying). Además dispone de una conexión de 51 pins para conectar dispositivos externos. Para su alimentación se necesitan 2 baterías del tipo AA. En la figura 2.4 se muestra la mota Mica2.

Para la programación de las motas y para poder visualizar los datos de las motas en un ordenador, por ejemplo, es necesario otro dispositivo. Este dispositivo es la placa de programación o MIB (Mote Interface Board), con estas placas además de poder programar las motas, podemos utilizar una de ellas como una estación base, de tal forma que funcione de pasarela entre los nodos sensores de la WSN y algún dispositivo, como un ordenador, que permita tratar la información que proviene de las demás motas. En este TFC se ha utilizado la placa de programación MIB520 mostrada en la figura 2.5.


Mote type	WeC	Rene	Rene2	Mica	Mica2	Mica2Dot
Example picture						
MCU	Chip Type	AT90LS8535	ATmega163L	ATmega103L	ATmega128L	
	Program memory (KB)	4 MHz, 8 bit	4 MHz, 8 bit	4 MHz, 8 bit	8 MHz, 8 bit	
	RAM (KB)	8	16	128	128	
		0.5	1	4	4	
External nonvolatile storage	Chip	24LC256			AT45DB014B	
	Connection type	I2C			SPI	
	Size (KB)	32			512	
Default power source	Type	Coin cell		2xAA	Coin cell	
	Typical capacity (mAh)	575		2850	1000	
RF	Chip	TR1000			CC1000	
	Radio frequency	868/916MHz			868/916MHz, 433, or 315 MHz	
	Raw speed (kbps)	10		40	38.4	
	Modulation type	On/Off key			Amplitude Shift key	Frequency Shift key

Figura 2.3 Comparación de motas fabricadas por Crossbow [6].



Figura 2.4 Mota Mica2 a 900 Mhz .



Figura 2.5 Estación base MIB520.

En la actualidad, Crossbow ha diseñado una amplia gama de sensores compatibles con la plataforma Mica2, los cuales cubren diferentes aspectos según las necesidades que se tengan. En concreto el modelo es capaz de capturar valores medios de variables ambientales, encontrándose disponibles la medición de la temperatura y la luz ambiental. Dicho modelo recibe el nombre de MDA100 y se presenta en la figura 2.6. No obstante, para los objetivos fijados en el TFC no se necesita la utilización de estos sensores, ya que no necesitamos valores ambientales para el cálculo de la posición.

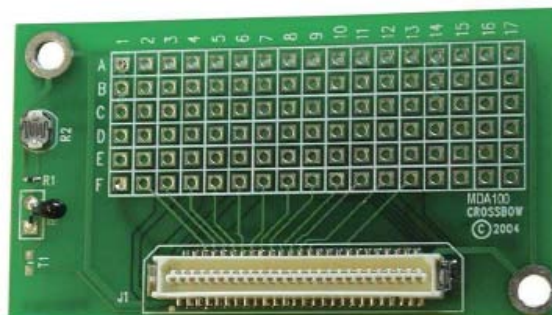


Figura 2.6. Sensor MDA100.

En concreto, para nuestra aplicación en particular, necesitaremos un mínimo de 5 motas Mica2 y una estación base MIB520. De las 5 motas necesarias, una de ellas se insertará en la estación base con el objetivo de recoger los datos enviados por las demás motas y mostrarlo por ordenador. La mota utilizada como base se le debe instalar una aplicación que permite visualizar la información proveniente de la WSN a partir de un software proporcionado por Crossbow, que explicaremos más adelante. De las 4 motas restantes, 3 de ellas se utilizarán para utilizarlas como referencia, es decir, conoceremos su posición, y la mota restante será la mota cuya posición queremos averiguar.

2.4 Sistemas operativos.

Como ya se ha visto, las necesidades que tiene un nodo de una WSN son totalmente distintas a las que pueda tener cualquier otro dispositivo como puede ser un PC, por ello los nodos de una WSN tienen sus propios sistemas operativos. Los sistemas operativos para WSN son típicamente menos complejos que los de propósito general, tanto debido a los requisitos especiales de las aplicaciones en las que se usan, como a las restricciones de recursos encontradas en las plataformas hardware utilizadas.

TinyOS es quizás el primer sistema operativo diseñado específicamente para WSN. Este sistema operativo se basa en un modelo de programación controlado por eventos. Tanto TinyOS como los programas escritos para él están escritos en un lenguaje de programación denominado nesC, que es una extensión del lenguaje de programación C y más adelante explicaremos.

También hay sistemas operativos que permiten programar en C. Por ejemplo Contiki, MANTIS, BTnut, SOS y Nano-RK.

A continuación pasaremos a explicar con más detalle el sistema operativo TinyOS, que es el que hemos utilizado en el TFC y el disponible en las motas Mica2. Para un mejor análisis de los otros sistemas operativos mencionados consultar [9].

2.4.1 TinyOS.

TinyOS es un sistema operativo diseñado especialmente para WSN. TinyOS difiere de muchos de los demás sistemas operativos en que está cuidadosamente diseñado para operaciones de muy baja potencia. TinyOS permite la creación de aplicaciones de una forma relativamente fácil, ya que proporciona un conjunto de servicios y abstracciones que pueden utilizarse para formar aplicaciones mayores. Entre estos servicios y abstracciones encontramos de sensado, comunicación, almacenamiento y temporizadores. Además, define un modelo de ejecución concurrente, con lo que los programadores pueden construir aplicaciones a partir de módulos ya hechos.

El diseño del Kernel (núcleo) de TinyOS está basado en una estructura de dos niveles de planificación: eventos y tareas.

- *Eventos*: están pensados para realizar un proceso pequeño, en el que un componente de bajo nivel avisa a otro componente de alto nivel que algo ha sucedido con alta prioridad y de este modo se interrumpe las tareas que se están ejecutando en ese momento. Ejemplo: expiración de un temporizador o recepción de una trama.
- *Tareas*: Las tareas están pensadas para hacer una cantidad mayor de procesado y no son críticas en tiempo. Las tareas son ejecutadas en su totalidad de forma asíncrona siempre que la CPU no tenga ningún evento pendiente de ejecutar. La solicitud de iniciar una tarea, y el término de ella son funciones separadas.

Con este diseño permitimos que los eventos, que se ejecutan rápidamente, puedan ser realizados inmediatamente, pudiendo interrumpir las tareas que tienen una mayor carga computacional en comparación. De esta manera se consigue un alto rendimiento en las aplicaciones de concurrencia intensiva, donde la capacidad de la CPU del dispositivo se utiliza de manera eficiente consumiendo una energía mínima.

TinyOS es un sistema operativo de distribución libre que se puede encontrar fácilmente en la página Web oficial de TinyOS [10] donde se puede encontrar sus últimas versiones y una gran variedad de tutoriales online.

2.5 Lenguajes de programación.

La programación de las motas es relativamente compleja, debido a su limitada capacidad de cálculo y la escasa cantidad de recursos. Además para los microcontroladores usados en las motas, en la actualidad, no se encuentran disponibles entornos de depuración de código, con lo que puede llegar a ser muy complicado encontrar algún error en el código. Entre los lenguajes disponibles en la actualidad para la programación de nodos sensores, encontramos:

- *NesC*: Lenguaje que se utilizará para la programación de las motas Mica2 que, como ya se ha mencionado, está directamente relacionado con TinyOS.
- *Protothreads* [11]: Lenguaje diseñado específicamente para la programación concurrente.
- *GalsC* [12]: Es un lenguaje de programación orientado a tareas, fácil de depurar y compatible con los módulos NesC de TinyOS.

2.5.1 NesC.

NesC (Network Embedded Systems C) es un lenguaje de programación con una sintaxis similar a C y está optimizado para las limitaciones de memoria y capacidad computacional presentes en las redes inalámbricas de sensores. NesC está orientado a componentes y especialmente diseñado para programar en redes de sensores bajo el sistema operativo TinyOS.

Una aplicación en NesC está formada por uno o más componentes entrelazados entre ellos. Estos componentes pueden ser componentes proporcionados por el sistema operativo TinyOS o componentes desarrollados por el programador. Los componentes que proporciona TinyOS se pueden clasificar en tres grupos [13]:

1. Abstracciones de hardware: Estos componentes mapean el hardware físico en el modelo de componentes disponibles en TinyOS.
2. Hardware sintético: Simulan el comportamiento del hardware.
3. Componentes de software de alto nivel: En estos componentes encontramos las funciones necesarias para el control, enrutamiento, transferencia de datos, cálculos, agregación de datos.

Cada componente proporciona y utiliza interfaces bidireccionales para poder comunicarse con otros componentes. Se puede realizar más de una instancia a la misma interfaz, por ejemplo en el caso que un componente necesite dos temporizadores, éste tendrá que hacer dos instancias a la interfaz que proporcione el temporizador. Gracias al uso de interfaces, se consigue una unión de componentes de manera estática, mejor análisis del programa, mayor robustez del diseño y un aumento de la eficiencia en tiempos de ejecución.

La implementación de los componentes en NesC se realiza mediante módulos y configuraciones.

Los **módulos** proporcionan el código de la aplicación donde se implementan los eventos de una o varias interfaces formadas por una agrupación de comandos y eventos, mediante los cuales conseguimos dar respuesta a algún suceso determinado como puede ser al recibir cierto mensaje desde cierto componente.

Las **configuraciones** se utilizan para ensamblar otros componentes de manera conjunta, conectando las interfaces utilizadas por los componentes con las interfaces proporcionadas por otros. Por tanto, las configuraciones se encargan de unir diferentes componentes en función de sus interfaces. En la figura 2.4 se muestra un ejemplo de código NesC. En ella podemos observar como el componente B proporciona la interfaz X al componente A para que ésta la utilice.

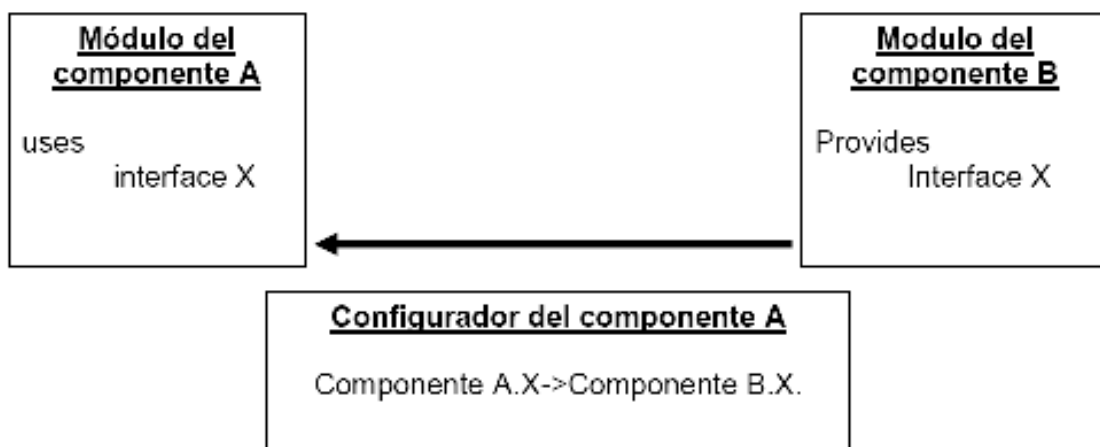


Figura 2.4 Ejemplo código NesC

2.6 Programas utilizados.

Como ya se ha dicho las aplicaciones realizadas a lo largo del TFC para realizar las distintas medidas con las motas se realizarán mediante el lenguaje de programación NesC destinado para el sistema operativo TinyOS.

Así como se ha visto en el apartado anterior, las aplicaciones para programar las motas se deben componer de dos archivos, uno con el código del módulo a implementar, que contiene la implementación de los eventos utilizados y el código para realizar la función específica de la aplicación. El otro archivo necesario es el código de la configuración que se utiliza para ensamblar distintos componentes de manera conjunta. Además para las aplicaciones que necesiten transmitir mensajes se necesitará otro archivo que describa la estructura del mensaje.

A continuación comentaremos las tres aplicaciones distintas utilizadas para programa las distintas motas. Entre estas tres aplicaciones se encuentra la aplicación de las motas cuya posición es conocida (motas anclas), la aplicación de la mota a localizar y la aplicación de la mota base. Para cada una de las aplicaciones comentaremos su función en el sistema global, su configuración y el código del módulo se adjunta en el ANEXO 3.

2.6.1 Motas anclas.

Las motas anclas son aquellas motas de la red de sensores inalámbricos cuya posición es conocida. El objetivo de estas motas es el de enviar mensaje para que la mota a posicionar pueda medir la potencia recibida a partir de la señal que transporta el mensaje. Por lo tanto la aplicación para las motas anclas simplemente debe de incluir la configuración necesaria para la transmisión de mensajes vía radio. Además en el mensaje se incluirá la posición de cada mota por si puede servir de información.

Para ver el formato del mensaje, la configuración utilizada y el código del módulo se adjuntan en el ANEXO3.

2.6.2 Mota a posicionar.

Esta mota debe ser capaz de recibir los mensajes de las motas anclas y medir la potencia a partir de la señal recibida. Para la medida de la potencia, se utiliza un campo disponible al recibir un mensaje que indica la potencia recibida, este campo se denomina *strength* y al valor que proporciona hay que realizarle una pequeña transformación para convertirlo a dBm. Esta transformación se puede consultar en el código del módulo de la aplicación incluido en el ANEXO 3. Además una vez recibido el mensaje y obtenido el valor de la potencia recibida de las distintas motas anclas se envía un mensaje en *broadcast* con los datos de todas las potencias para que la mota base pueda recibirlos y mostrarlos en el ordenador. En concreto el código está pensado para el caso en que se dispone de 6 motas anclas, pudiéndose modificar de forma sencilla para el caso de disponer de más motas anclas.

2.6.3 Mota base.

A la mota utilizada como base se le debe instalar una aplicación proporcionada por Crossbow que permite la visualización de los datos recibidos por la mota base a partir de un software, también proporcionado por Crossbow, denominado Xsniffer.

De esta manera se podrá visualizar en la pantalla del ordenador el valor de las potencias recibidas por cada mota y a continuación procesar los datos mediante MATLAB.

3. Conceptos de posicionamiento.

El objetivo principal de este capítulo es describir los conceptos necesarios para entender el sistema de posicionamiento empleado en este TFC. Como ya se ha comentado y analizaremos más adelante, nuestro método de posicionamiento se basa en las posiciones de tres motas conocidas y las distancias de éstas a la mota desconocida. Así nuestro primer objetivo es analizar la manera de calcular estas distancias a partir del hardware disponible en una red de sensores inalámbricos, este hardware es el analizado en el capítulo anterior. Para ello dedicaremos un apartado comentando distintas técnicas para el cálculo de la distancia y analizaremos las ventajas e inconvenientes de la técnica escogida. La técnica escogida se basa en la potencia recibida (RSS, Received Signal Strength), por ello se estudiarán las leyes de propagación que relacionan la potencia recibida con la distancia.

A continuación, se analizará la parametrización del escenario. Como uno de nuestros objetivos es que nuestro sistema funcione en cualquier tipo de escenario, teniendo la mota desconocida en el interior de un vehículo. Por ello más adelante se analizarán distintos escenarios, en este capítulo se dedicara un apartado para estudiar el algoritmo que se lleva acabo para calcular los parámetros que nos definirán cómo es el escenario, y más adelante se escogerán aquellos parámetros que mejores resultados nos proporcionen en el posicionamiento en los distintos escenarios.

Por último, en el apartado final del capítulo, se analizará la estimación de la posición. Principalmente se describirá el algoritmo utilizado y otros métodos de soporte a este algoritmo para las situaciones en que las condiciones necesarias para utilizarlo no se cumplen.

3.1 Estimación de la distancia.

Como se ha mencionado anteriormente, nuestra técnica de posicionamiento se basa en el cálculo de la distancia entre nodos para así poder realizar una estimación de la posición de un nodo determinado. Por lo tanto, antes de poder localizar cualquier objeto se necesitará algún método para la estimación de la distancia. A continuación se comentarán algunos de estos métodos.

3.1.1 ToA (Time of Arrival) y TDoA (Time Difference of Arrival).

La técnica de tiempo de llegada ToA consiste en medir el tiempo que tarda una señal en desplazarse de un nodo a otro, de esta manera sabiendo la velocidad de propagación en el medio se puede estimar la distancia simplemente multiplicando el tiempo de propagación por la velocidad de propagación. Por ejemplo, una señal que se propaga por el medio a una velocidad de 300 m/s (velocidad en el vacío) y ha tardado en desplazarse de un nodo a otro 15 ms, podemos estimar que la distancia entre nodos es de 4.5 m. Un inconveniente de utilizar esta técnica es que la velocidad de propagación en el medio depende de distintos factores como la temperatura y la humedad, y por lo tanto, en caso de alteración de alguno de estos factores, no es posible obtener una distancia exacta.

Adicionalmente tenemos la técnica TDoA, que hace uso de dos señales, cada una con velocidades de propagación diferentes. Generalmente, una de ellas es una señal de radio y la otra una señal acústica. Como el tiempo que tarda en llegar una señal de radio de un transmisor a un receptor situado a pocos metros es muy pequeño, se puede aproximar como un tiempo nulo. De esta manera, partiendo de la diferencia de tiempos de llegada de las dos señales y la velocidad de propagación de la señal acústica podemos obtener una estimación precisa de la distancia. Esta técnica es fiable cuando las velocidades de propagación de las dos señales son de órdenes de magnitud diferentes, ya que en caso contrario, no podríamos aproximar el tiempo de la señal de radio como cero, la estimación no sería fiable. Si denotamos T_R como el tiempo de llegada de la señal de radio, T_S el tiempo de llegada de la señal de audio y V_S como la velocidad de propagación de la señal acústica, en la figura 3.1 podemos ver el funcionamiento de la técnica TDoA.

