



Localización en interiores mediante radiofrecuencia: Estudio, análisis y propuestas de mejora.

Tesis doctoral en Tecnologías de la Información,
Comunicaciones y Computación

Santiago Ezpeleta Plaza

Dirigida por los doctores
José Manuel Claver Iborra
Juan José Pérez Solano

Departamento de Informática
Universitat de València
Octubre 2019

Localización en interiores mediante radiofrecuencia: Estudio, análisis y propuestas de mejora.

Memoria que presenta para optar al título de Doctor en
Informática
Santiago Ezpeleta Plaza

**Dirigida por los doctores
José Manuel Claver Iborra
Juan José Pérez Solano**

**Departamento de Informática
Universitat de València
Octubre 2019**

A mi madre.

Agradecimientos

Agradezco a mis directores, el Dr. José Manuel Claver Iborra y el Dr. Juan José Pérez Solano, su ayuda, apoyo, aportaciones y paciencia en la elaboración de este trabajo. Sin ellos, esta tesis ni siquiera se habría empezado.

Agradezco al Dr. José Vicente Martí su cooperación en los inicios de esta tesis que se comenzó a partir de uno de sus trabajos sobre localización en interiores.

Agradezco al Dr. Julio Martos Torres el préstamo del robot que permitió la toma de datos en el escenario de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

Agradezco a mi familia y amigos su apoyo y esperanza de que algún día acabaría esta tesis.

Gracias a todos.

Resumen

El sistema de posicionamiento global (GPS) es el sistema más utilizado en aplicaciones de localización en exteriores, pero es ineficiente para la localización en interiores. En los últimos años, los sistemas de posicionamiento en interiores se han desarrollado ampliamente. Para ello se han utilizado varias tecnologías inalámbricas, como ZigBee, WLAN y banda ultra ancha (UWB). Los principales métodos de medición de la señal inalámbrica en los sistemas de localización en interiores son el tiempo de llegada (TOA), la diferencia de tiempo de llegada (TDOA), el ángulo de llegada (AOA) y la indicación de intensidad de señal recibida (RSSI). Los sistemas de posicionamiento TOA, TDOA y AOA requieren una sincronización de tiempo precisa o un conjunto de antenas, lo que puede aumentar el coste del sistema. Por otro lado, un sistema de posicionamiento basado en RSSI utiliza características de la intensidad de la señal inalámbrica en el espacio y no requiere sincronización de tiempo ni mediciones de ángulos. Además, la medición de RSSI es relativamente sencilla y puede emplear tecnologías inalámbricas existentes sin ningún dispositivo de hardware adicional, lo que elimina el coste adicional y el consumo de energía. La mayoría de los trabajos de investigación de posicionamiento basados en RSSI utilizan la técnica *fingerprinting* y una amplia variedad de algoritmos para mejorar la precisión de la localización .

Sin embargo, la construcción de una extensa base de datos de puntos de referencia durante la llamada fase de calibración hace que la técnica *fingerprinting* requiera mucho tiempo y esfuerzo. Además, la flexibilidad de los dispositivos, ha permitido la toma de medidas de RSSI en diferentes canales de frecuencia y niveles de potencia, lo que ha posibilitado que se incremente el número de medidas RSSI para cada punto de referencia. Ello ha aumentado la precisión de la localización a costa de una base de datos mayor, lo que implica un mayor coste de tiempo y computación.

En esta tesis, tras el planteamiento inicial del problema de la localización en interiores y un estudio de las diversas técnicas y soluciones propuestas, haciendo hincapié la técnica de *fingerprinting*, se presentan diferentes opciones para reducir la base de datos durante la fase de calibración. La primera de ellas, consistente en un análisis de dichos niveles de potencias y canales utilizados, disminuyendo su número, estudiando posibles combinaciones y viendo su influencia en la precisión de la localización.

De igual modo, se puede reducir el esfuerzo en la construcción de la base de datos utilizando técnicas de interpolación. De esta manera, se reduce el número de puntos de referencia que necesitan ser tomados y se sustituyen por puntos generados mediante diversas funciones de interpolación. Se han evaluado diversos mapas de distribución de puntos y analizado su influencia en la precisión.

Desde otro punto de vista, se ha analizado el coste temporal de la creación de la base de datos y se ha propuesto un nuevo algoritmo que utiliza diferentes canales de frecuencia para evitar los periodos de contención de acceso al medio y permite a diversos dispositivos móviles acceder al canal para intercambiar paquetes con el mismo o con otras balizas al mismo tiempo. De esta manera, se reduce el tiempo empleado en la construcción de la base de medidas pero se mantiene el tamaño de dicha base con lo que la precisión del sistema no se ve alterada.

Por último, se presenta un nuevo algoritmo TDOA para dispositivos UWB. El método implementa un algoritmo de transmisión de una sola dirección para medir las diferencias del tiempo de llegada. Ello reduce la complejidad de los dispositivos, ya que sólo tienen que transmitir pero no recibir paquetes. Por otro lado, el algoritmo de localización propuesto no requiere una sincronización de tiempo permanente de los relojes de las balizas y la estimación de los tiempos de *offsets* se realizan conjuntamente con el cálculo de la posición.

Índice

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
1. Introducción	1
1.1. Marco de la investigación realizada	1
1.2. Motivación y objetivos de la tesis	6
1.3. Breve descripción de los contenidos	8
2. Estado del arte	11
2.1. Introducción	11
2.2. Sistemas de localización en interiores	12
2.2.1. Arquitectura de sistemas de localización en interiores .	12
2.2.2. Técnicas de localización	15
2.3. Metodologías de localización	16
2.4. Tecnologías inalámbricas	21
	XI

2.4.1. RFID	22
2.4.2. Banda ultra ancha	25
2.4.3. Redes de comunicaciones móviles	27
2.4.4. Red inalámbrica de área local	28
2.4.5. ZigBee	32
2.4.6. Otras tecnologías	34
2.5. La técnica de <i>fingerprinting</i>	36
2.5.1. Introducción	36
2.5.2. Algoritmos de <i>fingerprinting</i>	38
2.5.3. Métricas	54
2.6. Conclusiones	57
3. Descripción de los escenarios y del hardware utilizado	59
3.1. Introducción	59
3.2. Descripción de los escenarios	60
3.2.1. Descripción del escenario de la ETSE	60
3.2.2. Descripción del escenario de la UJI	63
3.3. Despliegue	65
3.3.1. Introducción	65
3.3.2. Despliegue en el escenario de la ETSE	66
3.3.3. Despliegue en el escenario de la UJI	66

3.4. Hardware utilizado en los escenarios	67
3.4.1. Motas Crossbow's TelosB	67
3.4.2. Microcontrolador CC2431 y <i>sockets</i>	69
3.4.3. Robot Lego Mindstorm EV3	71
3.4.4. Plataforma Erratic-Videre	75
3.4.5. Raspberry Pi	76
3.4.6. AOpen MiniPC MP915	78
3.4.7. Hardware auxiliar	78
3.4.8. Portátil	80
3.4.9. Montaje final	81
3.5. Conclusiones	82
4. Entrenamiento y localización	85
4.1. Introducción	85
4.2. Entrenamiento del sistema de la ETSE	85
4.3. Entrenamiento del sistema de la UJI	90
4.4. Desplazamiento por el escenario de la ETSE	93
4.5. Algoritmo de localización	97
4.6. Resultados	99
4.7. Conclusiones	102
5. Técnicas de reducción de medidas	105

5.1. Introducción	105
5.2. Propuesta de reducción	106
5.3. Estudio de potencias y canales	107
5.3.1. Una potencia y un canal	107
5.3.2. Estudio del efecto del número de canales	111
5.3.3. Estudio del efecto del número de potencias	113
5.3.4. Estudio del efecto del número de balizas	116
5.4. Propuestas alternativas	117
5.5. Conclusiones	118
6. Técnicas de interpolación	121
6.1. Introducción	121
6.2. Métodos de interpolación	122
6.3. Propuesta de reducción	124
6.4. Escenario ETSE	125
6.4.1. Configuración	125
6.4.2. Análisis de la base datos de interpolación	127
6.4.3. Análisis del error de localización	129
6.5. Escenario UJI	131
6.5.1. Configuración	131
6.5.2. Análisis de la base datos de interpolación	131

6.5.3. Análisis del error de localización	135
6.6. Conclusiones	139
7. Reducción temporal	141
7.1. Introducción	141
7.2. Análisis IEEE 802.15.4	142
7.2.1. Acceso al medio	142
7.2.2. Retraso de transmisión	144
7.2.3. Simulación del rendimiento	145
7.3. Nuevo protocolo MAC	147
7.3.1. Supuestos iniciales	147
7.3.2. Propuesta de protocolo	148
7.3.3. Análisis del consumo de energía	152
7.4. Resultados	153
7.4.1. Resultados de la simulación	153
7.4.2. Resultados experimentales	157
7.5. Conclusiones	160
8. Localización mediante TDOA en UWB	163
8.1. Introducción	163
8.2. Algoritmos TOA y TDOA	164
8.3. Nuevo algoritmo TDOA	166

8.3.1. Arquitectura del sistema	166
8.3.2. Algoritmo	167
8.4. Experimentos realizados	174
8.4.1. Primer despliegue	175
8.4.2. Segundo despliegue	180
8.5. Conclusiones	183
9. Conclusiones	185
9.1. Introducción	185
9.2. Aportaciones y resultados	185
9.3. Trabajo futuro	189
9.4. Publicaciones	191

Índice de figuras

1.1. Sistema de radiolocalización. La diferencia entre las distancias d del objeto P a dos emisoras $F1$ y $F2$ se mantenía constante $d(P, F1) - d(P, F2) = constante$	3
2.1. Sistema de localización en interiores: Sobre un escenario real se colocan una serie de dispositivos que intercambian señales para localizar los objetos móviles mediante un algoritmo informático.	13
2.2. Cada sensor tiene un alcance que cubre varias celdas. Estos alcances se superponen dando lugar a varias celdas cubiertas por varios sensores.	14
2.3. Topologías para los sistemas de localización. (A) El dispositivo móvil transmite la señal a varios dispositivos fijos que transmiten los resultados a una estación central. (B) El dispositivo móvil recibe la señal de los dispositivos fijos y es capaz de calcular su posición y transmitirla a la estación central.	15
2.4. Tiempo de llegada (TOA). Cada sensor determina una circunferencia donde puede estar situado el objeto a localizar. La intersección de las tres circunferencias determina la localización.	17
2.5. Diferencia en tiempo de llegada (TDOA). Las posibles ubicaciones del dispositivo con el mismo TDOA medido se encuentran en una hipérbola H_{AB} para los sensores A y B . La introducción de un tercer receptor (sensor C) en una tercera ubicación proporcionaría otra hipérbola H_{BC} . En la intersección de las dos hipérbolas se encuentra el dispositivo.	19