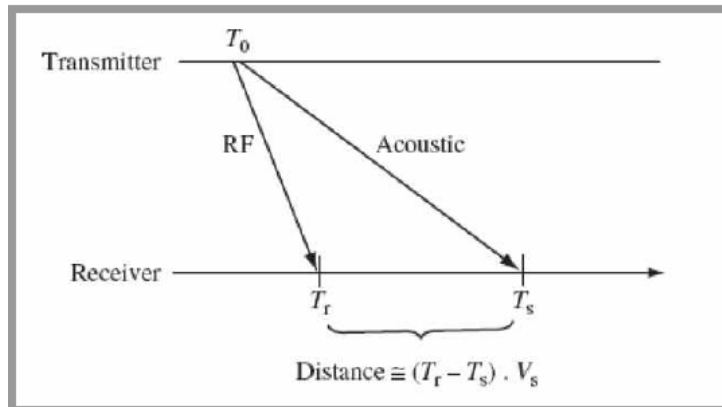


Figura 3.1 Cálculo de distancia en TDoA.

Para más información de estos métodos y otros como AoA (Angle of Arrival) consultar las referencias [14] y [15].

3.1.2 Identificador de fuerza de la señal recibida (RSSI).

Este método de estimación de la distancia es el que se empleará en nuestro sistema de posicionamiento y a continuación analizaremos con detalle.

Si observamos la variación media de la potencia de la señal recibida en un receptor, ésta decrece a medida que la distancia hasta el transmisor incrementa. Si la relación entre señal recibida y distancia es conocida, la distancia entre los dos terminales puede ser determinada, ya sea de forma analítica o empírica. En nuestro caso, si involucramos en la medida varias motas, la posición de nuestra mota desconocida podrá ser calculada mediante triangulación.

3.1.2.1 Ventajas e inconvenientes [16].

Existen varias ventajas en el posicionamiento mediante cálculos de distancias con la potencia recibida en comparación con otros métodos, comentados anteriormente, conocidos como técnicas TOF (Time Of Flight) ya que se basan en el tiempo y no en la potencia.

Los mecanismos TOF (ToA y TDoA) se basan en la medida del tiempo que tarda una onda electromagnética en recorrer cierta distancia a través de un medio determinado. Con este tiempo y la velocidad de propagación en el medio se puede, como ya hemos visto, estimar la distancia entre terminales. Si se añaden más medidas de distancias sería posible determinar la posición de algún terminal. Para nuestro caso, en el que nos basamos en el método RSSI, las medidas se basan en la potencia recibida y por lo tanto dicho procedimiento se puede llevar a cabo en cualquier sistema de comunicaciones inalámbrico sin tener que cambiar el hardware disponible. Lo único que se necesita es la capacidad de leer la RSS, mediante algún indicador RSSI que incluyen la mayoría de receptores en la actualidad. En concreto, nuestras motas disponen de dicho identificador en su módulo de radio, simplemente hay que crear una aplicación que haga las conexiones entre componentes adecuada y nos envíe mediante un mensaje la RSS medida. Si se utilizará alguno de los otros métodos se debería añadir algún tipo de hardware para las motas, que les permita conseguir, entre otras características, una sincronización aceptable.

Además para la técnica RSS el método de modulación, la tasa de datos y la precisión en tiempo del sistema no son relevantes para la toma de medidas, y tampoco se requiere coordinación ni sincronización entre transmisor y receptor. Por lo tanto, aquí tenemos otro motivo para incluir este método en un dispositivo inalámbrico como lo son las motas que forman la red de sensores inalámbricos.

Por otro lado, existen ciertos inconvenientes en implementar un sistema de localización con el método RSSI. Dadas las variaciones de la potencia recibida debido a las interferencias y al efecto multicarriño (*multipath*) que encontramos en el canal de propagación, la precisión que conseguimos con esta técnica es, en general, peor que la que se puede obtener con los procedimientos TOF. Hay que tener en cuenta que la propagación es específica en cada escenario, con lo que la técnica no proporcionará los mismos resultados, en cuanto a precisión, en todos los escenarios. Así, con el fin de conseguir una precisión suficiente, se suele utilizar más terminales fijos de referencia que los mínimos necesarios para la triangulación.

3.1.2.2 Leyes de propagación.

La variación de la potencia recibida en función de la distancia depende del entorno en el que se encuentran el transmisor y el receptor. El ejemplo más simple es cuando la transmisión se realiza en el espacio libre, es decir, en un caso ideal en el que no encontramos ningún tipo de obstáculo. No obstante, en la práctica nos encontramos con entornos que contienen objetos que reflejan, absorben u obstruyen la señal electromagnética, modificando de esta manera la potencia recibida respecto la potencia que se recibiría en el caso ideal.

En el espacio libre, se puede describir la propagación mediante la ecuación de Friis (1), donde G_r y G_t son la ganancia del receptor y del transmisor respectivamente, mientras que d es la distancia entre ambos y λ la longitud de onda ($\lambda=c/f$). Siendo P_t la potencia transmitida, y la potencia recibida en el receptor P_r .

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2} \quad (1)$$

Generalmente la ecuación (1) se expresa como el inverso de las pérdidas de canal (PL, *Path Loss*), es decir, como la ganancia del canal (PG, *Path Gain*). A partir del *path gain* se observa directamente el efecto de la RSS. Numéricamente el *path gain* es la relación entre la potencia recibida y la potencia transmitida al medio:

$$PG = \frac{P_r}{P_t \cdot G_t \cdot G_r} = \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d} \right)^2 \quad (2)$$

Normalmente se trabaja en escala logarítmica, con lo que el PG en decibelios queda descrito en la ecuación (3).

$$PG_{dB} = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d} \right) \quad (3)$$

- Path Loss, Shadowing y multipath [17].

En la práctica, la relación entre la señal recibida y la distancia no vendrá dada por la expresión (2). Realmente, la potencia recibida será la suma de una serie de señales que llegan de distintas direcciones, debido a las reflexiones con objetos cercanos y objetos que bloquean parcialmente la señal. De esta manera la potencia recibida resultante puede ser mayor o menor que la potencia que encontraríamos en caso de espacio libre. Además, si los objetos reflectantes se mueven respecto a los receptores, la potencia recibida variará con el tiempo, esto es que para una misma distancia la potencia recibida varía a lo largo del tiempo. También hay que tener en cuenta que grandes obstáculos como edificios, paredes o suelos en la línea de visión directa con el receptor atenúan la señal, reduciendo de esta manera la potencia recibida.

Estos efectos que producen una variación de la potencia recibida o del *path loss* que difieren de la variación en espacio libre son conocidos como ***shadowing y multipath***.

El *path loss* es causado por la disipación de potencia, radiada por el transmisor, debido a los efectos del canal de propagación. Como se observa en la ecuación (2) el *path gain*, que es el inverso del *path loss*, es el mismo para una distancia dada.

El ***shadowing*** es causado por los obstáculos que se encuentran entre el transmisor y el receptor y produce una atenuación de la señal a causa de la absorción, reflexión y difracción. Puede haber casos extremos donde la atenuación es lo suficientemente grande como para eliminar totalmente el nivel de señal. La variación de la potencia recibida, de forma considerable, debido al *path loss* ocurre a largas distancias (100-1000 metros) y debido al shadowing ocurre a distancias proporcionales al tamaño del objeto que obstruye la visión directa (10-100 metros en escenarios exteriores y menor en escenarios interiores). Dado que las variaciones debido al *path loss* y al *shadowing* ocurren a distancias relativamente largas, estas variaciones se suelen referir como **efectos de propagación a gran escala**.

Por último, el ***multipath*** es causado por los objetos que reflejan la señal transmitida de forma que en el receptor se obtiene una suma de señales que han llegado por distintos caminos y por ello tienen fases distintas.

Estas diferencias de fase pueden provocar, en la señal recibida resultante, interferencias constructivas i/o destructivas a lo largo del tiempo. El resultado de estas interferencias es que la señal recibida, y por lo tanto la potencia recibida, varíe muy rápidamente según el modelo de propagación en espacio libre. Concretamente la variación de la potencia recibida es del orden de la longitud de onda de la señal, con lo que estas variaciones se le suelen denominar **efectos de propagación a corta escala**. La figura 3.2 muestra la relación entre la potencia recibida y la transmitida en dB en función del logaritmo en base diez de la distancia, para los efectos combinados de *path loss*, *shadowing* y *multipath*.

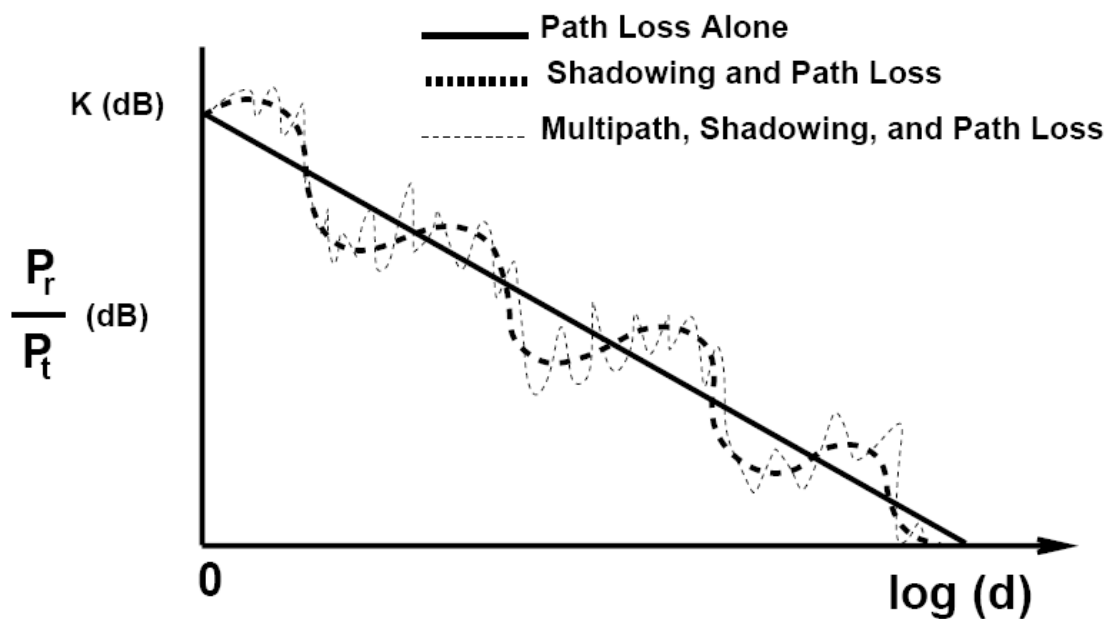


Figura 3.2 Efectos de *path loss*, *shadowing* y *multipath* en función de la distancia.

3.1.2.3 Modelos de propagación.

Muchos sistemas de comunicaciones inalámbricos operan en entornos de propagación complejos que no pueden ser modelados de forma precisa con el modelo de espacio libre. A lo largo de los años se han desarrollado un gran número de modelos para predecir el *path loss* en entornos inalámbricos típicos como grandes celdas urbanas, pequeñas celdas urbanas, y más recientemente, dentro de edificios. Estos modelos se basan principalmente en medidas empíricas realizadas a distintas distancias para un rango de frecuencias dados y en un área geográfica particular o edificio.

No obstante, estos modelos no están restringidos sólo para los entornos en los que se han realizado las medidas empíricas, sino que se pueden aplicar a aquellos entornos a los que esté destinado el modelo.

Estos modelos normalmente proporcionan la potencia media recibida o las pérdidas medias a una cierta distancia del transmisor y en general siguen la expresión definida en (4).

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{1}{L} = \frac{k}{r^\gamma} \rightarrow L = k' + 10 \cdot \gamma \cdot \log r \quad (4)$$

Entre estos modelos encontramos el modelo de Okumura [18], utilizado en grandes ciudades y es aplicable para distancias en el rango de 1-100 Km y el rango de frecuencias de 150-1500 MHz. El modelo de Hata [19] es una formulación empírica del gráfico de *path loss* proporcionado por Okumura y es válido sobre el mismo rango de frecuencias, 150-1500MHz. El modelo COST 231 [20] es una extensión del modelo Hata hasta los 2 GHz.

En el caso de espacio libre como podemos ver en (1) la distancia tiene un exponente igual a 2, por lo tanto en el caso ideal $\gamma = 2$. En interiores de edificios este factor suele ser mayor que 5 ($\gamma > 5$), aunque se puede dar el caso en el que encontramos pasillos relativamente largos, donde se puede producir un efecto de guía de onda y el exponente puede llegar a ser menor que en espacio libre ($\gamma < 2$).

3.2 Parametrización del escenario.

En el apartado anterior se ha comentado modelos que nos permiten predecir las pérdidas de propagación en unos entornos concretos y en un rango de distancias y frecuencias determinado. No obstante, también se ha visto que la técnica para el cálculo de distancias RSSI no es muy precisa, por lo tanto para obtener un posicionamiento preciso se necesitará parametrizar el escenario de tal forma que se pueda obtener las pérdidas de propagación de la forma más precisa posible. Para ello se calcularán los parámetros que definen el escenario en el que se trabajará para poder determinar las distancias con dichos parámetros.

Así para la parametrización del escenario, se estudiará previamente el entorno con el propósito de encontrar el parámetro γ que lo describe. Esta γ será única para el entorno estudiado, por ello se analizarán distintos entornos para encontrar sus γ correspondientes y para la implementación final se escogerá aquel parámetro que mejor posicionamiento nos proporcione en los distintos escenarios estudiados.

Una vez encontrado el parámetro γ , se obtendrá la distancia mediante (5) que se obtiene a partir de la expresión de *path gain* definida en (2) teniendo en cuenta que en esta expresión $\gamma = 2$.

$$P_r - P_t - G_t - G_r = 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) - \gamma \cdot 10 \log(d);$$

$$d_{dB} = 10 \log(d) = \frac{1}{\gamma} \left[P_t + G_t + G_r - P_r + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) \right] \quad (5)$$

En la expresión (5) los valores de la potencia de transmisión (P_t), la potencia recibida o RSS (P_r), y las ganancias de transmisión y recepción (G_t y G_r) están expresadas en decibelios. Así a partir de d_{dB} se puede encontrar la distancia en metros a partir de (6).

$$d = 10^{\frac{d_{dB}}{10}} \quad (6)$$

En nuestro caso no se supondrán constantes las ganancias de las antenas ni ningún parámetro que se deba obtener de las especificaciones del fabricante, ya que los datos de las especificaciones pueden no ser exactos o pueden proporcionarte un rango de valores en los que se puede encontrar el parámetro en cuestión. Por lo tanto lo que se hará será buscar tanto la γ como una nueva variable \mathbf{n} , que incluirá los valores reales de las ganancias, la potencia transmitida y demás valores que se mantengan constantes durante la transmisión como la longitud de onda, que está relacionada con la frecuencia de transmisión $\left(\lambda = \frac{c}{f}\right)$.

Como ya se comentará más adelante, minimizando el error mediante la técnica de *Least Squares* o mínimos cuadrados se encontrarán los valores de γ y n que hacen óptima la función del error derivado, y será con estos valores con los que se trabajarán en cada uno de los escenarios para el cálculo de la distancia y el posterior cálculo de la posición.

3.2.1 Cálculo de parámetros.

Como se ha comentado, se buscarán los parámetros que definan de forma eficiente los escenarios analizados. El parámetro n representará las ganancias de las antenas, la potencia de transmisión y posibles correcciones respecto la atenuación en espacio libre.

A continuación se describe el procedimiento utilizado para el cálculo de los parámetros que llamaremos n y γ . Para empezar denominamos k a todo conjunto de constantes que engloban la antena receptora y transmisora, así como la longitud de onda que se obtiene a partir de la frecuencia de trabajo. En (7) podemos ver el origen de nuestros parámetros n y γ .

$$\begin{aligned}
 P_{RX}(W) &= P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{d^\gamma} \rightarrow P_{RX}(W) = k \cdot \frac{1}{d^\gamma} \\
 P_{RX}(dBW) &= 10 \log k - 10\gamma \log d \\
 P_{RX}(dBW) &= RSS(dBW) = n - \gamma \cdot d(dB) \rightarrow y = n - \gamma \cdot \alpha \quad (7)
 \end{aligned}$$

Así, se buscarán ambos parámetros a partir de distancias empíricas, a partir de las cuales se obtendrán una serie de potencias recibidas. Al conjunto de potencias medidas le llamaremos vector \mathbf{z} . Si expresamos (7) en forma matricial obtenemos (8). Teniendo en cuenta que $\alpha_i = 10 \log(d(m)) = d(dB)$. Definiendo el vector error \mathbf{e} como $\mathbf{z}-\mathbf{y}$ el método aplicado de *Least Squares* [21] es el mostrado en (9). De la definición del vector error, podemos obtener (10). Representando el exponente \mathbf{H} al término hermético, que es equivalente a realizar la matriz conjugada y luego la transpuesta.

$$\underline{z} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_N \end{pmatrix}; y_i = n - \gamma \cdot \alpha_i$$

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_1 \\ 1 & \alpha_2 \\ \dots & \dots \\ 1 & \alpha_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n \\ -\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n - \gamma \cdot \alpha_1 \\ n - \gamma \cdot \alpha_2 \\ \dots \\ n - \gamma \cdot \alpha_N \end{pmatrix} \rightarrow \underline{y} = \underline{A} \cdot \underline{b} \quad (8)$$

$$\text{error : } \underline{e} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_N \end{pmatrix} = \underline{z} - \underline{y} \rightarrow \text{LeastSquares : } \|\underline{e}\|^2 = \sum_{i=1}^N |e_i|^2 = \underline{e}^H \cdot \underline{e} \quad (9)$$

$$\underline{e} = \underline{z} - \underline{y} = \underline{z} - \underline{A} \cdot \underline{b} \rightarrow \begin{cases} \underline{e}^H = \underline{z}^H - \underline{b}^H \cdot \underline{A}^H \\ \underline{e} = \underline{z} - \underline{A} \cdot \underline{b} \end{cases} \quad (10)$$

Teniendo en cuenta la propiedad $\min_{\underline{b}} (\underline{e} \cdot \underline{e}^H) = \frac{\partial \underline{e}^H \cdot \underline{e}}{\partial \underline{b}^H}$, si queremos encontrar los parámetros n y γ , representados por el vector \mathbf{b} , que minimizan el error, se debe igualar la expresión anterior a 0 y se encuentra el resultado mostrado en (11).

$$\left(\frac{\partial \underline{e}^H}{\partial \underline{b}^H} \right) \cdot \underline{e} = \frac{\partial (\underline{z}^H - \underline{b}^H \cdot \underline{A}^H)}{\partial \underline{b}^H} \cdot (\underline{z} - \underline{A} \cdot \underline{b}) = -\underline{A}^H (\underline{z} - \underline{A} \cdot \underline{b}) = -\underline{A}^H \cdot \underline{z} + \underline{A}^H \cdot \underline{A} \cdot \underline{b} = 0$$

$$\underline{A}^H \cdot \underline{A} \cdot \underline{b} = \underline{A}^H \cdot \underline{z} \rightarrow \underline{b} = (\underline{A}^H \cdot \underline{A})^{-1} \underline{A}^H \cdot \underline{z} \quad (11)$$

Con las medidas empíricas realizadas en el escenario se crea el vector \mathbf{z} a partir de las potencias obtenidas en dB (dBW o dBm), la matriz \mathbf{A} consta de una columna de 1 y otra columna con las distancias en dB que se corresponden con las potencias del vector \mathbf{z} .