2.6.	Ángulo de llegada (AOA). Los receptores (sensores A y B) están colocados en posiciones conocidas. Conocida la distancia entre los sensores (distancia d), la ubicación del transmisor se puede encontrar por la intersección de varios pares de líneas de dirección angular (α_A y α_B).	20
2.7.	Comparativa de las tecnologías inalámbricas más utilizadas en función del alcance y la tasa de transmisión de datos.	22
2.8.	Diversos tipos de etiquetas de RFID.	23
2.9.	Error frente a fracción de puntos de calibración.	49
3.1.	Despachos del escenario de la ETSE	61
3.2.	Laboratorio y pasillo del escenario de la ETSE	62
3.3.	Esquema del escenario de la ETSE.	63
3.4.	Escenario pasillo de la UJI.	64
3.5.	Esquema del escenario pasillo de la UJI.	64
3.6.	Puntos de medida (color azul) y balizas (color verde) para el escenario de la ETSE.	66
3.7.	Los puntos verdes representan los puntos de medida y los puntos rojos (Bi) las cuatro balizas para el escenario de la UJI.	67
3.8.	Motas Crossbow's TelosB.	68
3.9.	Modelo elemental del microcontrolador CC2431.	70
3.10.	<i>Socket</i> módulo SoC_BB.	70
3.11.	<i>Socket</i> módulo SmartRF04EB.	71
3.12.	Diversos modelos de robots construidos con Lego.	71
3.13.	El "ladrillo" del EV3.	72

3.14. Modelo seleccionado (foto sacada del manual de Lego).	73
3.15. Bloques de acción: 1-4 Motores 5 Pantalla 6 Sonido 7 Luz de estado.	73
3.16. Bloques de flujo: 1 Iniciar 2 Esperar 3 Bucle 4 Interruptor 5 Interruptor de bucle.	74
3.17. Bloque de sensores: 1 Botones bloque EV3 2 Sensor de color 3 Sensor de infrarrojo 4 Rotación del motor 5 Temporizador 6 Sensor táctil.	74
3.18. Bloques de datos: 1 Variable 2 Constante 3 Op. secuenciales 4 Op. lógicas 5 Matemática.	74
3.19. Bloques de datos: 6 Redondear 7 Comparar 8 Alcance 9 Texto 10 Aleatorio.	74
3.20. Bloques avanzados: 1 Acceso al archivo 2 Mandar mensaje 3 Conexión Bluetooth 4 Mantener activo 5 Valor del sensor 6 Motor sin regular 7 Invertir el motor 8 Detener programa. . .	75
3.21. Mis bloques: 1-2 Para crear bloques propios a partir de segmentos de programa previos.	75
3.22. Plataforma Erratic-Videre.	76
3.23. Esquema interno de la Raspberry Pi modelo B1.	77
3.24. AOpen MiniPC MP915.	78
3.25. Montaje de la estructura de madera sobre el robot.	79
3.26. Esquema y foto de la placa de interconexión entre el robot Lego y la Raspberry Pi.	80
3.27. Montaje final de todos los dispositivos utilizados en el escenario de la ETSE.	81
3.28. Montaje final de todos los dispositivos utilizados en el escenario de la UJI.	82

4.1. Esquema de llamada/respuesta entre transmisor y baliza. . . .	87
4.2. Recorridos del robot Lego trazado con cinta adhesiva negra. .	93
4.3. Bloque principal de instrucciones.	94
4.4. Sensor de color (foto sacada del manual de Lego).	94
4.5. Bloque matemático.	95
4.6. Bloque de rotación.	95
4.7. Desplazamiento del Robot al girar 180° sobre la rueda C. . . .	96
4.8. Recorridos de ida 1-2 y vuelta 3-4.	96
4.9. Bloque de instrucciones de parada y arranque.	97
4.10. Porcentaje de puntos de medida que producen un error de localización inferior a cierto valor.	101
5.1. Error promedio en metros para cada potencia y canal para el escenario de la ETSE.	109
5.2. Error promedio en metros para cada potencia y canal para el escenario de la UJI.	110
5.3. Error promedio en metros para cada potencia a medida que se añaden canales para el escenario de la ETSE.	112
5.4. Error promedio en metros para cada potencia a medida que se añaden canales para el escenario de la UJI	113
5.5. Error promedio en metros para cada canal a medida que se añaden potencias para el escenario de la ETSE.	114
5.6. Error promedio en metros para cada canal a medida que se añaden potencias para el escenario de la UJI.	115

- 6.1. Mapa del escenario de prueba con: (arriba) 50 % de puntos de medida para dos distribuciones diferentes: (A) Uniforme; (B) Uniforme con los puntos complementarios del caso A; (abajo) Y con el 25 % de puntos de medida para otras dos distribuciones: (C) Uniforme; (D) Uniforme con puntos alternativos del caso C. Las X rojas denotan los puntos de medida, mientras que los puntos azules son los puntos interpolados. 126

- 6.2. Mapa de valores RSSI tomados en cada punto de medida del área de prueba. Cada valor de RSSI es el promedio de tres medidas tomadas en el objeto móvil cuando las seis balizas transmiten utilizando los seis canales y el nivel de potencia P30. 127

- 6.3. Mapa de valores RSSI tomados al 50 % del número total de puntos de medida del área de prueba. El otro 50 % de los puntos se han interpolado con la función *thin spline*. Cada valor de RSSI es el promedio de tres medidas tomadas en el objeto móvil cuando las seis balizas transmiten utilizando los seis canales y el nivel de potencia P30. 128

- 6.4. Diferencia en el mapa de valores RSSI entre el 50 % del número total de puntos de referencia tomados del área de prueba y el otro 50 % con puntos interpolados mediante la función *thin spline*. Cada valor de RSSI es el promedio de tres medidas tomadas en el objeto móvil cuando las seis balizas transmiten utilizando los seis canales y el nivel de potencia P30. 128

- 6.5. Mapa del escenario de prueba con: (columna izquierda) 50 % de puntos de medida para tres distribuciones diferentes: (A) Uniforme; (B) Uniforme con los puntos complementarios del caso A; (C) No uniforme por zona; y (columna derecha) 25 % de puntos de medida para otras dos distribuciones: (D) Uniforme; (E) Uniforme con puntos alternativos del caso D; (F) No uniforme por zonas. Las x denotan los puntos de medida, mientras que los puntos verdes son los interpolados. 132

- 6.6. Mapa de valores RSSI tomados en cada punto de medida del área de prueba. Cada valor de RSSI es el promedio de 5 cinco medidas tomadas en el objeto móvil cuando la baliza 4 transmite 5 paquetes utilizando el canal Ch11 y el nivel de potencia P3. 133

-
- 6.7. Mapa de radio con valores RSSI tomados al 50 % del número total de puntos de medida del área de prueba. El otro 50 % de los puntos se han interpolado con la función de *thin spline*. Cada valor de RSSI es el promedio de 5 cinco medidas tomadas en el objeto móvil cuando la baliza 4 transmite 5 paquetes utilizando el canal Ch11 y el nivel de potencia P3. 134
- 6.8. Diferencia en el mapa de valores RSSI entre el 50 % del número total de puntos de referencia tomados del área de prueba y el otro 50 % con puntos interpolados mediante la función *thin spline*. Cada valor de RSSI es el promedio de 5 cinco medidas tomadas en el objeto móvil cuando la baliza 4 transmite 5 paquetes utilizando el canal Ch11 y el nivel de potencia P3. . 134
- 6.9. Porcentaje de puntos de prueba por error de localización para el caso A de la Tabla 6.4 usando diferentes funciones de interpolación. 138
- 6.10. Porcentaje de puntos de medida incluidos en la base de datos frente al error de localización para el caso original sin interpolación y utilizando interpolación *thin spline*. 139
- 7.1. Versión no ranurada del protocolo IEEE 802.15.4 CSMA/CA. 143
- 7.2. Rendimiento total de la red para diferentes velocidades de transmisión y número de objetos móviles (U). 147
- 7.3. Secuencia de selección del objeto móvil y acceso al canal en el protocolo propuesto. 149
- 7.4. Secuencias de acceso a canales (Ch1, Ch2, Ch3 y Ch4) para tres objetos móviles (IDk, IDl e IDm) intercambiando paquetes con tres balizas (B1, B2 y B3) en paralelo. La figura muestra cómo se pueden multiplexar los intercambios de paquetes entre diferentes pares de objetos móviles y balizas en diferentes canales de frecuencia. 151

7.5. Retraso para recopilar los valores de RSSI con diferentes números de canales (K) y niveles de potencia (L). El número de retransmisiones (N) en cada combinación de canal y nivel de potencia es fijo e igual a 10.	155
7.6. Rendimiento total de la red con diferentes niveles de potencia (L) y número de retransmisiones (N).	156
7.7. Energía para diferentes niveles de potencia (L).	157
7.8. Error medio de localización absoluta en el retraso en la recopilación de los valores RSSI.	159
8.1. Secuencia de paquetes para obtener las marcas temporales para 4 balizas.	168
8.2. Ejemplo de regresión lineal para estimar el valor de y_{p-q}^n en el tiempo tb_i^q	172
8.3. Representación de las configuraciones experimentales para la primera implementación.	176
8.4. Resultados para el primer despliegue y la primera posición del objeto móvil. El algoritmo de estimación de los ${}^rTDOA_{p-q}$ se ejecuta repetidamente NR veces. El tamaño de la ventana es el número de paquetes enviados por el objeto móvil y las marcas temporales utilizadas en la regresión lineal. Los resultados muestran el error de la localización del nodo móvil en función de NR y la ventana de la regresión.	177
8.5. Valor medio de ${}^rTDOA_{3-1}$ calculado después de repetir NR veces el algoritmo de estimación para diversos tamaños de la ventana de la regresión lineal, en el primer despliegue y la primera posición del objeto móvil.	178
8.6. Valor medio de ${}^rTDOA_{3-4}$ calculado después de repetir NR veces el algoritmo de estimación para diversos tamaños de la ventana de la regresión lineal, en el primer despliegue y la primera posición del objeto móvil.	178

-
- 8.7. Resultados para el primer despliegue y la segunda posición del objeto móvil. El algoritmo de estimación de los ${}^rTDOA_{p-q}$ se ejecuta repetidamente NR veces. El tamaño de la ventana es el número de paquetes enviados por el objeto móvil y las marcas temporales utilizadas en la regresión lineal. Los resultados muestran el error de la localización del nodo móvil en función de NR y la ventana de la regresión. 179
- 8.8. Valor medio de ${}^rTDOA_{3-1}$ calculado después de repetir NR veces el algoritmo de estimación para diversos tamaños de la ventana de la regresión lineal, en el primer despliegue y la segunda posición del objeto móvil. 179
- 8.9. Valor medio de ${}^rTDOA_{3-4}$ calculado después de repetir NR veces el algoritmo de estimación para diversos tamaños de la ventana de la regresión lineal, en el primer despliegue y la segunda posición del objeto móvil. 180
- 8.10. Representación de la configuración experimental para el segundo despliegue. 181
- 8.11. Fotos del laboratorio y pasillo del segundo despliegue. 181
- 8.12. Resultados para el segundo despliegue. El algoritmo de localización se ejecuta repetidamente NR veces. El tamaño de la ventana es el número de paquetes enviados por el objeto móvil y las marcas de tiempo utilizadas en la regresión lineal. Los resultados muestran el promedio de los valores de NR en cada punto de prueba y todo el promedio de los valores provenientes de todos los puntos de prueba. 182

Índice de Tablas

2.1. Análisis comparativo de las tecnologías ZigBee, Bluetooth y WIFI.	33
2.2. Precisión para los distintos algoritmos presentados. El sufijo R indica dimensión reducida, el prefijo K indica el algoritmo KOLA y el prefijo WK indica el algoritmo <i>Weigthed</i> KOLA. . .	43
2.3. Precisión para los distintos algoritmos presentados.	44
2.4. Precisión de la localización en metros para los algoritmos descritos.	50
2.5. Precisión de la localización en metros para los algoritmos presentados.	51
4.1. Valores de niveles de potencias utilizados en la toma de datos para construir la base de calibración en el escenario de la ETSE.	86
4.2. Valores de niveles de frecuencias utilizados en la toma de datos para construir la base de calibración en el escenario de la ETSE.	86
4.3. Valores de niveles de potencias utilizados en la toma de datos para construir la base de calibración en el escenario de la UJI.	91
4.4. Valores de niveles de frecuencias utilizados en la toma de datos para construir la base de calibración en el escenario de la UJI.	91