Recordando que el vector \mathbf{b} contiene las soluciones $\underline{b} = \begin{pmatrix} n \\ -\gamma \end{pmatrix}$, se buscarán los valores de los parámetros mediante MATLAB. El procedimiento en MATLAB será el siguiente:

```
A=[] % matriz con las distancias, 10*log(d)
```

```
Z=[] % vector con las potencias en dBm
```

```
b=((inv((A')*A))*A')*z % vector b con los parámetros del escenario
```

De esta forma se habrá conseguido parametrizar el escenario y con estos valores de n y γ se podrá describir cómo será la recta de propagación en nuestro escenario, como se puede observar en la figura 3.3.

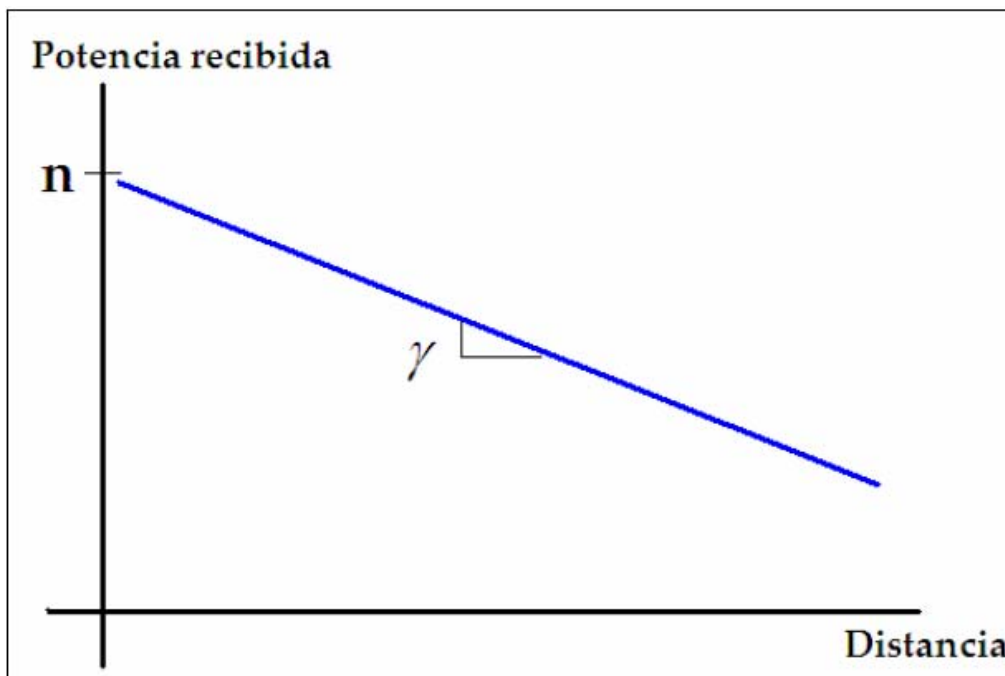


Figura 3.3 Recta de propagación.

3.3 Estimación de la posición.

A continuación se estudiará la manera de calcular la posición de un terminal situado en un plano, en el que encontramos tres estaciones bases cercanas, en nuestro caso tres motas anclas (motas cuyas posiciones son conocidas), BS1, BS2 y BS3, que se encuentran a distancias d_1 , d_2 y d_3 respectivamente de la mota a localizar. El escenario a analizar es el mostrado en la figura 3.3. El procedimiento que se ha utilizado es el procedimiento tratado en [22]. Recordar que las posiciones de las tres motas anclas son conocidas con antelación, y las distancias han sido calculadas mediante alguno de los métodos expuestos con anterioridad, de manera que la única incógnita es la posición del terminal, es decir las coordenadas (x, y) . En nuestro caso las distancias serán calculadas a partir de las medidas de potencia RSS indicadas por los terminales receptores. El caso representado en la figura 3.3 es el mínimo requerido para los cálculos, es decir cuando buscamos la posición con la ayuda de tres motas anclas. Teniendo en cuenta que las medidas de distancia pueden estar sujetas a imprecisión, debido al ruido, interferencias o multicamino, la precisión del posicionamiento puede ser mejorada incorporando un gran número de motas anclas, en vez del mínimo requerido para una estimación de la posición. Además observamos que el ejemplo de la figura 3.4 sitúa dos de las motas anclas en el eje x y la otra fuera de él. Se ha elegido esta situación para simplificar los cálculos, pero se puede generalizar a partir de una transformación de coordenadas a partir de una translación y rotación. Así para un escenario en general podríamos encontrar la situación mostrada en la figura 3.5.

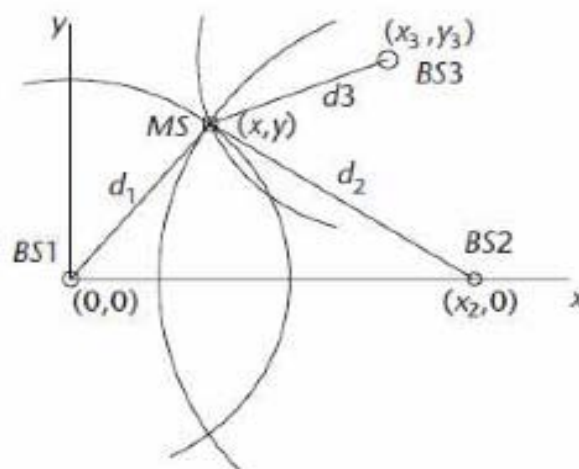


Figura 3.4 Escenario para la localización a partir de tres motas anclas.

Si las distancias reales d_1 , d_2 y d_3 pudieran ser medidas de forma exacta, las coordenadas del terminal serían el punto situado en la intersección de los círculos centrados en las motas anclas y con radio igual a las distancias hasta el terminal. Por lo tanto, teniendo en cuenta que las distancias medidas no serán exactas, los círculos pueden no cruzarse en un mismo punto, así que será necesario establecer un criterio para decidir las coordenadas de la posición estimada.

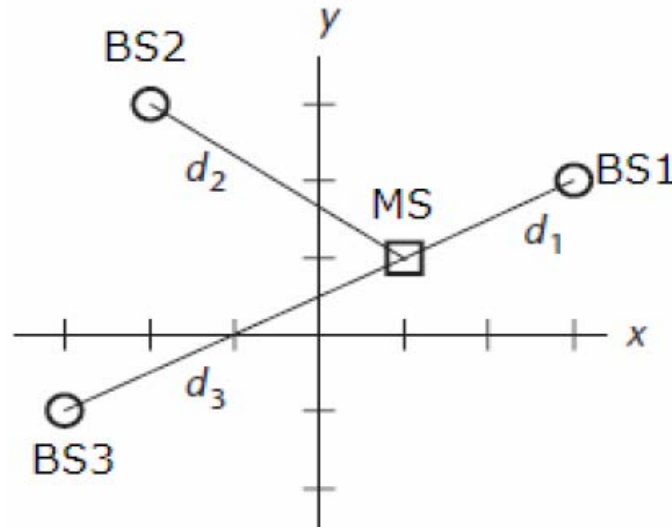


Figura 3.5 Escenario de posicionamiento generalizado.

Las ecuaciones en (12) se corresponden con los círculos definidos por las posiciones de las motas anclas, (BS1, BS2 y BS3) con las distancias medidas d_1 , d_2 y d_3 . La técnica de posicionamiento se basa en el método LS (*Least Squares*) para minimizar el error, es decir se buscan las coordenadas x_e y y_e que minimicen la función F descrita en (13). En nuestro caso el número de motas anclas y de posición conocida es $M=3$, que es el mínimo necesario.

$$\begin{aligned} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 &= d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 &= d_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 &= d_3^2 \end{aligned} \tag{12}$$

$$F = \sum_{i=1}^M \left(\sqrt{(x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2} - d_i \right)^2 \tag{13}$$

Las coordenadas x_e e y_e que minimizan la expresión no lineal F pueden encontrarse mediante un algoritmo iterativo basado en una expansión de las series de Taylor. No obstante, este método puede consumir mucho tiempo y por lo tanto puede ser ineficiente en algunas aplicaciones. Hay una manera alternativa para resolver F a partir de unas expresiones cerradas. Si trabajamos un poco (12) podemos obtener (14) que no es más que un sistema lineal de ecuaciones en x , y .

$$\begin{aligned}(x_1 - x_2)x_e + (y_1 - y_2)y_e &= \frac{1}{2}(x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + d_2^2 - d_1^2) \\(x_1 - x_3)x_e + (y_1 - y_3)y_e &= \frac{1}{2}(x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 + d_3^2 - d_1^2)\end{aligned}\quad (14)$$

El sistema representado en (14) se puede expresar en forma matricial como:

$$\begin{aligned}A \cdot P_e &= b \\A &= \begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \end{bmatrix} \\b &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + d_2^2 - d_1^2 \\ x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 + d_3^2 - d_1^2 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Obteniendo la solución expresada en (15).

$$P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot b \quad (15)$$

Así se puede obtener la posición del terminal resolviendo la expresión mostrada en (15) mediante MATLAB.

Se podría realizar un programa para la mota desconocida que resolviera las ecuaciones cerradas que forman el sistema en (15), no obstante se decidió procesar los datos mediante MATLAB y para la demostración del correcto funcionamiento de la plataforma de posicionamiento del proyecto XALOC, realizada por la UAB, se desarrollará una aplicación en Java que realice los cálculos para la resolución de (15) a partir de los datos obtenidos por la mota desconocida, que pasará los datos en tiempo real a dicha aplicación. Esta aplicación proporcionará una interfaz gráfica que permitirá seguir la trayectoria del vehículo en el que se encuentra la mota.

Se ha comentado que para combatir las imprecisiones a las que está expuesta la técnica de RSSI se pueden incorporar más motas anclas de las necesarias. De esta manera si se dispone de N motas anclas las matrices **A** y **b** son las mostradas en (16). Para el cálculo de la posición se utiliza igualmente (15).

$$A = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \\ \dots & \dots \\ x_1 - x_N & y_1 - y_N \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$b = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + d_2^2 - d_1^2 \\ x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 + d_3^2 - d_1^2 \\ \dots \\ x_1^2 - x_N^2 + y_1^2 - y_N^2 + d_N^2 - d_1^2 \end{bmatrix}$$

3.3.1 Técnicas de posicionamiento adicionales.

El método comentado con anterioridad necesita al menos tres motas anclas para poder realizar tres medidas de distancia y a continuación estimar la posición de una cuarta mota. Además se ha comentado que se pueden añadir motas, para así tener más medidas de distancia, para combatir la imprecisión de las medidas obtenidas. No obstante, hasta ahora no se ha comentado como actuar ante la ausencia de una o dos de las tres motas necesarias.

A continuación se comentan dos métodos, alternativos a la técnica de triangulación explicada, que se pueden utilizar en caso de disponer solamente de una o dos motas anclas.

- Caso de tener 1 mota ancla.

Este caso es un poco inusual, ya que se dispondrá de un despliegue de motas anclas en el que se encuentran emparejadas a distinta distancia, es decir, se encuentran dos motas anclas vecinas cada cierta distancia, tal y como muestra la figura 3.6 donde la mota a localizar normalmente se sitúa entre éstas.

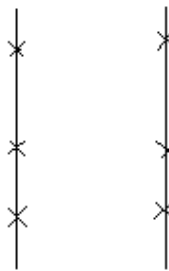


Figura 3.6. Despliegue habitual de las motas anclas.

De esta manera si se supone que el vehículo circula por el medio del carril formado por las dos hileras de motas, la mota en el interior debería recibir como mínimo de dos motas la misma potencia o si no un nivel parecido.

No obstante, se puede dar el caso que se agote la batería de alguna mota y sólo se recibiera señal de una. En este caso sólo se dispondría de una medida de distancia y por lo tanto no se podría aplicar la técnica de triangulación explicada.

Una opción sería decir que la posición de la mota desconocida es la misma que la de la mota de la que recibimos potencia. De esta manera, suponiendo que están a la misma altura, sólo cometeríamos error en una coordenada y sería como máximo igual a la mitad de la distancia entre motas anclas vecinas, suponiendo que se separan unos 5 metros, el error obtenido con este método sería de unos 2,5. No obstante, como sabemos que los vehículos circularán por la mitad del carril formado por las dos hileras de motas, podríamos hacer que en vez de igualar la posición estimada a la posición de la mota de la que recibimos potencia, se podría mantener la coordenada de altura y a la otra asignarle el valor de la mitad de la distancia entre motas anclas vecinas.

Por ejemplo, si las coordenadas de la única mota ancla de la que recibimos potencia es (0,6) y la de su vecina (5,6) la distancia entre motas anclas vecinas es de 5 metros, con este método estimaríamos la posición (2.5, 6). Así si la posición real es (2, 5), con la primera alternativa se estimaría la posición (0,6) obteniendo un error de unos 2 metros y con la segunda el error sería de aproximadamente un metro.

De esta manera, en el caso que sólo se reciba potencia de una mota ancla, y por lo tanto no se pueda aplicar la técnica de triangulación, utilizaremos el método explicado:

A la coordenada vertical estimada se le asigna el valor de la coordenada vertical de la mota ancla de la que recibimos. A la coordenada horizontal estimada se le asigna el valor de la mitad de la distancia entre motas anclas vecinas.

- Caso de tener 2 motas anclas.

En el caso que sólo se reciba potencia de 2 motas anclas se supone que estas motas son motas vecinas. Por lo tanto una alternativa interesante sería obtener la posición estimada a partir de la media de las posiciones de las motas anclas de las que recibimos. Así por ejemplo si la posición de la primera mota ancla es (0,3) y el de la segunda (5,3) la posición estimada sería (2.5, 3). Suponiendo que la distancia real es (2, 2.5) se obtiene un error de unos 70 cm.

No obstante puede darse el caso que las 2 motas de las que se recibe no sean vecinas, de esta manera pueden estar en el mismo lado, es decir en el mismo eje horizontal, pero a distinta altura (eje vertical), o a distinto lado y distinta altura. En el segundo caso se puede considerar que las motas siguen siendo vecinas aunque a distinto nivel y por lo tanto se puede seguir aplicando el mismo método, es decir estimamos la posición como la posición media de las 2 motas anclas de las que recibimos. Pero en el caso que las 2 motas estén en el mismo lado y por lo tanto las motas no son vecinas, se podría mejorar la técnica utilizando el método en el que sólo disponemos de una mota, pero ahora en la coordenada vertical le asignamos el valor de la mitad de la distancia entre las 2 motas.

De esta manera, en el caso que sólo se reciba potencia de dos motas anclas aplicaremos el procedimiento comentado a continuación:

- 1. si las motas son vecinas se calculará la posición estimada como la posición media de las posiciones de las 2 motas anclas, es decir, la coordenada horizontal estimada será la media de las coordenadas horizontales de las motas anclas, y la coordenada vertical estimada será la media de las coordenadas verticales de las motas anclas.*
- 2. si las motas no son vecinas se calculará la posición estimada como en el método cuando sólo tenemos 1 mota ancla pero asignando a la coordenada vertical el valor de la mitad de la distancia entre las 2 motas, es decir, a la coordenada horizontal estimada le asignamos el valor de la mitad de la distancia entre motas vecinas, y a la coordenada vertical estimada se le asigna el valor de la distancia entre las 2 motas de las que recibimos potencia.*

4. Campaña de medidas.

En este capítulo se estudiarán las medidas realizadas para analizar la precisión de nuestro método de posicionamiento. Para ello como se comentó en el capítulo 3, antes de poder estimar la posición de un terminal es necesario obtener unos parámetros que modelen las pérdidas de propagación de forma exacta. De esta manera, con estos parámetros podremos calcular las distancias de las motas anclas hasta el terminal a posicionar y una vez obtenidas podremos emplear el método de posicionamiento comentado.

El capítulo lo estructuraremos en cuatro apartados. En el primero se comentará los escenarios utilizados para obtener los parámetros n y γ . A continuación se analizarán las medidas realizadas en los escenarios elegidos y los parámetros resultantes obtenidos con MATLAB. Más adelante, se comentarán las medidas obtenidas en el posicionamiento en los distintos escenarios para los diferentes parámetros obtenidos. Por último se analizarán los resultados obtenidos con el posicionamiento en el interior de un vehículo con los parámetros obtenidos en el apartado dos.

4.1 Escenarios de trabajo.

Como se ha comentado varias veces encontraremos distintos parámetros n y γ para poder escoger uno que proporcione unos resultados aceptables en el posicionamiento de una mota. A continuación se comentan los diferentes escenarios en los que hemos realizado medidas para analizar nuestro sistema de posicionamiento. En realidad se analizaron más escenarios de los comentados a continuación, no obstante los resultados obtenidos de ellos no nos proporcionaban un posicionamiento eficiente y por lo tanto no los incluiremos a continuación pero se pueden encontrar en el ANEXO 1.