4.5.	Resultados del error promedio en metros para el algoritmo de k -vecinos original y el algoritmo de k -vecinos modificado para el escenario ETSE.	100
4.6.	Resultados del error promedio en metros para el algoritmo de k -vecinos original y el algoritmo de k -vecinos modificado para el escenario UJI.	102
5.1.	Error promedio en metros para cada potencia y canal para el escenario de la ETSE.	108
5.2.	Error promedio en metros para cada potencia y canal para el escenario de la UJI.	110
5.3.	Error promedio en metros para cada potencia a medida que se añaden canales para el escenarios de la ETSE.	111
5.4.	Error promedio en metros para cada potencia a medida que se añaden canales para el escenario de la UJI.	112
5.5.	Error promedio en metros para cada canal a medida que se añaden potencias para el escenario de la ETSE.	114
5.6.	Error promedio en metros para cada canal a medida que se añaden potencias para el escenario de la UJI.	115
5.7.	Error promedio en metros según el número de balizas utilizadas para el escenario de la ETSE.	116
6.1.	Porcentaje promedio de error entre el RSSI medido y estimado, cuando el 50 % de los puntos de medida son interpolados. . . .	129
6.2.	Precisión media de la localización con diferentes funciones de interpolación (thin, euclidiana, multiquadrática y poliarmónica con $n = 4$) y porcentaje de puntos de medida: 50 % y 25 %. En ambos casos, se consideran dos selecciones diferentes de los puntos interpolados.	130

-
- 6.3. Porcentaje promedio de error entre el RSSI medido y estimado, cuando el 50 % de los puntos de medida son interpolados. . . . 135
- 6.4. Precisión media de la localización con diferentes funciones de interpolación (thin, euclidiana, multiquadrática y poliarmónica con $n = 4$) y porcentaje de puntos de medida: 50 % y 25 %. En ambos casos, se consideran tres selecciones diferentes de los puntos interpolados. 136
- 7.1. Corriente del dispositivo inalámbrico CC2420 en los modos de recepción y transmisión con diferentes niveles de potencia. Los valores se toman de la hoja de datos CC2420. 156

Capítulo 1

Introducción

1.1. Marco de la investigación realizada

Desde tiempos antiguos, la necesidad del hombre de conocer su ubicación sobre la superficie de la Tierra ha sido uno de sus principales desafíos. Sin ese conocimiento, los desplazamientos por tierra debían realizarse en base a unos puntos de referencia conocidos, como montañas o ríos, y los desplazamientos por mar debían limitarse a mantener visible la línea costera. La observación astronómica permitió obtener unas referencias espaciales, como la posición del norte gracias a la estrella Polar, y unas referencias temporales, gracias a la altura relativa de nuestro sol. Posteriormente, se desarrollaron dispositivos que permitían medir con mayor exactitud la altura de los astros como el astrolabio [1], inventado por Apolonio de Berga entre el año 220 y el 150 A.C. Este instrumento permitía calcular la posición inclinada de un astro en el cielo, de día o de noche, y de este modo, determinar la latitud local dado el tiempo local. Por ello, también era necesario conocer de forma más exacta el tiempo, lo que implicó un desarrollo de mecanismos más fiables para la medición del tiempo.

Otro descubrimiento fundamental fue la brújula [2]. Inventada en China hacia el siglo IX, este instrumento usa una aguja imanada que indica el norte magnético terrestre. La brújula, aunque superada ya por otros métodos de orientación y localización, se sigue utilizando hoy en día en barcos y aviones como guía suplementaria, en caso de fallo de los otros sistemas, ya que la

brújula no necesita electricidad para su funcionamiento.

En las primeras décadas del siglo XX se desarrollaron dos sistemas de localización que siguen en uso actualmente: el sonar, basado en ondas sonoras [3], y el radar, basado en ondas de radio [4].

El desarrollo de vehículos más veloces hizo necesario la creación de sistemas de localización que calculasen la posición de una manera más rápida y precisa y que funcionasen bajo condiciones atmosféricas adversas. El impulso principal vino de las aplicaciones militares que necesitaban conocer la posición de sus tropas para poder desarrollar una estrategia de combate.

Estos sistemas de posicionamiento iniciales estaban íntimamente relacionados con la navegación. Se desarrollaron dos técnicas de navegación: los sistemas inerciales y los sistemas por radiolocalización.

Los sistemas inerciales se basan en la relación entre la posición y la aceleración. Se utilizan acelerómetros y giroscopios para calcular las variaciones de dirección y velocidad. Conocido el punto inicial de donde se parte, se puede calcular la posición relativa en un momento dado. Estos sistemas tienen la ventaja de que son independientes de las condiciones externas y se han usado para la guía de torpedos y misiles. Por el contrario, tienen el inconveniente de que el error producido se acumula, por lo que las desviaciones de la posición aumentan con el tiempo.

Los sistemas basados en radiolocalización tienen como principio la intersección de ondas de radio que miden la diferencia del tiempo de llegada de esas ondas desde estaciones base sincronizadas y con una posición conocida. El receptor calcula las diferencias entre los tiempos de llegada de la señal procedente de la emisora maestra y de las emisoras secundarias que determina una hipérbola. La posición del receptor se establece por la intersección de dos o más hipérbolas (Figura 1.1).

Dos sistemas de radiolocalización que se desarrollaron durante la Segunda Guerra Mundial, fueron el sistema Gee británico [5] y el sistema Loran (*Long Range Navigation*) [6], por parte de los Estados Unidos. Éste último utilizaba señales de más baja frecuencia para mejorar el alcance. Se usaba para guiar a los convoyes de barcos durante la campaña del Pacífico. Posteriormente, se desarrollaron los sistemas por satélite como Transist [7] en los años cincuenta, que utilizaba el efecto Doppler para localizar un objeto.

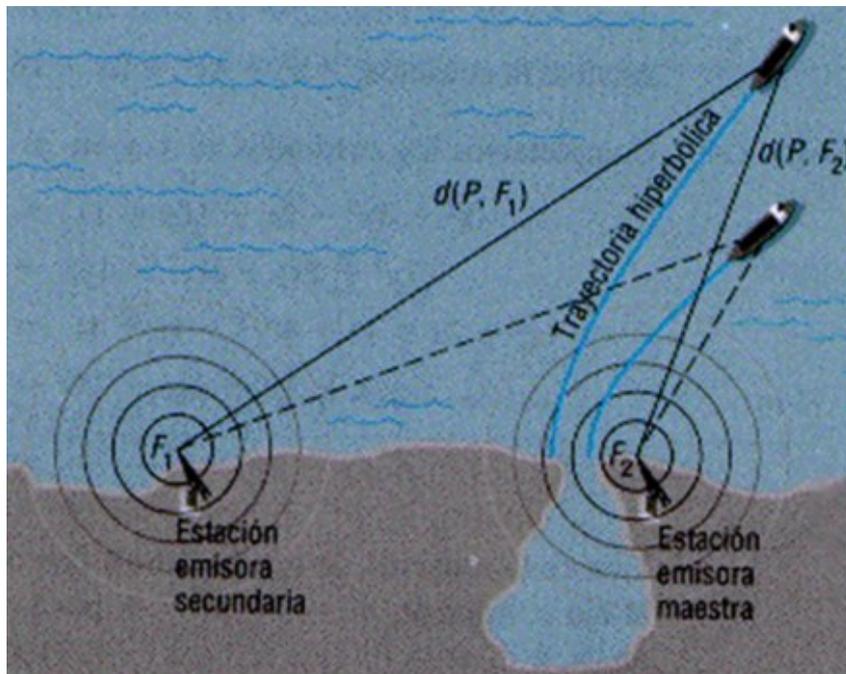


Figura 1.1: Sistema de radiolocalización. La diferencia entre las distancias d del objeto P a dos emisoras F_1 y F_2 se mantenía constante $d(P, F_1) - d(P, F_2) = \text{constante}$.

Actualmente, los sistemas de posicionamiento más extendidos se basan en la radiolocalización y se pueden categorizar dependiendo del ambiente de uso como: de interior, al aire libre o de tipo mixto. Para la localización en un entorno exterior, los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite Systems*), como el GPS (*Global Positioning System*) [8], se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones, incluidos los sistemas de seguimiento y gestión de productos, navegación y guía de transporte, sincronización de las redes de telecomunicaciones y estudios geodésicos. El GPS funciona muy bien en el posicionamiento al aire libre. Por desgracia, el GPS no funciona bien en los centros urbanos con vías estrechas y rodeadas de construcciones de gran altura, cerca de las paredes, los edificios, los árboles y en entornos subterráneos, ya que la señal de los satélites GPS es demasiado débil para atravesar la mayoría de los edificios. Por ello, el GPS es ineficaz para la localización en interiores [9].

El posicionamiento en interiores [10] puede definirse como cualquier sistema que proporcione una posición precisa dentro de una estructura cerrada,

tales como centros comerciales, hospitales, aeropuertos, edificios, metro sub-urbano y campus universitarios.

Por la naturaleza compleja de los ambientes interiores, el desarrollo de una técnica de localización en interiores está siempre asociada con un conjunto de desafíos tales como dimensiones más pequeñas, falta de visión directa, influencia de obstáculos, paredes, movimiento de seres humanos, puertas, y otros factores. Además, las señales son reflejadas y atenuadas por las paredes y el mobiliario y se produce interferencia por la presencia de otras señales radioeléctricas [11]. Estos desafíos se deben principalmente a la influencia de los obstáculos sobre la propagación de las ondas electromagnéticas. Para obtener resultados precisos, un sistema de posicionamiento debe ser capaz de manejar estos problemas. Además, también se requiere una mayor precisión en el interior para localizar un dispositivo móvil que debería ser, por lo menos, capaz de determinar la estancia correcta.

Para hacer frente a estos problemas es necesario establecer otros mecanismos. Por ejemplo, ante la falta de visión directa entre los satélites del sistema GPS y un dispositivo móvil a localizar dentro de un escenario de interior, una posible solución es utilizar una red inalámbrica ya existente en dicho escenario. La red se utiliza para localizar objetivos móviles que incorporan dispositivos transmisores de radiofrecuencia (RF, *Radio-frequency*) [12, 13] u otros dispositivos. En general, una serie de puntos de acceso se distribuyen en posiciones conocidas y el intercambio de información entre ellos permite que se detecte la posición de los dispositivos móviles.