4.1.1 Escenario1: Escenario descampado.

El primer lugar donde se plantea realizar medidas para la obtención de los parámetros deseados es en un escenario que pueda modelar una propagación en espacio libre.

Por ello el primer escenario escogido es un terreno llano, completamente asfaltado, por donde no pasa ningún tipo de vehículo (en algún momento alguna persona en bicicleta o corriendo), ya que se encuentra en una calle cortada. Por lo tanto al ser un terreno llano y asfaltado se pretende eliminar la atenuación debida a la difracción provocada por el suelo y las interferencias constructivas y destructivas debidas al multicamino. Por lo tanto con este escenario se pretende obtener una γ de aproximadamente 2. Por último, comentar que las medidas se realizaron hasta una distancia de 40 metros, con una separación entre medida de 5 metros, ya que a partir de esa distancia se notó que llegábamos al límite de la sensibilidad de las motas, es decir, llegábamos a un valor tan pequeño que las motas no podían medirlo y nos proporcionaba el mismo valor por mucho más que nos alejásemos.

4.1.3 Escenario2: Parking de 40 metros de longitud.

En este caso se tomarán medidas en un parking interior, concretamente en un sector donde se encuentra un pasillo de 40 metros en el que se encuentran obstáculos como columnas que separan las plazas de parking, paredes o coches estacionados. En este caso al tratarse de un escenario en el que encontramos obstáculos entre la visión del receptor y el transmisor podemos pensar en una γ superior a 2, de aproximadamente 5. También se puede dar el caso de que se produzca efecto de guía de onda, entonces encontraremos un parámetro menor que dos.

4.1.4 Escenario3: Parking exterior.

Los dos siguientes escenarios son más reales que los anteriores. En los anteriores se situaba la mota transmisora en un punto determinando y a continuación se realizaban medidas a una distancia más alejada, pero siempre en la misma recta. A continuación se describen dos escenarios donde las motas transmisoras se sitúan en lugares donde se podrían situar en la práctica, es decir, en plazas de aparcamiento a distintas distancias, donde puede encontrarse un coche estacionado o no.

En la figura 4.1 se muestra el cuarto escenario utilizado para la toma de medidas en un parking al aire libre. En ella, los cuadrados en blanco representan motas libres, es decir, motas situadas en un aparcamiento pero sin coche encima.

Los cuadrados en negro representan motas situadas debajo de un coche. Los rectángulos negros son coches que se encuentran estacionados en alguna plaza del parking y el cuadrado rojo representa la mota con la que tenemos en cuenta las medidas, es decir la mota receptora, en esta obtenemos la medida de la potencia recibida de las señales transmitidas por las demás motas. Esta mota está situada debajo de un coche.

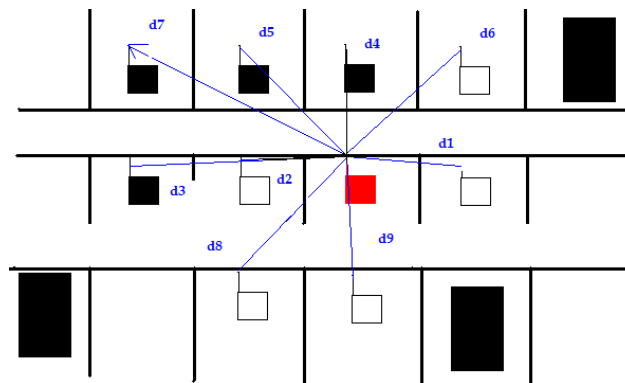


Figura 4.1. Representación del escenario4. Se medirá la potencia que recibe la mota roja de las demás motas, para las distintas distancias (d1,..., d9).

4.1.5 Escenario4: Parking interior.

Este escenario se sitúa en el mismo parking interior que en el del escenario 2. No obstante en este caso el escenario tomado es el que se muestra en la figura 4.2. Igual que antes, los cuadrados en blanco representan motas libres (sin coche encima), los negros motas ocupadas (con coche encima) y el rojo representa la mota receptora que tiene la misma función que en el escenario4. Los espacios en negro representan paredes y las líneas diagonales más gruesas representan columnas.

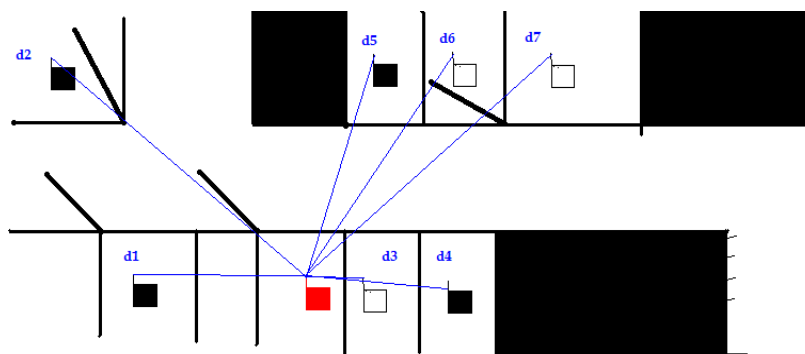


Figura 4.2. Representación del escenario5. Como antes, se medirá las potencias recibidas por la mota roja para las diferentes distancias (d1,...,d7).

4.2 Cálculo de los parámetros.

A continuación se muestran las medidas tomadas en los distintos escenarios comentados y los parámetros obtenidos, comentando las conclusiones de los resultados.

4.2.1 Escenario1.

Recordar que en este escenario se pretende encontrar una γ que describa la propagación en espacio libre, así teniendo en cuenta que en la realidad no será una $\gamma = 2$ como en espacio libre ya que se producirá algún tipo de reflexión, pero debe tener un valor cercano a 2. En la tabla 1 se muestra el conjunto de medidas tomadas en el escenario1.

En este caso, al tratarse de un escenario libre de obstáculos, las medidas de RSS en cada distancia se mantenían constantes, así que en cada posición basta con coger 2 o 3 medidas de la potencia recibida, ver que no varía y si varía alguno de los valores, se puede realizar la media o descartar algún valor si es muy dispar del resto.

Para encontrar los parámetros n y γ utilizamos las 6 medidas, y el procedimiento descrito en el apartado 3.2.1, donde la matriz \mathbf{A} está formada por una columna de 1 y otra con las distancias en dB y el vector \mathbf{z} contiene las potencias recibidas en dB, de manera que se encuentra la solución mostrada en (17).

Distancia (dB)	Distancia (m)	RSSI (dBm)
0	1	-49
6,98	5	-74
10	10	-82
11,76	15	-83
13,01	20	-86
13,97	25	-90

Tabla 1. Medidas de potencia en el escenario1.

$$\underline{\mathbf{b}} = \begin{pmatrix} n \\ -\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -51.01 \\ -2.83 \end{pmatrix} \Rightarrow \boxed{n = -51.01 \quad \gamma = 2.83} \quad (17)$$

Como se observa la γ es aproximadamente igual a 3 lo que no equivale a lo que esperábamos, todo y que ya teníamos en cuenta que no sería exactamente igual a 2 ya que se podría producir algún tipo de reflexión. No obstante, el resultado de este parámetro es debido a la absorción de la señal por el suelo, ya que las motas se encuentran situadas a ran de suelo y por lo tanto se produce el efecto mostrado en la figura 4.3. En la práctica, para tomar medidas limpias, a la hora de realizar las medidas los terminales deben estar situados en un lugar en el que no se presente ningún obstáculo en un radio de $2 \cdot \lambda$ metros. Así, en nuestro caso como el suelo se encuentra a una distancia menor que $2 \cdot \lambda$ metros se puede considerar un obstáculo y por ello se encuentra un aumento de la atenuación con respecto al aire libre. Por lo tanto si quisiéramos tomar unas medidas limpias, es decir, sin que afecte ningún obstáculo a las medidas, en este escenario, deberíamos elevar las motas una distancia de $2 \cdot \lambda$ metros, teniendo en cuenta una frecuencia de trabajo de 900MHz encontramos una distancia igual a 66 centímetros. No obstante, como nuestra aplicación está pensada para que las motas se sitúen a ran de suelo, nos interesa modelar este efecto y por lo tanto el parámetro sería correcto para la situación en concreto del escenario1.

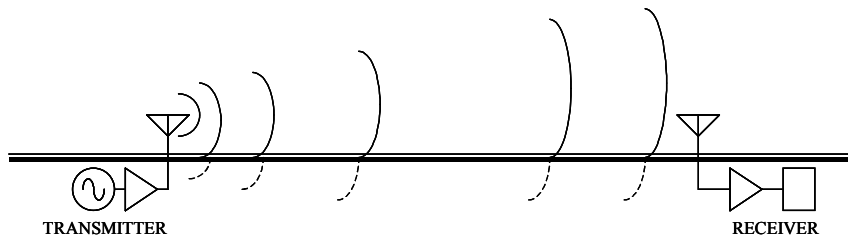


Figura 4.3. Representación del efecto producido por la absorción de la señal por el suelo.

Si se calculan los parámetros sin tener en cuenta la primera medida encontramos el resultado mostrado en (18) donde encontramos una γ aproximadamente igual a 2.

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} n \\ -\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -59.61 \\ -2.09 \end{pmatrix} \Rightarrow n = -59.61 \quad \gamma = 2.09 \quad (18)$$

Se puede observar en la tabla1 como la diferencia del nivel de señal entre la primera medida y la segunda es grande en comparación con la diferencia del resto de medidas. Con esto se comprueba cómo el efecto suelo afecta más a cortas distancias que a largas distancias, y por ello si incluimos la primera medida, que incluye el efecto a cortas distancias, obtenemos una pendiente de atenuación mayor.

Se han representado las figuras 4.4 y 4.5 para mostrar la variación de la potencia recibida y comprobar que realmente el escenario representa un espacio libre de obstáculos y ver que la pendiente de pérdidas es realmente la encontrada con las 6 medidas de la tabla1.

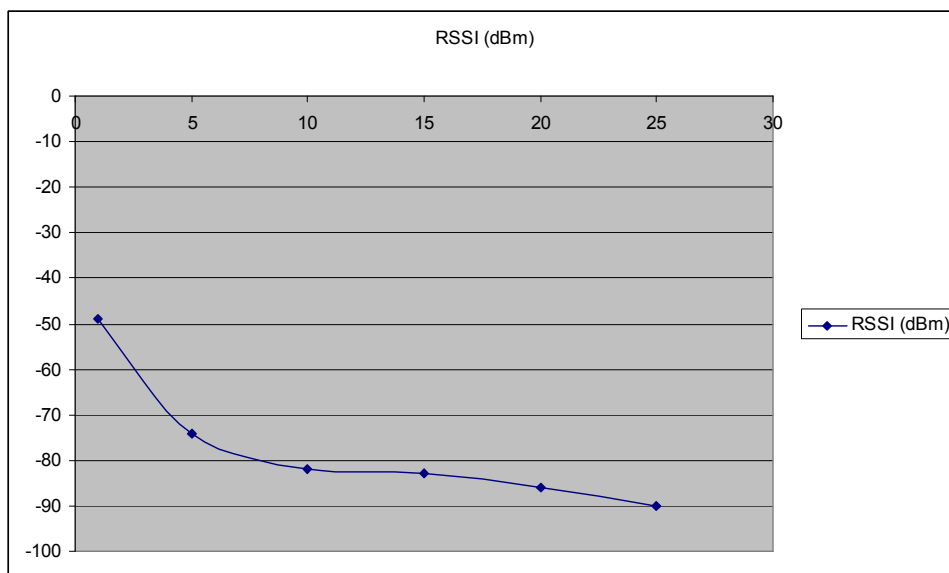


Figura 4.4. Representación de la potencia recibida en dBm en función de la distancia en metros.

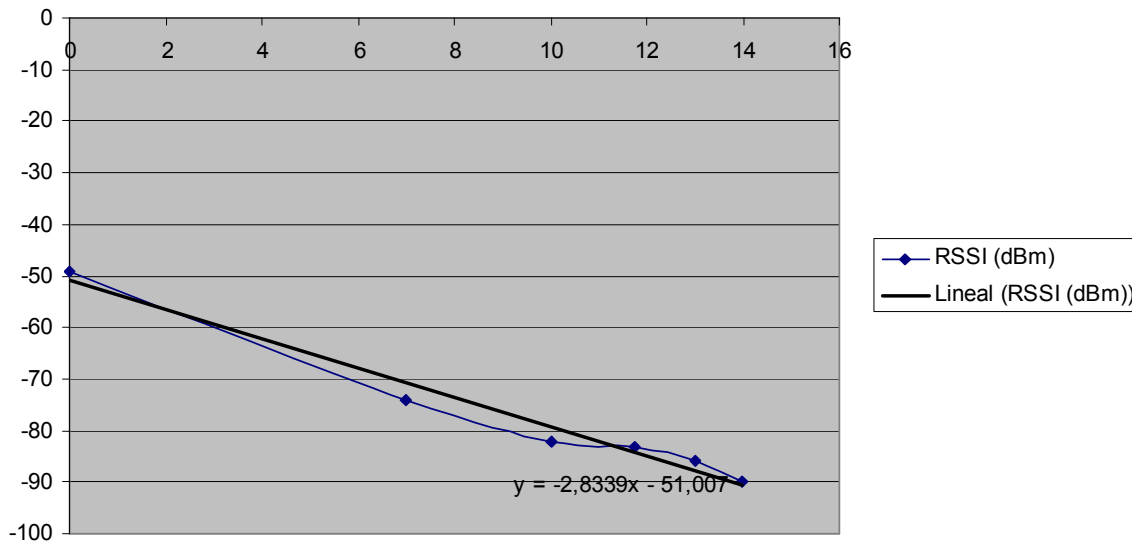


Figura 4.5 Representación de la potencia recibida en dBm en función de la distancia en dB. También se incluye la recta de regresión lineal, cuya pendiente es el parámetro γ encontrado y cuyo origen es n .

4.2.2 Escenario2.

En este escenario se pretende analizar los parámetros en un escenario interior y poder apreciar así los efectos que se producen en dichos escenarios. En la tabla 2 se muestran las medidas tomadas en el escenario 2. Con dichas medidas y aplicando el método para encontrar los parámetros encontramos los valores mostrados en (19).

Distancia (dB)	Distancia (m)	RSSI (dBm)
0	1	-49
6,98	5	-68
10	10	-61
11,76	15	-71
13,01	20	-70
13,97	25	-72
14,77	30	-84
15,44	35	-87
16,02	40	-88

Tabla 2. Medidas de potencia en el escenario 2.

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} n \\ -\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -47.01 \\ -2.22 \end{pmatrix} \Rightarrow n = -47.01 \quad \gamma = 2.22 \quad (19)$$

Como podemos ver en (19) en este escenario obtenemos una γ aproximadamente igual 2, con lo que no vemos reflejado el efecto del aumento de pérdidas en interiores. Sin embargo también se ha comentado que en interiores con pasillos largos se puede producir un efecto en el que la onda se propaga de forma guiada, entre el suelo y el techo, de tal forma que la atenuación no es tan importante. No obstante, en estos casos que se produce el guiado de la onda la γ suele ser inferior que 2, con lo que, a primera vista, no concuerdan los resultados. Pero hay que tener en cuenta, igual que antes, el efecto suelo. Si nos fijamos en las dos primeras medidas de la tabla 2, observamos que el nivel de la potencia recibida cambia considerablemente de una distancia a otra, sin embargo la diferencia entre las demás medidas no son tan destacables. Por lo tanto, si no incluyéramos la primera medida en el cálculo obtendríamos una $\gamma < 2$.

En las figuras 4.6 y 4.7 podemos observar la relación entre la potencia recibida con la distancia en metros y la potencia recibida con la distancia en dB, respectivamente.

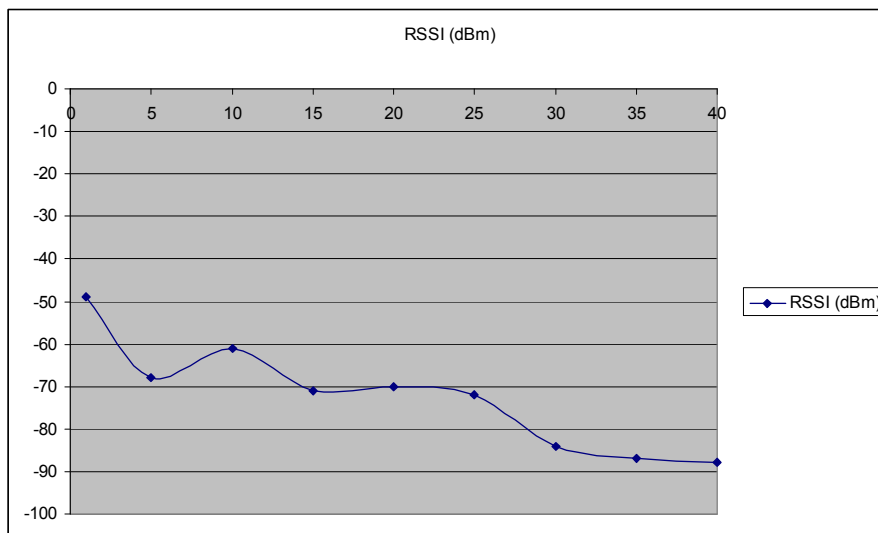


Figura 4.6. Representación de la potencia recibida en dBm en función de la distancia en metros, para el escenario2.

En la figura 4.6 se puede ver como aparecen interferencias destructivas y constructivas en determinadas distancias debido a los rayos reflejados en las paredes, en los coches y en cualquier obstáculo que se encuentra alrededor. En este caso, igual que en el anterior, la potencia en una distancia determinada no vería a lo largo del tiempo, esto es debido a que tanto el entorno como el receptor están estáticos y por ello la variación de la potencia con la distancia en este escenario sigue una variación a largo plazo, igual que en el caso de considerar *path loss* y *shadowing* (Figura 3.2). La figura 4.7 muestra la recta de propagación, donde se puede comprobar el valor de los parámetros obtenidos.