Los métodos de localización más usados [14] incluyen mediciones del tiempo de propagación de la señal, a fin de obtener el intervalo de tiempo que tarda en llegar una señal de RF desde el emisor al receptor. Este tiempo es conocido como tiempo de llegada (TOA, *Time of arrival*). También se puede utilizar la diferencia de tiempo de llegada (TDOA, *Time Difference of Arrival*). Otros métodos de localización utilizan el ángulo de llegada de la información (AOA, *Angle of Arrival*) o el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI, *Received Strength Signal Indicator*). Los métodos basados en el tiempo necesitan de una buena sincronización en el rango de los nanosegundos. Por otra parte, las interferencias y la directividad de las antenas también pueden afectar a la precisión de la medida. Los sistemas basados en RSSI tienen la ventaja de que pueden ser implementados en los sistemas inalámbricos sin modificar el hardware existente. Tecnologías como ZigBee, Bluetooth y Red inalámbrica de área local (WLAN, *Wireless Local Area Network*) [15, 16] están ya presentes en casi todas partes, ya que los sistemas basados en RSSI

son muy baratos de implementar. Sin embargo, las lecturas RSSI a menudo no son muy precisas debido a las interferencias [17], y aunque muchos estudios han demostrado que es posible realizar la localización, la precisión no suele ser inferior al metro. Por ese motivo, los sistemas basados en RSSI son los más utilizados en aplicaciones de bajo coste en este rango de precisión.

Fundamentalmente, la localización basada en RSSI tiene un problema de inferencia. Dadas algunas mediciones de RSSI, el objetivo del sistema es estimar la ubicación de los dispositivos móviles en un escenario. Esta tarea, aparentemente fácil, se complica por el hecho de que es difícil obtener modelos de propagación para ambientes interiores. Debido a las reflexiones, refracciones y otros efectos por múltiples trayectorias (*multipath*), es difícil describir las propiedades de las mediciones de la intensidad de la señal. Numerosos métodos y algoritmos se han propuesto y estudiado. La técnica *fingerprinting* es una de las más populares y que mejores resultados ha proporcionado [18,19]. En esta técnica, varios dispositivos fijos de radiofrecuencia se despliegan para proporcionar una cobertura superpuesta de un área, tal como una planta de un edificio de oficinas. Un dispositivo móvil, desplazándose por posiciones conocidas, transmite señales periódicamente. Las intensidades de señal en cada dispositivo fijo se miden y se almacenan. Es la llamada fase de entrenamiento o calibración en la que cada entrada se almacena en un registro que tiene el formato de $(x, y, rss_1, \dots, rss_N)$, donde (x, y) es la posición del dispositivo móvil, rss_i la intensidad de la señal recibida en dBm en el i -ésimo dispositivo fijo. El número total de dispositivos fijos, N , debe ser al menos de tres para proporcionar una buena precisión en la localización. Para reducir el efecto del ruido, cada rss_i suele ser el promedio de múltiples mediciones recogidas durante un periodo de tiempo. La recopilación de todas las mediciones forma un mapa de radio que consiste en las intensidades medidas de la señal, o *fingerprinting*, en cada posición muestreada. Una vez creado el mapa, un dispositivo móvil se puede localizar midiendo en cada dispositivo fijo las intensidades de señal emitidas por el dispositivo móvil. Es la llamada fase de localización. Para localizar al dispositivo móvil, se busca en el mapa de radio recopilado en la fase de entrenamiento, y se encuentra el *fingerprint* que mejor se adapte a las intensidades de la señal observadas. Para ello, un dispositivo fijo central compara la energía observada de la señal (rss'_1, \dots, rss'_N) con las $(x, y, rss_1, \dots, rss_N)$ registradas, y escoge la ubicación (x, y) que minimiza alguna métrica de distancia, por ejemplo, la distancia euclidiana, como la estimación de ubicación del objeto móvil. Esta técnica se llama la técnica del vecino más próximo en el espacio de señales (NNSS, *Nearest Neighbor in Signal Space*). Otra variante de esta técnica implica encontrar los k -vecinos más próximos en el espacio de señales (KNNSS, *k-Nearest Neighbor in Sig-*

nal Space), y promediar sus coordenadas para obtener la estimación de la ubicación.

1.2. Motivación y objetivos de la tesis

Los métodos de *fingerprinting* presentan diversos inconvenientes. En la fase de calibración, para la construcción inicial de la base de datos, se necesita una cantidad considerable de tiempo y esfuerzo. El escenario de estudio puede estar formado por distintas plantas de un edificio o abarcar una superficie muy amplia. Para mejorar la precisión de la localización, se suele incrementar el número de puntos de referencia, incrementar el número de dispositivos de medida o aumentar el número de medidas que formarán el mapa *fingerprint*. Todo ello conlleva un incremento de tiempo y recursos a la hora de conformar la base de datos. Y, en caso de modificaciones (alteraciones de mobiliario, tabiques, etc.), es necesario reconstruir dicha base de datos. Además, durante la fase de localización, los algoritmos involucrados necesitan una considerable cantidad de datos, grandes cantidades de memoria y recursos de computación para llevar a cabo la estimación de la localización en tiempo real.

Para mejorar la precisión del método *fingerprinting* se han propuesto diferentes algoritmos que incluyen aproximaciones probabilísticas y deterministas [20–22]. Algunos métodos proponen mejorar la precisión de las medidas RSSI durante la fase de calibración exigiendo que estos valores cumplan ciertos requisitos (estar fuera de cierto rango, eliminar valores iguales para diferentes coordenadas, etc.) para ser validadas [23, 24] o introducen lógica difusa [25]. Otros métodos combinan las medidas RSSI con otros parámetros físicos (movimiento, aceleración, etc.) [26].

Aunque la mayoría de los sistemas generalmente sólo han utilizado una frecuencia y un o unos pocos niveles de potencia de la señal transmitida, el incremento de la complejidad de los dispositivos, en cuanto a selección de canales y niveles de potencia, ha hecho posible el incremento del número de medidas RSSI que se pueden realizar para cada punto de medida en el mapa *fingerprint* al combinar diversos canales y niveles de potencia [27]. Este incremento ayuda a mejorar la precisión de la localización a costa de incrementar el tamaño de la base de datos, lo que conlleva un mayor tiempo durante la recopilación de los datos y un mayor coste computacional durante el proceso de localización. Se han realizado trabajos que estudian la influencia en la

precisión de los niveles de potencia utilizados [28], aunque la dependencia respecto al escenario utilizado puede ser notable.