Comentar que este escenario se ha incluido para mostrar los efectos de interferencias constructivas y destructivas, donde el valor a una distancia dada y el de a otra distancia un poco más separada puede variar alrededor de 10 dBm, ya que los resultados que nos proporcionarían estos parámetros no son satisfactorios.

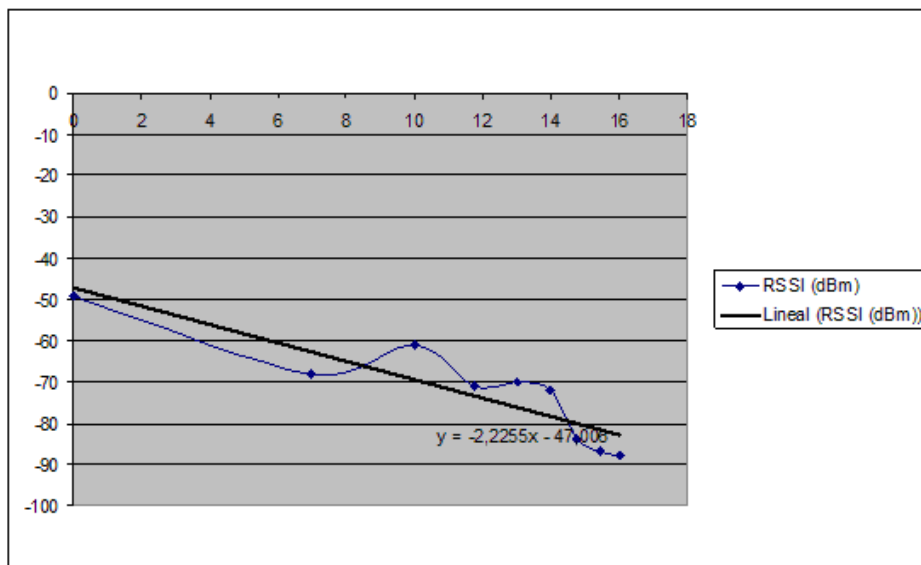


Figura 4.7 Representación de la potencia recibida en dBm en función de la distancia en dB, para el escenario 2.

4.2.3 Escenario 3.

Como ya se ha comentado este escenario, como el siguiente, es más realista ya que situaremos las motas en plazas de aparcamiento, en este caso de un parking exterior.

Este escenario es el descrito en la figura 4.1 y los resultados obtenidos son los mostrados en la tabla 3. En este caso en la mayoría de los casos el valor de la potencia no se mantenía constante en un valor, si no que presentaba una oscilación. En estos casos se han cogido 10 valores en cada posición y se a realizado la media cuyos valores son los mostrados en la tabla 3.

Con las medidas de la tabla 3 y la técnica utilizada hasta ahora se obtienen los parámetros mostrados en (20). Como se puede observar se obtiene una γ aproximadamente igual a 3.

	Distancia (m)	Distancia (dB)	Potencia (dBm)
D1	2	3,01	-69
D2	2	3,01	-57
D3	4	6,02	-70
D4	9	9,54	-91
D5	9,22	9,64	-91
D6	9,22	9,64	-86
D7	9,85	9,93	-81
D8	13,15	11,18	-90
D9	13	11,13	-84

Tabla 3. Medidas de potencia en el escenario 3.

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} n \\ -\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -53.07 \\ -3.29 \end{pmatrix} \Rightarrow n = -53.07 \quad \gamma = 3.29 \quad (20)$$

En este caso se debe tener en cuenta que, todo y que el escenario esta al aire libre, tenemos una serie de obstáculos como vehículos estacionados, vehículos circulando por la carretera cercana, árboles, farolas,....., que afectan a la propagación de las señales.

Con lo que nos encontraremos con un parámetro mayor que en el caso del escenario 1. Además hay que considerar que a parte de estar en el suelo, la mota esta situada debajo de un vehículo con lo que la visión directa con las demás motas se verá afectada. Por todos estos factores se obtiene una pendiente mayor en la recta de propagación que en el caso de espacio libre.

4.2.4 Escenario 4.

Este escenario también sitúa las motas en aparcamientos de coche, pero en este caso el parking es subterráneo. Concretamente el parking en que se tomaron las medidas es el mismo que en el escenario 2. Este escenario está representado en la figura 4.2 y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4. Los parámetros obtenidos a partir de estas medidas son los mostrados en (21).

	Distancia (m)	Distancia (dB)	Potencia (dBm)
D1	4	6,02	-62
D2	8	9,28	-88
D3	2,5	3,97	-62
D4	4	6,02	-82
D5	6,32	8	-76
D6	7,22	8,58	-78
D7	7,81	8,92	-79

Tabla 4. Medidas de potencia en el escenario 4.

Si se observan las medidas para las distancias D1 y D4, que son la misma (4 m), se ve s que la potencia recibida no es la misma, con lo que se puede decir que en dicho escenario se encuentran también interferencias constructivas y destructivas. También se puede observar que el valor máximo obtenido es de -62 dBm para las distancias D1 (4 m) y D3 (2.5 m). Este valor es muy pequeño (0.63 μ W), además se puede ver con las potencias recibidas a las distancias D1 (4 m) y D2 (8 m) , que al doblar la distancia la potencia disminuye en el orden de 20 dBm. Por lo tanto con estos resultados, se puede decir que el escenario 4 se comporta como un escenario interior en el que su γ es mayor que 2 (aprox. 5).

La γ obtenida en (21) es aproximadamente 4 con lo que se obtiene una pendiente de la recta de propagación bastante mayor que para el caso de los escenarios anteriores.

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} n \\ -\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -47.05 \\ -3.86 \end{pmatrix} \Rightarrow n = -47.05 \quad \gamma = 3.86 \quad (21)$$

4.3 Cálculo de la posición.

A continuación se utilizarán los parámetros obtenidos en el apartado anterior para calcular las distancias entre motas y poder así estimar la posición de la mota. El método para estimar la posición es el método definido mediante el criterio de *Least Squares* explicado en el capítulo anterior.

Como se han estudiado distintos escenarios para la posición, se comentarán en profundidad 2 de ellos, incluyendo el resto en el ANEXO 2, ya que son lo que más información nos proporciona.

Para cada uno de los escenarios estudiados individualmente se expondrán los siguientes datos:

- Explicación de la situación de las motas anclas utilizadas y de la mota desconocida.
- Tabla con las posiciones y distancias reales entre las motas.
- Tabla con la RSS obtenida por cada una de las motas anclas, y la distancia que se ha estimado mediante cada uno de los parámetros encontrados anteriormente. Los parámetros encontrados en el escenario 2, como ya se ha dicho, no se utilizarán, ya que proporciona unos malos resultados.
- Tabla con la posición estimada con los datos de los tres parámetros, y el error derivado de cada estimación.

Para representar los parámetros obtenidos para el escenario 1 (2.83, -51.01), 3 (3.29, -53.07) y 4 (3.86, -47.05) los identificaremos como A, B y C respectivamente. A

partir de estos parámetros se estima la distancia como $dist(m) = 10^{\frac{n-RSS}{10\gamma}}$.

Para el cálculo del error se utiliza la ecuación (22), donde x_e , y_e , x_r , y_r , son las coordenadas de la posición estimada y real respectivamente.

$$E = \sqrt{(x_e - x_r)^2 + (y_e - y_r)^2} \quad (22)$$

4.3.1 Posicionamiento 1.

En este escenario se ha tomado como punto de referencia de nuestro sistema de coordenadas la mota a posicionar, de esta manera las posiciones mostradas de las motas anclas son posiciones relativas a la mota desconocida. Además, para este escenario de posicionamiento en concreto, se ha incluido una medida más de la necesaria, así que se realizarán un total de 4 medidas de distancias. Como en el momento en que se fueron a realizar las medidas en este escenario sólo se disponía de 3 motas, una se utilizaba como base, otra la dejábamos en una posición fija, representando la mota a localizar, y la otra se colocaba en 4 posiciones distintas y se tomaban las medidas de potencia recibida en las distintas posiciones.

El escenario de posicionamiento es un escenario con las mismas características que el escenario 1 aunque más estrecho.

En las tablas 5 y 6 se muestran las posiciones de cada mota ancla junto con la distancia hasta la mota desconocida, y la potencia recibida de cada mota ancla junto con la distancia estimada según los parámetros A, B y C, respectivamente.

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	-1.05	2.62	2.82
M2	3.05	-4.5	5.44
M3	-1.05	-5.5	5.6
M4	3.05	3	4.28

Tabla 5. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el escenario de posicionamiento 1.

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	-67	3.67	2.64	3.28
M2	-70	4.69	3.26	3.92
M3	-71	5.08	3.49	4.16
M4	-68	3.98	2.83	3.58

Tabla 6. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A, B, C) para el escenario de posicionamiento 1.

En la tabla 6 se puede observar como los parámetros A son más precisos, en general, a la hora de estimar la distancia, todo y que los demás también proporcionan distancias relativamente precisas. Que A nos proporcione una distancia más cercana a la real es debido a que este parámetro se obtuvo en el mismo escenario en el que se realiza el posicionamiento, por lo tanto es lógico que proporcione una mejor representación de las pérdidas en función de la distancia. No obstante podemos ver como el resultado de la estimación de la distancia a la mota M1 no es tan preciso como el proporcionado por los parámetros B. Este resultado es debido al efecto suelo comentado anteriormente.

Si nos fijamos en la distancia real a dicha mota es de 2.82 m, que en particular es la menor de todas con lo que el efecto suelo produce un gran efecto en la potencia recibida, proporcionando un valor menor al que se debería tener idealmente y por ello nos estima una distancia mayor. En cambio la distancia que nos proporciona B es una muy buena estimación, con lo que podemos decir que los parámetros B proporcionan buenos resultados ante el efecto suelo.

En cambio para las demás distancias es el menos preciso, ya que estos parámetros modelan un escenario en el que encontramos un entorno móvil con presencia de obstáculos, que no es el caso del escenario de posicionamiento en concreto.

Con estos valores de distancia estimada y de posiciones de las motas anclas, aplicando la técnica de localización explicado en el capítulo anterior se obtienen las posiciones expresadas en la tabla 7, para los distintos parámetros A, B y C, respectivamente, donde se puede observar como los mejores resultados los proporcionan los parámetros A (2.83, -51.01) con un error en la posición de 62 cm, que para la aplicación en concreto (XALOC) es una gran precisión, ya que, como el objetivo es llegar a una plaza de aparcamiento, 62 cm de error no supone gran problema.

Posición estimada	Xe (m) =	-0.26	-0.39	-0.37
	Ye (m) =	-0.56	-0.91	-0.85
Error	E =	0.62	0.99	0.92

Tabla 7. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el escenario de posicionamiento 1.

Se puede observar también que los resultados de los otros parámetros nos proporcionan un error de un metro. Pensar que un error en la posición de 1 metro significa que la posición correcta puede estar a un metro alrededor de la estimada, con lo que igual que antes sería suficiente y aceptable para la aplicación en cuestión. Como hemos comentado antes, los parámetros A son los que modelan el escenario de posicionamiento 1 y por ellos son los más preciso en cuanto al cálculo de distancia y posición.

4.3.2 Posicionamiento 2.

En el momento que tomamos las medidas en este escenario se disponía de 8 motas, con lo que se utilizarán 6 de ellas para motas anclas. Las dos restantes serán utilizadas para la base y para realizar las medidas de potencia recibida.

Así dispondremos de 6 medidas de distancia para poder realizar la estimación de la posición con el algoritmo de triangulación ya explicado. Como antes se realizarán los cálculos de las distancias con los distintos parámetros obtenidos en el apartado anterior (A, B y C).

Comentar también que en este escenario se tomaron medidas para 5 posiciones distintas, no obstante no se mostrarán los resultados de las 5 posiciones si no que mostraremos 3 de ellos (adjuntando el resto en el ANEXO 2). En cada posición la potencia recibida de cada mota variaba entre unos valores, por ello se tomaron 10 de estos valores y se tomó la media de ellos. Para ello se colocaron tres motas en línea y a una separación de unos 5 metros se colocaron las 3 restantes, igual en línea y en frente de las demás.

La mota desconocida se colocó entre estas 6 motas, tal y como se muestra en la figura 4.8, donde los círculos representan la mota desconocida en distintas posiciones y las cruces representan las motas anclas. En estos casos, la referencia del origen de coordenadas es una mota ancla.

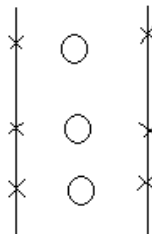


Figura 4.8 Situación de los siguientes escenarios de posicionamiento.

El escenario en este caso está situado en los nuevos aparcamientos realizados en frente de la facultad de ciencias de la UAB (Universitat Autònoma de Barcelona).

Igual que antes se mostrarán los valores de la posición de las motas anclas estimada, la distancia hasta la mota desconocida, la potencia recibida por las distintas motas y la distancia estimada a partir de los distintos parámetros A, B y C. Todo esto lo proporcionaremos para las tres posiciones distintas.

- Posición 1 (2 m, 0).

En las tablas 8 y 9 se muestran las posiciones de cada mota ancla junto con la distancia hasta la mota desconocida, y la potencia recibida de cada mota ancla junto con la distancia estimada según los parámetros A, B y C, respectivamente.

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	2
M2	4	0	2
M3	0	5	5.38
M4	4	5	5.38
M5	0	10	10.19
M6	4	10	10.19

Tabla 8. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el escenario de posicionamiento 2 (posición 1).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	-62	2.59	1.96	2.54
M2	-53	1.18	1	1.43
M3	-68	4.18	2.96	3.61
M4	-67	3.88	2.78	3.42
M5	-74	6.81	4.5	5.16
M6	-69	4.57	3.19	3.85

Tabla 9. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A,B,C) para el escenario de posicionamiento 2 (posición 1).

Como en el caso anterior los parámetros que mejor estiman la distancia son los parámetros A, este caso no es el caso de un escenario como el modelado por A (Escenario 1), si no que es un escenario más bien con obstáculos, ya que encontramos vehículos estacionados o en movimiento, árboles, personas caminando.

Pero, todo y que es el que proporciona unos mejores resultados en la distancia, no se aprecia una precisión como la de antes.

Con estos valores de distancia estimada y de posiciones de las motas anclas, aplicando la técnica de triangulación, con las 6 medidas, explicado en el capítulo anterior se obtienen las posiciones expresadas en la tabla 10, para los distintos parámetros A, B y C, respectivamente. En este caso encontramos que los parámetros A nos proporcionan el mejor resultado pero con un error de 3.14 metros.

Posición	Xe (m) =	2.65	1.93	2.09
estimada	Ye (m) =	3.07	3.97	3.79
Error	E =	3.14	3.97	3.79

Tabla 10. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el escenario de posicionamiento 2 (posición 1).

El error obtenido es de unos 4 metros para los parámetros B y C y de unos 3 metros para A, con lo que la precisión se ve un poco afectada en este escenario, todo y que podríamos considerarla casi aceptable, ya que unos 4 metros de error significaría el tamaño que ocuparía una plaza de aparcamiento, con lo que el sistema acabaría siendo efectivo con la capacidad del usuario a identificar un aparcamiento libre.

- Posición 2 (2 m, 2.5 m)

En las tablas 11 y 12 se muestran las posiciones de cada mota ancla junto con la distancia hasta la mota desconocida, y la potencia recibida de cada mota ancla junto con la distancia estimada según los parámetros A, B y C, respectivamente. En este caso, en general, las mejores distancias las proporcionan los parámetros C. Esto es debido a que dichos parámetros modelan un entorno con obstáculos, pero sin movilidad del entorno, por ello nos proporciona unos mejores resultados en la estimación de la distancia. No obstante, podemos observar que en algunos casos el parámetro B nos proporciona alguna medida muy precisa, como es el caso de la mota M2. Este resultado es debido a que los parámetros B modelan un entorno en que se encuentra presente el efecto multicamino, y en el caso de la mota M2 encontramos una interferencia destructiva que lleva a estimar a los otros parámetros una distancia mayor.

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	3.2
M2	4	0	3.2
M3	0	5	3.2
M4	4	5	3.2
M5	0	10	7.76
M6	4	10	7.76

Tabla 11. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el escenario de posicionamiento 2 (posición 2).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	-61	2.33	1.79	2,35
M2	-69	4.34	3.05	3,71
M3	-60	2.07	1.62	2,16
M4	-61	2.33	1.79	2,35
M5	-73	6.24	4.17	4,83
M6	-68	4.18	2.96	3,61

Tabla 12. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A,B,C) para el escenario de posicionamiento 2 (posición 2).

Aplicando la técnica de localización utilizada hasta ahora obtenemos los resultados mostrados en la tabla 13. En ella se observa como los parámetros C nos proporcionan los mejores resultados, con una precisión de 17 cm.

Posición	Xe (m) =	2.01	1.7	1.83
estimada	Ye (m) =	5.19	4.89	4.97
Error	E =	0.19	0.32	0.17

Tabla 13. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el escenario de posicionamiento 2 (posición 2).

Se puede ver como para todos los parámetros encontramos un error menor a los 50 cm, esto es un resultado muy bueno.

- Posición 3 (2 m, 7.5 m)

En las tablas 14 y 15 se muestran las posiciones de cada mota ancla junto con la distancia hasta la mota desconocida, y la potencia recibida de cada mota ancla junto con la distancia estimada según los parámetros A, B y C, respectivamente.

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	7,76
M2	4	0	7,76
M3	0	5	3,2
M4	4	5	3,2
M5	0	10	3,2
M6	4	10	3,2

Tabla 14. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el escenario de posicionamiento 2 (posición 3).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	-90	24,27	13,4	13,08
M2	-90	24,27	13,4	13,08
M3	-76	7,61	4,95	5,59
M4	-66	3,56	2,58	3,21
M5	-56	1,6	1,29	1,78
M6	-56	1,6	1,29	1,78

Tabla 15. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A,B,C) para el escenario de posicionamiento 2 (posición 3).

En este caso observamos que las estimaciones de las distancias no se aproximan con las reales, no obstante hay valores, como los de la mota M4, que si se aproximan. Además observamos que las medidas de M5 y M6 proporcionan una distancia igual que es lo que ocurre en la realidad.

Por lo tanto, en general, ninguno de los parámetros modela de forma correcta el escenario de posicionamiento en cuestión y por ello proporcionan unas estimaciones erróneas. No obstante, hay casos particulares, como los comentados, en los que la estimación es precisa o si no mantiene las relaciones entre distancias iguales.

Con estos valores obtenidos y la técnica empleada, utilizando las 6 medidas disponibles, encontramos los resultados de la tabla 16, donde se observa unos resultados pésimos con una precisión del orden de los 10 metros para los parámetros B y C y de 34 metros para el parámetro A.

Posición estimada	Xe (m) =	12.85	4.75	4.42
	Ye (m) =	39.74	15.1	14.34
Error	E =	34	8.08	7.25

Tabla 16. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el escenario de posicionamiento 2 (posición 3).

Estos resultados tan malos son debidos a que en la posición dada la visión directa entre la mayoría de las motas se veía afectada, por ello la mayoría de las medidas de distancia son erróneas. Al incluir estas medidas erróneas en el cálculo de la posición, éstas corrompen el resultado proporcionando una posición totalmente incoherente. Por ello más adelante propondremos una modificación de la técnica de posicionamiento comentada y analizaremos los resultados proporcionados.

4.3.4 Conclusiones posicionamiento.

Se ha observado en los dos últimos escenarios de posicionamiento, que en algunos casos el procedimiento de localización proporciona unos resultados aceptables y en otros unos resultados pésimos. Ya se ha comentado que estos resultados tan malos son debidos a que ciertas distancias no las estimamos correctamente y éstas, a la hora de incluirlas en el cálculo de la posición, corrompen el resultado. Por ello se ha pensado en utilizar solamente las tres medidas mínimas necesarias para la resolución del algoritmo de triangulación, de esta manera escogeremos las tres mejores medidas, es decir, las tres potencias recibidas de más nivel, con lo que será más probable que estas medidas provengan de una mota con visión directa y por lo tanto el efecto de multicamino y otros no afecte tanto.

Puede darse el caso en que una de las tres, o más, medidas escogidas no proporcionen las tres mejores estimaciones de distancia, es decir, puede darse el caso que con una potencia menor tengamos una mejor estimación de la distancia. Por ejemplo si se observa la tabla 9, la mota M3 mide una potencia de -68 dBm y estima una distancia de 4.18 m, con los parámetros A, siendo la real de 5.38, por otro lado la mota M4 mide -67 dBm y estima una distancia de 3.88 m, con los parámetros A, siendo la real igual que para M3. Así como se ha visto en el ejemplo, se puede dar el caso en que una potencia menor proporcione una mejor estimación de la distancia, no obstante para el caso en que haya muchas medidas corruptas, de esta manera el error medio se verá reducido drásticamente, como se mostrará a continuación.

En las tablas 17, 18 y 19 se muestran los resultados de las posiciones estimadas incluyendo las tres potencias mayores, con los tres parámetros, para las tres posiciones analizadas en el escenario de posicionamiento 2. Que como se puede observar se consiguen unos resultados mucho más precisos. Sobretudo destacar la disminución del error en la posición 3, utilizando las 6 medidas se obtenía un error de decenas de metros y utilizando 3 se obtiene un error igual o menor que 1 metro para los tres parámetros.

Posición estimada	Xe (m) =	2.66	2.35	2.55
	Ye (m) =	1.13	1.82	1.53
Error	E =	1.94	1.86	1.62

Tabla 17. Resultados obtenidos utilizando las 3 RSS mayores, para la posición 1 (2,0) del escenario de posicionamiento 2.

Posición estimada	Xe (m) =	1.85	1.92	1.89
	Ye (m) =	2.61	2.55	2.58
Error	E =	0.18	0.09	0.13

Tabla 18. Resultados obtenidos utilizando las 3 RSS mayores, para la posición 2 (2,2.5) del escenario de posicionamiento 2.

Posición	Xe (m) =	2	2	2
estimada	Ye (m) =	8.5	7.99	8.21
Error	E =	1	0.49	0.71

Tabla 19. Resultados obtenidos utilizando las 3 RSS mayores, para la posición 3 (2,7.5) del escenario de posicionamiento 2.

En la tabla 20 se muestra el error medio, calculado a partir de la media de los errores obtenidos en las distintas posiciones medidas en el escenario de posicionamiento 2, para cuando utilizamos 6 medidas y 3. Comentar que como sólo hemos mostrado 3 medidas de posición el error medio, para el caso de 6 medidas, se ve afectado por el error obtenido en la última posición. No obstante, con las 5 medidas de posición realizadas a lo largo del TFC se ha calculado un error medio de 8.4, 3.75 y 3.44 metros para los parámetros A, B y C respectivamente. Así que para el caso en que utilizamos 6 motas el error medio para los parámetros B y C puede ser aceptable, aunque habrá casos concretos en que el sistema proporcione una posición totalmente errónea, pero para los parámetros A es intolerable, todo y que en ciertos casos funcione correctamente.

	A	B	C
Error medio con 6 motas	12.44	4.12	3.73
Error medio con 3 motas	1.04	0.81	0.82

Tabla 20. Error medio de posición para el escenario de posicionamiento 2.

De esta manera, utilizando sólo 3 medidas, conseguimos un error medio de un metro para los tres parámetros obtenidos en el apartado anterior.

4.4 Medidas en el interior del vehículo.

Ya se ha comentado en algún momento que nuestra aplicación tiene la particularidad que la mota desconocida se encuentra en el interior del vehículo que se pretende localizar. Por ello se debe comprobar si los parámetros A, B y C proporcionan unos resultados satisfactorios en el posicionamiento, cuando la mota desconocida se encuentra en el interior de un vehículo, concretamente en el salpicadero.

Realizando medidas en la situación de la figura 4.9, donde el círculo es el coche que avanza en el sentido indicado y las cruces son las motas anclas correspondientes, se encuentran los resultados mostrados en la tabla 21, estando la mota desconocida en el interior del vehículo.

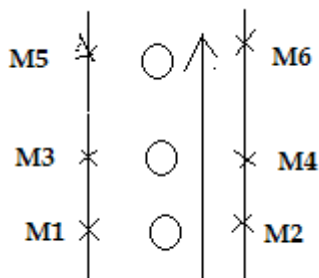


Figura 4.9. Situación para las medidas en el interior del coche.

M1	M2	M3	M4	M5	M6
-76	-73	-76	-78	-82	-93
-71	-74	-75	-75	-84	-83
-67	-72	-89	-75	-77	-80
-68	-72	-71	-76	-74	-75
-72	-65	-75	-73	-73	-73
-69	-75	-73	-65	-70	-78
-73	-86	-66	-74	-72	-70
-76	-87	-69	-86	-63	-65

Tabla 21. Potencia recibida en dBm a medida que avanzamos con el coche.

Se observa como el nivel de potencia en general, cuando la mota receptora se encuentra dentro del coche, disminuye respecto con la recibida cuando la mota se encuentra en el exterior. Hay que tener en cuenta que las medidas se tomaron a una velocidad de unos 10 Km/h y las motas envían mensajes cada segundo, así para un incremento de distancia pequeño ($10 \text{ Km/h} * 1 \text{ s}$) obtenemos una diferencia de nivel de potencia recibido mayor que en el caso de tener la mota receptora en el exterior. Todo esto incluyendo el efecto de las interferencias constructivas y destructivas, es debido a que con la mayoría de las motas no se obtenga línea de visión directa y la señal recibida por dichas motas provenga de distintos caminos, provocando de esta manera la disminución del nivel de potencia, como ya se ha explicado en otros momentos.

Además hay que tener en cuenta la atenuación adicional debida al *shadowing* que pueda producir la presencia del vehículo. Esto puede llegar a ser un problema ya que en algún momento se puede dar el caso en el que no se obtenga visión directa con el mínimo de las motas posibles y obtener así unos resultados poco satisfactorios.

Por lo tanto, queda presente la necesidad de comprobar los resultados de los parámetros A, B y C en el posicionamiento en el interior del coche.

A continuación se mostrarán los resultados que nos proporcionan los parámetros disponibles. Si estos parámetros no son satisfactorios se deberán obtener otros parámetros que modelen el efecto de tener la mota en el interior del coche, o escoger métodos alternativos para la posición.

4.4.1 Posicionamiento interior.

Igual que para los dos escenarios de posicionamiento comentados en el apartado anterior, mostraremos las posiciones de las motas anclas con sus distancias a la mota a localizar, la potencia recibida junto con la distancia estimada para los tres parámetros y por último la posición estimada y el error correspondiente con los parámetros disponibles. Todo ello lo mostraremos para tres posiciones distintas de la mota desconocida.

-Posición 1 (1.5 m, 0)

En la tabla 22 se muestra la distribución del escenario en concreto indicando las posiciones de las motas anclas y su distancia a la mota a localizar. La tabla 23 indica los valores de RSS obtenidos por las distintas motas anclas y la distancia estimada según los tres parámetros disponibles. En esta última, se puede apreciar como para una distancia máxima entre motas de 5.31 m se obtiene una potencia recibida media, entre las 6 motas, de 65.33 dBm, que es la misma que se obtiene en los escenarios anteriores, pero con una distancia máxima entre motas de unos 10 metros. Esto deja presente la disminución del nivel de señal, en general, debido a situar la mota receptora en el interior del vehículo.

Se puede observar también que ninguno de los tres parámetros nos proporciona una buena estimación, en general, de la distancia, todo y que para casos en particular (ver M3 en tabla 33) la estimación se aproxima al valor real. Esto es debido a que los parámetros utilizados no tienen presente el efecto producido por introducir la mota en el vehículo.

Como ya se ha comprobado que en general es mejor incluir sólo tres distancias de medidas para el cálculo de la posición, igual que en los últimos casos, se escogerán los tres valores mayores de RSS, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 24, que como se puede observar con los parámetros obtenidos se consigue un error de aproximadamente 1 metro.

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	1.5
M2	3	0	1.5
M3	0	2.55	2.95
M4	3	2.55	2.95
M5	0	5.1	5.31
M6	3	5.1	5.31

Tabla 22. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el interior del coche (posición 1).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	-63	2.65	1.99	2.58
M2	-62	2.44	1.86	2.43
M3	-64	2.87	2.14	2.74
M4	-65	3.11	2.29	2.9
M5	-70	4.67	3.25	3.91
M6	-68	3.97	2.83	3.47

Tabla 23. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A,B,C) para el interior del coche (posición 1).

Posición	Xe (m) =	1.67	1.58	1.62
estimada	Ye (m) =	1.03	1.15	1.1
Error	E =	1.05	1.15	1.1

Tabla 24. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el interior del coche (posición 1).

Así todo y que los parámetros obtenidos en el apartado 4.2 (cálculo de parámetros) no consideraban los efectos de introducir la mota en el vehículo y por ello las estimaciones no son del todo exactas, se observa en la tabla 24 como éstos proporcionan unos resultados, en el cálculo de la posición fiables, ya que al escoger las tres potencias mayores, que supuestamente provienen de motas con las que se tiene visión directa y por lo tanto la medida de potencia será aceptable, obtenemos las medidas de distancia más precisas o más bien las tres distancias que no divergen demasiado de la distancia real.

Se puede observar como las distancias entre motas escogidas en este escenario no son excesivamente grandes, lo que puede llevar a un incorrecto modelado del escenario en cuestión. No obstante, como el escenario a analizar es el interior del coche y siempre escogeremos las potencias mayores y por lo tanto lo más probable es que sean de motas cercanas, siempre tendremos tres motas que se encuentre en el intervalo de distancias analizado y por lo tanto los resultados se pueden extender a cualquier entorno en particular.

A continuación se comprobará los resultados obtenidos en una posición diferente para concluir si los parámetros utilizados hasta el momento se pueden utilizar para la estimación de distancias en el interior del coche y el posterior posicionamiento de la mota. Realmente al cambiar de posición cambiamos la distribución de las motas y por lo tanto las distancias reales entre motas. Así podemos pensar que al cambiar de posición estamos analizando el escenario del interior del coche pero en un entorno distinto, ya que al cambiar las distancias entre motas, se obtendrán unos valores de RSS totalmente distintos que pueden verse afectados por unos efectos totalmente diferentes a los de la posición anterior. Lo importante es poder comprobar que para distintas distancias de las tres motas escogidas el posicionamiento es correcto.

-Posición 2 (1.5 m, 2.55 m)

Como siempre, en la tabla 25 se muestran las posiciones de las motas anclas y la distancia hasta la mota desconocida. En la tabla 26 se presentan los valores obtenidos de la RSS y la distancia estimada según los parámetros. Como se observa, igual que en el caso anterior, excepto algunos casos en particular, la estimación de la distancia en general para los tres parámetros no es muy precisa. La causa de esto es la misma que en el caso anterior, es decir, los parámetros no modelan los efectos que provoca introducir la mota en el coche.

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	2.95
M2	3	0	2.95
M3	0	2.55	1.5
M4	3	2.55	1.5
M5	0	5.1	2.95
M6	3	5.1	2.95

Tabla 25. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el interior del coche (posición 2).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	-74	6.47	4.3	4.96
M2	-76	7.61	4.95	5.59
M3	-69	4.31	3.03	3.69
M4	-64	2.87	2.14	2.74
M5	-63	2.64	1.99	2.58
M6	-66	3.37	2.46	3.08

Tabla 26. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A,B,C) para el interior del coche (posición 2).

Igual que en los últimos casos, escogiendo los tres valores de potencias mayores y aplicando el método de triangulación explicado encontramos los resultados de la tabla 27, que nos proporcionan un error de 1 metro.

Posición	Xe (m) =	0.76	1.15	1.02
estimada	Ye (m) =	3.21	3.53	3.43
Error	E =	0.99	1.04	1

Tabla 27. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el interior del coche (posición 2).

Se observa que todo y que la descripción de las pérdidas que proporcionan los parámetros no se corresponde con las del escenario analizado, las tres potencias escogidas son las que proporcionan una mejor estimación y por ello se obtienen tales resultados en el cálculo de la posición.

-Posición 3 (1.5 m, 3.82 m)

En las tablas 28 y 29 se muestran las posiciones de cada mota ancla junto con la distancia hasta la mota desconocida, y la potencia recibida de cada mota ancla junto con la distancia estimada según los parámetros A, B y C, respectivamente. En la tabla 29 se puede ver como el nivel de la RSS en general es menor que en el resto de los casos. Además se observa como para una misma distancia en cuatro motas se obtienen 4 valores distintos de potencia recibida, con lo que queda aún más presente la falta de precisión en la descripción del escenario con los parámetros A, B y C.

Comentar que las estimaciones de la distancia, en general, son las peores de entre todos los escenarios estudiados en el interior del coche. Por ello se obtienen los resultados mostrados en la tabla 30, donde se obtiene un error de 2, 3 y 4.7 metros para los parámetros A, B y C respectivamente. Estos resultados tan malos son debidos a que sólo dos potencias de las que se reciben nos proporcionan una buena estimación de la distancia, por ello al introducir la tercera el resultado es corrompido por la imprecisión de la estimación obtenida con esa medida.

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	4.1
M2	3	0	4.1
M3	0	2.55	1.96
M4	3	2.55	1.96
M5	0	5.1	1.96
M6	3	5.1	1.96

Tabla 28. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el interior del coche (posición 3).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	-75	7.04	4.64	5.29
M2	-81	11.47	7.06	7.57
M3	-70	4.68	3.27	3.93
M4	-57	1.62	1.31	1.81
M5	-60	2.07	1.62	2.16
M6	-76	7.63	4.97	5.62

Tabla 29. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A, B, C) para el interior del coche (posición 3).

Se observa como los parámetros A son los que peores resultados proporcionan, ya que estos no describen un entorno con obstáculos como los parámetros B y C. No obstante, los de C también son bastante insatisfactorios, con lo que los únicos resultados aceptables en este escenario son los proporcionados por los parámetros B.

En este caso no es posible descartar la última medida ya que el mínimo necesario para realizar la estimación de la posición son tres medidas. A continuación utilizaremos algún método de posicionamiento alternativo de los explicados en el capítulo 3 para comprobar la mejora de la precisión.

Posición	Xe (m) =	4.71	2.99	3.52
estimada	Ye (m) =	7.27	5.4	5.93
Error	E =	4.72	2.18	2.92

Tabla 30. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el interior del coche (posición 3).

4.4.2 Conclusiones posicionamiento interior.

Se ha visto cómo con los parámetros utilizados hasta el momento obtenemos unos resultados en el posicionamiento en el interior del coche aceptables. Para los dos primeros casos se derivó un error de aproximadamente un metro y en el último caso de unos 3 metros en media de los tres parámetros. Como ya se ha comentado en algún momento, la aplicación a diseñar esta destinada para la plataforma de posicionamiento necesaria en el proyecto XALOC. En este proyecto la posición del coche calculada se utilizará para poder guiar al usuario hasta un aparcamiento libre. Por ello un error de 3 metros en la posición, y sólo en determinados momentos, es un error aceptable para la aplicación en cuestión. De todas formas a continuación comentaremos alternativas para el posicionamiento cuando sólo se recibe correctamente de una o dos motas, que es el caso del último escenario analizado y el único que nos proporciona un error relativamente elevado.

Así se puede concluir que los parámetros A ($\gamma = 2.83$ $n = -51.01$), B ($\gamma = 3.29$ $n = -53.07$) y C ($\gamma = 3.86$ $n = -47.05$) pueden ser utilizados para la estimación de la distancia y el posterior cálculo de la posición de la mota desconocida en el interior del vehículo. En general los tres parámetros proporcionan unos resultados aceptables y parecidos. No obstante, para el caso de un entorno libre de obstáculos los parámetros A se aproximan más que los otros, aunque en un entorno con obstáculos los mejores resultados los proporcionan B y C. Así que como para la aplicación realizada por XALOC las motas se situarán en aparcamientos al aire libre, en el que circularán vehículos y en los que encontraremos vegetación y mobiliario urbano, los parámetros candidatos para la implementación final serían B y C, siendo B el que mejores resultados proporciona, en general.

4.5 Posicionamiento alternativo.

A lo largo del capítulo se ha demostrado como nuestro sistema de posicionamiento proporciona unos resultados satisfactorios para la aplicación en la que se va a emplear, con los parámetros obtenidos en el apartado 4.2. En un principio se utilizaban seis medidas de distancias para el cálculo de la posición obteniendo de media unos resultados bastantes satisfactorios, aunque en ciertos casos se encontraba una precisión pequeña. Por ello se decidió incluir en el cálculo de la posición solamente tres medidas de distancias, que se correspondan con las tres mejores medidas de potencia. De esta manera se encuentra una precisión muy buena, aunque en casos que sólo realicemos dos estimaciones de distancia de forma precisa la precisión del posicionamiento se ve un poco afectada, aunque mucho menos que en el caso de incluir seis medidas. Así se utilizarán los métodos alternativos a la técnica de triangulación, explicados en el capítulo 3, para los casos en que no se obtengan tres buenas medidas de potencia.

De esta manera se tendrá la oportunidad de utilizar alguno de estos métodos cuando entre las tres mejores potencias encontramos alguna por debajo de un nivel preestablecido. Así cuando las 3 potencias no superan un nivel fijado se utilizará el método para el caso de tener 2 motas anclas o el de tener 1, según si 1 o 2 no superan el umbral respectivamente.

4.5.1 Método para 2 motas anclas.

Si se observa en los resultados de la última posición estudiada en el apartado anterior, las dos mejores potencias recibidas provienen de dos motas vecinas y son del orden de los -60 dBm, la tercera mejor es de -76 con lo que se aprecia una considerable diferencia en los niveles de potencia recibida, siendo esta tercera medida la que hace que obtengamos el error mostrado en la tabla 30.

Si se utiliza el método explicado en el capítulo 3 en el que sólo se tienen 2 motas anclas, con las dos mejores medidas, en el que la posición de la primera mota es (3, 2.55) y la de la segunda (0, 5.1) se obtendría la posición estimada **(1.5, 3.82)** que coincide con la posición real.

Este resultado es casualidad, lo que significa que no siempre que se utilice este método se obtendrá la posición real sin ningún tipo de error, por ejemplo si se realiza este método en el caso de la posición 2 del apartado anterior, para las dos mejores potencias, se obtendría la misma posición que en el caso anterior **(1.5, 3.82)** siendo la real (1.5, 2.55), con lo que se obtendría un error de 1.2 metros que es mayor que el error obtenido incluyendo la tercera medida. De esta manera queda presente que la utilización de este método no es siempre igual de efectivo, por lo tanto es importante fijar un umbral óptimo para la elección de la utilización del método. Por lo tanto, para nuestra aplicación en concreto, se podría elegir un valor de potencia recibida mínimo de unos -70 dBm, para valores menores la medida no se incluye en el cálculo de la posición. De todas formas se observa que para la mayoría de los casos expuestos con anterioridad el error derivado de utilizar esta técnica no es tan satisfactorio como el método general pero lo suficiente para asegurar el correcto funcionamiento de la aplicación, con lo que si se diera el caso en que se ha agotado la batería de la mayoría de las motas o por algún otro motivo sólo se dispone de dos medidas en cada momento, la aplicación seguiría funcionando proporcionando unos resultados aceptables.

4.5.2 Método para 1 mota ancla.

Se ha comentado en el capítulo 3 que si sólo se recibe potencia de una mota ancla, se podría asociar la posición estimada a la posición de la mota de la que se recibe pero siendo la coordenada horizontal estimada la mitad de la distancia entre motas vecinas. Si se diera tal caso lo más probable es que dicha potencia recibida fuera de la mota más cercana, pero normalmente tendremos dos motas anclas a la misma distancia con lo que idealmente se recibiría la misma potencia. No obstante, se ha visto que en la práctica esto no ocurre, así a continuación diremos que la posición estimada es la posición de la mota con la que más potencia recibimos y se comprobaran los resultados.

Para el caso en el que encontramos un error mayor, que es la última posición del apartado anterior, si aplicamos este método se estimaría la posición **(1.5, 2.55)** siendo la real (1.5, 3.82) con lo que se obtendría un error de 1.27 metros. Así para este caso en particular, con este método se obtendrían mejores resultados que con la técnica de triangulación aplicada, no obstante con la técnica de tener 2 motas anclas se obtienen unos mejores resultados.

Se puede observar, que para la mayoría de los casos analizados la posición estimada con este método coincidiría con la posición real, ya que en estos casos la mota a localizar se encuentra en línea con la mota que mejor potencia proporciona. Así se puede concluir que este método es muy útil cuando tengamos la posibilidad de estar en algún momento en línea con alguna mota ancla, aunque de todas formas los resultados serán satisfactorios, ya que el despliegue de motas será lo suficientemente grande como para permitir que en algún momento de la trayectoria del vehículo, éste se encuentre en línea con una mota ancla en más de un momento. Por lo tanto, es una elección aconsejable en los casos que solamente se disponga de una medida y de esta manera puede proporcionar unos resultados relativamente aceptables hasta el momento que recibamos potencia de dos o tres motas. En el momento que se reciba potencia de 2 motas, el método a aplicar será el método anterior y en el momento que se reciba de tres motas se pasará a utilizar la técnica de triangulación explicada.

5. Conclusiones.

Tras la finalización del proyecto, se puede afirmar que se han superado los objetivos marcados al inicio del proyecto. El principal objetivo de este trabajo de final de carrera es la implementación de un sistema de localización basado en una red de sensores inalámbricos. Este sistema de localización debe ser capaz de proporcionar la posición de una mota que se encuentra en el interior de un vehículo.

La precisión del sistema se ha ajustado a las restricciones que se presentan en la plataforma de trabajo, que son las limitaciones presentadas por los dispositivos que forman la WSN. Entre estas restricciones encontramos los limitados recursos hardware disponibles en las motas que son los que nos han hecho decantarnos por utilizar la fuerza de la señal recibida para el cálculo de distancias y el posterior cálculo de la posición. Trabajar con la RSS, dado que es un parámetro que se ve afectado por muchas condiciones, tales como reflexiones de la señal, difracciones o multitrayectos, nos obliga a realizar un análisis de distintos escenarios para encontrar unos parámetros que los describan de tal manera que se obtenga una precisión aceptable en el posicionamiento.

La descripción de distintos escenarios se realiza con el fin de obtener distintos parámetros que nos describan las pérdidas en el canal en función de la distancia, de esta manera se podrá comprobar qué parámetros proporcionan una mejor estimación de la distancia. A lo largo del proyecto se han obtenido distintos parámetros para la descripción de distintos escenarios, pero sólo tres de ellos proporcionan unos resultados aceptables en la mayoría de las situaciones analizadas.

Dentro del objetivo principal del proyecto, se encuentra una tarea muy importante que es la de la estimación de la distancia, esta tarea se realiza con la obtención de los tres parámetros comentados. De esta manera, el siguiente paso es la estimación de la posición, para ello se decidió utilizar la técnica de triangulación comentada a lo largo de la memoria. En primer lugar, dado las imprecisiones que se pueden encontrar en las medidas de RSS, se utilizaban más medidas de las mínimas necesarias con el fin de proporcionar una mejor precisión.

No obstante, se observó como al introducir más medidas de las tres necesarias podría no ser lo más preciso. Todo y que en general el posicionamiento se obtenía con un error de un poco más de un metro, en ciertas posiciones la estimación era totalmente incoherente. Se comprobó que esto era debido a introducir en el cálculo de la posición medidas de potencia que no proporcionaban una buena estimación de la potencia. Por lo tanto, se decidió introducir solamente las tres medidas de potencia mayores para el cálculo de la posición, obteniendo de esta manera un error ligeramente menor que un metro, de media.

En primer lugar se estudió el posicionamiento con los tres parámetros mencionados en distintos escenarios pero la mota en el exterior del vehículo. De esta manera se comprobó que los tres parámetros proporcionaban unos resultados muy satisfactorios en diversos escenarios, pero se debía comprobar si estos resultados serían los mismo en el interior del vehículo, ya que dentro de él las condiciones a las que esta sujeta la RSS es totalmente diferente. No obstante, se comprobó que dichos parámetros seguían proporcionando unos resultados satisfactorios, aunque en ciertas posiciones el error ascendía a unos tres metros, que en comparación de la media (aprox., 1m) es considerable. De todas formas a lo largo de la memoria se ha comentado que el sistema de posicionamiento a implementar esta pensado para el proyecto XALOC en el que se pretende guiar al usuario hasta una plaza de aparcamiento libre, por lo tanto un error de 3 metros puede llegar a ser aceptable para dicha aplicación. Además este error es exclusivo para unas posiciones en concreto y es debido a que una o más de las tres medidas de potencia no proporcionan una estimación de distancia correcta, por lo tanto al introducir estas distancias al cálculo de la posición corrompen el resultado. Así todo y que en ciertas posiciones el resultado pueda no ser muy preciso, con los parámetros comentados y la técnica de posicionamiento comentada, de media se obtiene un error de aproximadamente un metro.

Sin embargo, en este proyecto se ha ido más allá y se han propuesto dos alternativas a la técnica de posicionamiento explicada, para los casos en que más de una de las tres medidas de potencia proporciona una estimación errónea. Para identificar estos casos se fija un nivel de señal mínimo a partir del cual la potencia no se escoge para el cálculo de la distancia.

En nuestro caso se observa que si se escoge un umbral de -70 dBm, para los casos en que antes se obtenía un error de 3 metros ahora se estima la posición de forma exacta o con un error de menos de 1 metro.

Así se puede concluir que con los tres parámetros obtenidos, todo y que en ciertos casos las estimaciones de distancia no sean muy precisas, y aunque los resultados obtenidos están lejos de sistemas como los que emplean ultrasonidos, los resultados si se acercan a las prestaciones dadas por GPS. El error cometido por GPS varía en unos metros, para nuestro sistema de posicionamiento, utilizando los métodos alternativos comentados, el error cometido puede alcanzar a lo sumo el mismo, pero su comportamiento normal si no hay condiciones que alteren el comportamiento de la señal suele rondar cerca de un metro de media.

6. Bibliografía.

- [1] G. Pottie and W. Kaiser. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5):51–58, May 2000.
- [2] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proc. 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCom 2000)*, pages 56–67, Boston, ACM Press, August 2000.
- [3] M. Soledad Escolar Díaz. Wireless Sensor Networks: Estado del Arte e Investigación. Pag. 11.
- [4] F. Zhao, L. Guibas: Wireless Sensor Networks, an information processing approach, pages 294 – 300, Elsevier, Morgan Kaufmann Publishers.
- [5] Pagina web oficial de crossbow: www.xbow.com
- [6] F. Zhao, L. Guibas: Wireless Sensor Networks, an information processing approach, pag. 242, Elsevier, Morgan Kaufmann Publishers.
- [7] Pagina web oficial de atmel, fabricante del microprocesador disponible en las motas mica2:
<http://www.atmel.com>
- [8] Pagina web oficial de chipcon, fabricante del módulo radio disponible en las motas mica2: <http://www.chipcon.com>
- [9] Roberto Fernández Martínez ... [et al.] (integrantes del Grupo de Investigación EDMANS): Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica, pags 46 – 51 .- [Logroño]: Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2009.
- [10] Pagina web oficial de TinyOS, sistema operativo disponible en las motas mica2: www.tinyos.net
- [11] Pagina web con información del sistema operativo Protothread:
<http://protothread.wiki.sourceforge.net/>
- [12] Pagina web con información del sistema operativo GalsC:
<http://galsc.sourceforge.net/>
- [13] M. Soledad Escolar Díaz. Wireless Sensor Networks: Estado del Arte e Investigación. Pag. 39.
- [14] Holger Karl and Andreas Willig, Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks (pág. 236). John Wiley & Sons Ltd. England (2.005).
- [15] Alan Bensky: Wireless Positioning Technologies and Applications, pags. 161 – 186 y pags. 189 – 220. 2008 ARTECH HOUSE, INC.

- [16] Alan Bensky: *Wireless Positioning Technologies and Applications*, pages.139 - 146. 2008 ARTECH HOUSE, INC.
- [17] Andrea Goldsmith: *Wireless communications*, pag 24, Stanford University.
- [18] T. Okumura, E. Ohmori, and K. Fukuda, "Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile service," *Review Electrical Communication Laboratory*, Vol. 16, No. 9-10, pp. 825–873, Sept.-Oct. 1968.
- [19] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, Vol VT-29, No. 3, pp. 317–325, Aug. 1980.
- [20] European Cooperative in the Field of Science and Technical Research EURO-COST 231, "Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1800 MHz bands," Revision 2, The Hague, Sept. 1991.
- [21] **Steven M. Kay**: *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*
- [22] Alan Bensky: *Wireless Positioning Technologies and Applications*, pages.162 - 165. 2008 ARTECH HOUSE, INC.

ANEXO 1: Medidas para el cálculo de parámetros.

A continuación se muestran los escenarios analizados para el cálculo de los parámetros que no se han incluido en la memoria del trabajo ya que los resultados proporcionados no eran tan satisfactorios como los de los tres parámetros utilizados a lo largo del proyecto.

- Parking de 15 metros de longitud.

Este escenario se encuentra en el mismo parking subterráneo que el analizado en el apartado 4.1.3, no obstante nos situamos en un pasillo de menor longitud.

En la tabla 31 se muestran las medidas tomadas en el escenario en cuestión. Con dichas medidas y aplicando el método para encontrar los parámetros encontramos los valores mostrados en (23).

Distancia (dB)	Distancia (m)	RSSI (dBm)
0	1	-49
4,77	3	-69
6,98	5	-72
8,45	7	-63
10	10	-73
11,13	13	-72
11,76	15	-73

Tabla 32. Medidas de potencia en el escenario .

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} n \\ -\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -53.82 \\ -1.77 \end{pmatrix} \Rightarrow n = -53.82 \quad \gamma = 1.77 \quad (23)$$

En la figura A1 y A2 se muestra la representación de la potencia recibida en dBm en función de la distancia en metros y en dB, respectivamente.

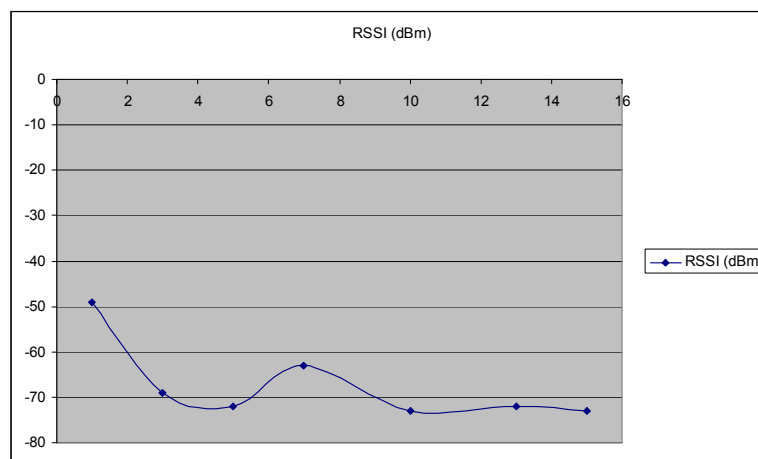


Figura A1. Representación de la potencia recibida (dBm) en función de la distancia(m), para el escenario en cuestión.

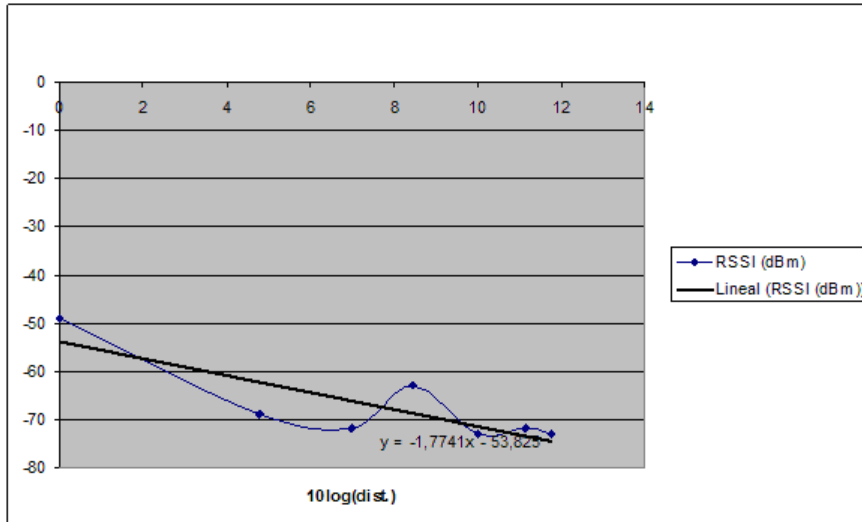


Figura A2. Representación de la potencia recibida (dBm) en función de la distancia (dB).

- Interior del vehículo.

En este caso se tomaron medidas de potencia a distinta distancia teniendo la mota receptora en el interior de un vehículo, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 32 y estimando de esta manera los parámetros en 24. Se observa como γ es mucho mayor que en el resto de los casos, debido a la gran disminución del nivel de señal con la distancia.

Distancia (m)	Distancia (dB)	RSSI (dBm)
1	0	-74
3,5	0,54	-70
5	0,69	-72
6	0,77	-75
8,5	0,92	-76
10	1	-86
11	1,04	-76
13,5	1,13	-82
15	1,17	-85
20	1,3	-96
25	1,39	-97

Tabla 32. Medidas en el interior del vehículo.

$$\underline{b} = \begin{pmatrix} n \\ -\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -64.83 \\ -18.02 \end{pmatrix} \Rightarrow n = -64.83 \quad \gamma = 18.02 \quad (24)$$

ANEXO 2: Medidas de posición.

A continuación se muestra un escenario de posicionamiento igual que el estudiado en el apartado 4.3.2 pero con una configuración de distancia entre motas distinta. Se mostrarán los resultados obtenidos realizando medidas con 6 motas para ver que sigue siendo válido el posicionamiento en la mayoría de los casos, aunque si se tomarán 3 medidas el error medio disminuiría considerablemente.

- Posición 1 (4 m, 0).

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	4
M2	8	0	4
M3	0	5	6,4
M4	8	5	6,4
M5	0	10	10,77
M6	8	10	10,77

Tabla 33. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el escenario comentado (posición 1).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	-73	6,23	4,17	4,83
M2	-68	4	2,85	3,49
M3	-75	7,12	4,67	5,33
M4	-74	6,81	4,5	5,16
M5	-85	16,65	9,7	9,93
M6	-80	11,09	6,84	7,37

Tabla 34. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A,B,C) para el escenario comentado (posición 1).

Posición estimada	Xe (m) =	9.2	3.96	3.97
	Ye (m) =	-3.87	1.83	1.82
Error	E =	6.48	1.83	1.82

Tabla 35. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el escenario comentado (posición 1).

- Posición 2 (4 m, 2.5 m)

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	4,71
M2	8	0	4,71
M3	0	5	4,71
M4	8	5	4,71
M5	0	10	8,5
M6	8	10	8,5

Tabla 36. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el escenario comentado (posición 2).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	-68	4	2,85	3,49
M2	-71	5,34	3,65	4,31
M3	-82	12,67	7,67	8,13
M4	-67	3,8	2,72	3,36
M5	-74	6,91	4,56	5,21
M6	-75	7,07	4,64	5,3

Tabla 37. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A,B,C) para el escenario comentado (posición 2).

Posición estimada	Xe (m) =	3.64	2.16	2.18
	Ye (m) =	1.36	3.44	3.31
Error	E =	1.19	2.07	1.99

Tabla 38. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el escenario comentado (posición 2).

- Posición 3 (4 m, 10 m)

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	10,77
M2	8	0	10,77
M3	0	5	6,4
M4	8	5	6,4
M5	0	10	4
M6	8	10	4

Tabla 39. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el escenario comentado (posición 3).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	-75	7,12	4,67	5,33
M2	-78	8,95	5,69	6,3
M3	-79	10,15	6,34	6,91
M4	-69	4,47	3,13	3,79
M5	-58	1,84	1,46	1,98
M6	-57	1,67	1,34	1,84

Tabla 40. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A,B,C) para el escenario comentado (posición 3).

Posición estimada	Xe (m) =	1.3	1.38	1.38
	Ye (m) =	6.35	5.38	5.58
Error	E =	4.54	5.31	5.14

Tabla 41. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el escenario comentado (posición 3).

Excepto para el último caso (posición 3) los parámetros B y C proporcionan unos resultados satisfactorios, A presenta un error considerable. Si quisiéramos conseguir unos resultados satisfactorios se podría incluir sólo las tres medidas mayores.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el escenario del apartado 4.3.2, para las dos posiciones que no se han adjuntado en la memoria.

- posición 4 (2, 2.5)

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	3,2
M2	4	0	3,2
M3	0	5	3,2
M4	4	5	3,2
M5	0	10	7,76
M6	4	10	7,76

Tabla 42. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el escenario de posicionamiento 2 (posición 4).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	60	2,21	1,71	2,26
M2	69	4,34	3,05	3,71
M3	60	2,07	1,62	2,16
M4	61	2,33	1,79	2,35
M5	73	6,23	4,17	4,83
M6	68	4,18	2,96	3,61

Tabla 43. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A,B,C) para el escenario de posicionamiento 2 (posición 4).

Posición estimada	Xe (m) =	1.46	1.38	1.33
	Ye (m) =	3.7	4.24	4.14
Error	E =	1.32	1.85	1.77

Tabla 44. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el escenario de posicionamiento 2 (posición 4).

- posición 5 (2, 10).

	Posición eje X (m)	Posición eje Y (m)	Distancia motas (m)
M1	0	0	10,19
M2	4	0	10,19
M3	0	5	5,38
M4	4	5	5,38
M5	0	10	2
M6	4	10	2

Tabla 45. Posiciones y distancia de las motas anclas, relativas a la posición de la mota desconocida para el escenario de posicionamiento 2 (posición 5).

	RSS (dBm)	Distancia estimada (m)		
		A	B	C
M1	73	6,42	4,27	4,94
M2	75	7,28	4,76	5,41
M3	66	3,4	2,48	3,1
M4	69	4,5	3,15	3,81
M5	52	1,15	0,98	1,4
M6	52	1,09	0,93	1,34

Tabla 46. Distancia estimada según los parámetros obtenidos (A,B,C) para el escenario de posicionamiento 2 (posición 5).

Posición estimada	Xe (m) =	0.58	1.07	1
	Ye (m) =	6.95	5.52	5.89
Error	E =	3.36	4.57	4.23

Tabla 47. Posiciones estimada para los parámetros A, B y C respectivamente para el escenario de posicionamiento 2 (posición 5).

En estas dos posiciones también se observa como para ciertos casos la precisión es aceptables y en otros ésta se ve afectada, esto se soluciona escogiendo las tres medidas de potencia mayores y en casa de que se reciba de menos de tres motas utilizando los métodos alternativos comentados.

ANEXO 3: Códigos de los programas utilizados en las motas.

A continuación se muestran los códigos utilizados para la programación de las motas, para cada uno se muestra su configuración, su módulo y el formato del mensaje enviado, si es que envían.

-Motas anclas.

La **configuración** es la siguiente:

```
includes sensorboardAppp;
```

```
configuration MyAppp {}
```

```
implementation {
```

```
components Main, MyApppM, TimerC, LedsC, Temp, GenericComm as Comm,  
SimpleTime ;
```

```
    Main.StdControl -> TimerC.StdControl;
```

```
    Main.StdControl -> SimpleTime.StdControl;
```

```
    Main.StdControl -> MyApppM.StdControl;
```

```
    Main.StdControl -> Comm.Control;
```

```
    MyApppM.Timer -> TimerC.Timer[unique("Timer")];
```

```
    MyApppM.Leds -> LedsC.Leds;
```

```
    MyApppM.TempControl -> Temp.StdControl;
```

```
    MyApppM.Temperature -> Temp.TempADC;
```

```
    MyApppM.Time -> SimpleTime.Time;
```

```
    MyApppM.SendMsg -> Comm.SendMsg[AM_XSXMSG];
```

```
}
```

El **módulo**:

```
includes sensorboardApp; // format del paquet que es transmet
includes TosTime;

module MyAppM {

  provides {

    interface StdControl;

  }

  uses { // tots aquells mòduls que necessitem per implementar les funcions

    interface Timer;

    interface Leds;

    interface StdControl as TempControl;

    interface ADC as Temperature;

    interface SendMsg;

    interface Time;

  }

}

implementation { // variables a usar pel programa

  bool sending_packet = FALSE;

  tos_time_t temps;

  TOS_Msg msg_buffer;

  TOS_MsgPtr msgptr;

  XDataMsg *pack;

  float xmm;// Variable per a la coordenada horitzontal de la mota, en mm.

  float ymm;// Variable per a la coordenada vertical de la mota, en mm.

  float xcm;// Variable per a la coordenada horitzontal de la mota, en cm.
```

```

float ycm;// Variable per a la coordenada vertical de la mota, en cm.

command result_t StdControl.init() {

    call Leds.init();

call TempControl.init();

    atomic {

        pack = (XDataMsg *)&(msg_buffer.data);

            /** Preparació de la capçalera del mistge**/

        pack->xSensorHeader.board_id = SENSOR_BOARD_ID;

        pack->xSensorHeader.packet_id = 3;

        pack->xSensorHeader.node_id = TOS_LOCAL_ADDRESS; // identificador de
node

        pack->xSensorHeader.rsvd = 0;

            xcm=0;

            ycm=0;

            xmm=0;

            ymm=0;

        }

    return SUCCESS;

}

command result_t StdControl.start() {

    return call Timer.start(TIMER_REPEAT, 1000); // rellotge que s'activa cada 1 segon

}

command result_t StdControl.stop() {

    return call Timer.stop();

}

```

```

event result_t Timer.fired() // quan el rellotge expira el segon recull dades
{
    call Leds.redToggle();
        call TempControl.start();
        call Temperature.getData();

    return SUCCESS;
}

void task SendData() // enviament de les dades
{
    call TempControl.stop();

    if (sending_packet) return;

    atomic sending_packet = TRUE;

    // broadcast message over radio

    if (call SendMsg.send(TOS_BCAST_ADDR,sizeof(XDataMsg),&msg_buffer)
!= SUCCESS)

        sending_packet = FALSE;

    return;
}

async event result_t Temperature.dataReady(uint16_t data) {
    // Preparació del cos del paquet

    pack->xData.datap1.xmm = xmm ;

    pack->xData.datap1.ymm = ymm ;

    pack->xData.datap1.xcm = xcm ;

    pack->xData.datap1.ycm = ycm ;
}

```

```

    post SendData();

        call Leds.yellowToggle();// quan temperatura mesurada s'activa el LED groc.

        return SUCCESS;
    }

event result_t SendMsg.sendDone(TOS_MsgPtr msg, result_t success) {

    call Leds.greenToggle();// quan missatge enviat s'activa el LED verd.

    atomic sending_packet = FALSE;

    return SUCCESS;

}

}

```

Y el formato del mensaje:

```

typedef struct XSensorHeader{//capcelera missatge.

    uint8_t board_id;

    uint8_t packet_id; // 3

    uint8_t node_id;

    uint8_t rsvd;

}__attribute__((packed)) XSensorHeader;

typedef struct PData1 { //cos del missatge.

    uint8_t xmm;

    uint8_t ymm;

    uint8_t xcm;

    uint8_t ycm;

} __attribute__((packed)) PData1;

typedef struct XDataMsg {

```

```

XSensorHeader xSensorHeader;

union {

PData1  datap1;

}xData;

} __attribute__((packed)) XDataMsg;

enum {

    AM_XSXMSG = 0,

};

enum {

    TOSH_ACTUAL_ADC2_PORT = 2,
    TOSH_ACTUAL_ADC3_PORT = 3,
    TOSH_ACTUAL_ADC4_PORT = 4,
    TOSH_ACTUAL_ADC6_PORT = 6,
    TOSH_ACTUAL_ADC5_PORT = 5

};

enum {

    TOS_ADC2_PORT = 3,
    TOS_ADC3_PORT = 4,
    TOS_ADC4_PORT = 5,
    TOS_ADC6_PORT = 6,
    TOS_ADC5_PORT = 8,

};

```


- Mota a localizar.

La **configuración** utilizada en este caso es la siguiente:

```
includes sensorboardAppp;  
  
configuration MyApp {  
  
implementation {  
  
    components Main, MyAppM, TimerC, LedsC, Temp, GenericComm as Comm,  
SimpleTime, ADCC, CC1000RadioIntM;  
  
Main.StdControl -> TimerC.StdControl;  
  
Main.StdControl -> SimpleTime.StdControl;  
  
Main.StdControl -> MyAppM.StdControl;  
  
Main.StdControl -> Comm.Control;  
  
MyAppM.Timer -> TimerC.Timer[unique("Timer")];  
  
MyAppM.Leds -> LedsC.Leds;  
  
MyAppM.TempControl -> Temp.StdControl;  
  
MyAppM.Temperature -> Temp.TempADC;  
  
MyAppM.Time -> SimpleTime.Time;  
  
MyAppM.SendMsg -> Comm.SendMsg[AM_XSXMSG];  
  
MyAppM.ReceiveMsg -> Comm.ReceiveMsg[AM_XSXMSG];  
  
}  
}
```

El código del **módulo**:

```
includes sensorboardAppp; // format del paquet que es transmet  
  
includes TosTime;  
  
module MyAppM {  
  
    provides {  
  
        interface StdControl;  
  
    }  
}
```

```
uses { // tots aquells mòduls que necessitem per implementar les funcions
```

```
    interface Timer;  
  
        interface Leds;  
  
        interface StdControl as TempControl;  
  
        interface ADC as Temperature;  
  
        interface ADC as BATT;  
  
        interface SendMsg;  
  
        interface ReceiveMsg;  
  
        interface Time;  
  
    }  
}
```

```
implementation { // variables a usar pel programa
```

```
    bool sending_packet = FALSE;  
  
    tos_time_t temps;  
  
    TOS_Msg msg_buffer;  
  
    TOS_MsgPtr msgptr;  
  
    XDataMsg *pack;  
  
    XDataMsg *precv;  
  
    uint8_t node_rx;  
  
        //Variables per a les potencies rebudes dels diferents nodes.  
  
    uint8_t rssi4;  
  
    uint8_t rssi5;  
  
    uint8_t rssi8;  
  
    uint8_t rssi7;  
  
    uint8_t rssi6;
```

```

uint8_t rssi2;

uint32_t t;

uint16_t tmpW;

uint8_t contador;

command result_t StdControl.init() {

    call Leds.init();

        call TempControl.init();

        atomic inicial = 10;

    atomic {

        pack = (XDataMsg *)&(msg_buffer.data);

        pack->xSensorHeader.board_id = SENSOR_BOARD_ID;

        pack->xSensorHeader.packet_id = 3;

        pack->xSensorHeader.node_id = TOS_LOCAL_ADDRESS; // identificador de
node

        pack->xSensorHeader.rsvd = 0;

            node_rx = 0;

            contador = 0;

            t=0;

            tmpW=0;

        }

    return SUCCESS;

}

command result_t StdControl.start() {

    // Start a repeating timer that fires every 1000ms

```

```

    return call Timer.start(TIMER_REPEAT, 1000); // rellotge que s'activa cada segon
}

command result_t StdControl.stop() {
    return call Timer.stop();
}

event result_t Timer.fired() // quan el rellotge expira el segon recull dades
{
    call Leds.redToggle();// quan el rellotge expira el segon s'activa el LED vermell.
        call TempControl.start();
        call Temperature.getData();
    return SUCCESS;
}

void task SendData() // enviament de les dades
{
    call TempControl.stop();

    if (sending_packet) return;

    atomic sending_packet = TRUE;

    // broadcast message over radio
        if (call SendMsg.send(TOS_BCAST_ADDR, sizeof(XDataMsg), &msg_buffer)
        != SUCCESS)

        sending_packet = FALSE;

    return;
}

async event result_t Temperature.dataReady(uint16_t data) {
    post SendData(); //quan s'agafa la mesura de temperatura s'envien dades.
}

```

```

    call Leds.yellowToggle();

    return SUCCESS;

}

event result_t SendMsg.sendDone(TOS_MsgPtr msg, result_t success) {

    call Leds.greenToggle();

    atomic sending_packet = FALSE;

    return SUCCESS;

}

event TOS_MsgPtr ReceiveMsg.receive(TOS_MsgPtr m) { // funcio de rebuda de
paquet

    precv = (XDataMsg *)m->data; // aquesta variable conte el paquet rebut

    atomic node_rx = precv->xSensorHeader.node_id; // node que ha enviat

    atomic
    {
        tmpW = m->strength; // el camp strength conté la potencia rebuda

        tmpW = ((tmpW * 37) >> 8) + 45; // tranformacio a dBm

    }

    //Preparació del missatge segons el node del qual es reben les potencies.

    if (node_rx == 2)

    {
        atomic rssi2=tmpW;
        atomic pack->xData.datap1.rssi2=tmpW;

    }

    if (node_rx == 4)

    {
        atomic rssi4=tmpW;
        atomic pack->xData.datap1.rssi4=tmpW;
    }
}

```

```
}  
  
    if (node_rx == 5)  
  
    {  
        atomic rssi5=tmpW;  
        atomic pack->xData.datap1.rssi5=tmpW;  
  
    }  
  
    if (node_rx == 6)  
  
    {  
        atomic rssi6=tmpW;  
        atomic pack->xData.datap1.rssi6=tmpW;  
  
    }  
  
    if (node_rx == 7)  
  
    {  
        atomic rssi7=tmpW;  
        atomic pack->xData.datap1.rssi7=tmpW;  
  
    }  
  
    if (node_rx == 8)  
  
    {  
        atomic rssi8=tmpW;  
        atomic pack->xData.datap1.rssi8=tmpW;  
  
    }  
  
    call BATT.getData();
```

```

        return m;
    }}

```

y el formato del mensaje:

```

typedef struct XSensorHeader{
    uint8_t board_id;
    uint8_t packet_id; // 3
    uint8_t node_id;
    uint8_t rsvd;
}__attribute__((packed)) XSensorHeader;

typedef struct PData1 {
    uint8_t rssi4;
    uint8_t rssi5;
    uint8_t rssi8;
    uint8_t rssi7;
    uint8_t rssi6;
    uint8_t rssi2;
    uint8_t Txnodeid;
    uint8_t cont;
    uint16_t v_batt;
    uint16_t recpot;
} __attribute__((packed)) PData1;

typedef struct XDataMsg {
    XSensorHeader xSensorHeader;
    union {
        PData1 datap1;
    }
}

```

```

}xData;

} __attribute__((packed)) XDataMsg;

enum {

    AM_XSXMSG = 0,

};

enum {

    TOSH_ACTUAL_ADC2_PORT = 2,
    TOSH_ACTUAL_ADC3_PORT = 3,
    TOSH_ACTUAL_ADC4_PORT = 4,
    TOSH_ACTUAL_ADC6_PORT = 6,
    TOSH_ACTUAL_ADC5_PORT = 5

};

enum {

    TOS_ADC2_PORT = 3,
    TOS_ADC3_PORT = 4,
    TOS_ADC4_PORT = 5,
    TOS_ADC6_PORT = 6,
    // TOS_ADC_VOLTAGE_PORT = 7, defined this in hardware.h
    TOS_ADC5_PORT = 8,

};

```