En esta tesis se realiza un estudio de los desafíos que plantea la localización en interiores y se presentan algunas de las soluciones planteadas mediante las diversas técnicas inalámbricas que actualmente se utilizan en los sistemas de localización, analizando los diferentes algoritmos de *finger-printing* que han sido publicados. Dado que el principal escollo consiste en el esfuerzo y tiempo necesarios para la construcción de la base de datos de calibración se analizan diversas maneras de reducir dicha base, tanto desde el punto de vista del tamaño como desde el punto de vista del tiempo necesario para la construcción de la base de datos.

Para ello, se presentan propuestas de mejora basadas en la reducción de la base de calibración mediante el análisis de los niveles de potencia y los canales utilizados, disminuyendo su número, estudiando posibles combinaciones y viendo su influencia en la precisión. Otra posible manera de construir la base de calibración consiste en aplicar técnicas de interpolación [29, 30] y disminuir así el número de puntos de medida experimentales tomados en la etapa inicial. Se evalúan diversos métodos de interpolación, se analizan diferentes distribuciones de puntos, su influencia en la precisión de la localización obtenida para diversos escenarios y también se presentan propuestas de mejora.

Los métodos antes propuestos para reducir el tamaño de la base de datos utilizando menos niveles de potencia y canales de frecuencia, así como las técnicas de interpolación, pueden provocar una posible disminución en la precisión de la localización. Al haber menos puntos de medida con los que comparar o ser estos puntos no reales sino interpolados, se puede producir un incremento del error promedio.

El tamaño de la base de datos de calibración también depende del escenario elegido. Evidentemente, escenarios mayores implican un mayor número de puntos, y por tanto, una base de datos mayor. Escenarios más cerrados pueden necesitar un mayor número de balizas o más niveles de potencia para poder cubrir toda el área a medir. Para esta tesis, se tomaron datos en un escenario ubicado en el edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Valencia (ETSE) y, en colaboración con la Universidad Jaime I de Castellón, también se presenta otro escenario con características diferentes cuyos datos se tomaron en dicha Universidad.

Otro factor a tener en cuenta, junto con la precisión de la localización,

es el tiempo de cómputo de la estimación. En este tiempo tiene una gran influencia el tiempo que se emplea en la recolección de los valores RSSI. Por ello, se analizan los actuales protocolos de acceso al medio y se propone un protocolo de mejora para reducir el tiempo empleado en la toma de los puntos de medida mediante la optimización del protocolo de transmisión inalámbrica de paquetes de datos.

Finalmente, el abaratamiento de los dispositivos de Banda Ultra Ancha (UWB, *Ultra Wide Band*) [31] ha permitido instalar un sistema de localización basado en esta tecnología que utiliza pulsos muy cortos (inferiores a 1 nanosegundo) con un ciclo de trabajo reducido y un bajo nivel de energía. Para solventar los problemas de sincronización inherentes a estos dispositivos se ha desarrollado un nuevo algoritmo para mejorar la estimación de los retrasos temporales y la localización. Asimismo, se ha comparado la precisión de estos sistemas con los basados en la toma de valores de RSSI.

1.3. Breve descripción de los contenidos

Tras el planteamiento inicial del problema de localización en interiores y un estudio de las diversas técnicas y soluciones propuestas, esta tesis se centra principalmente en la técnica de *fingerprinting* en sistemas de sensores. Se han realizado experimentos sobre diversos escenarios utilizando tecnología ZigBee y UWB. El estudio de los métodos RSSI considera variaciones en el número de niveles de potencia y canales que permitan optimizar la base de datos de calibración al tiempo que se mantiene un compromiso con los niveles de precisión en la localización. Asimismo, se analiza el uso de diversos métodos de interpolación para reducir el número de puntos de medida y se estudia su influencia en la precisión de la localización obtenida. También se analiza el coste temporal que supone la recolección de los valores RSSI y se propone un nuevo protocolo de intercambio de información para mejorar los tiempos de espera en la localización con múltiples dispositivos móviles. Por último, se realiza un estudio de la localización de dispositivos en un escenario cubierto por varias balizas mediante transmisión de señal UWB y se presenta un algoritmo que gestiona de manera más eficiente las transmisiones de paquetes y tiene en cuenta las diferentes desviaciones de los relojes de los osciladores de las balizas para mejorar la estimación de los *offsets* entre ellos.

Los capítulos que componen la tesis son:

- Después del primer capítulo donde se presenta una breve introducción general y se exponen los objetivos que se pretenden obtener, en el capítulo dos se introduce el concepto de localización en interiores, se realiza una descripción de la metodología de la localización haciendo especial hincapié en la técnica de *fingerprinting* y se describen las diferentes tecnologías inalámbricas que utilizan los actuales sistemas de localización.
- En el tercer capítulo se describen los escenarios empleados en la investigación y las plataformas hardware utilizadas para el posicionamiento automatizado del robot sobre los escenarios considerados, así como los dispositivos inalámbricos utilizados en la fase experimental.
- En el cuarto capítulo se describen los programas implicados en el desplazamiento del robot y en la toma de datos. También se exponen los experimentos realizados y los resultados obtenidos utilizando las técnicas *fingerprinting* y los algoritmos propuestos.
- En el capítulo cinco se analizan los principales problemas de las técnicas de *fingerprinting*. Se estudia la influencia del número de canales y potencias en la precisión de la localización y se presentan diversos escenarios para su comparación, proponiendo soluciones alternativas a los resultados obtenidos.
- En el capítulo seis se estudian diversas técnicas de interpolación para reducir el tamaño inicial de la base de datos de calibración y se analiza su aplicación a diferentes distribuciones de puntos de medida sobre los escenarios elegidos, presentando propuestas de mejora.
- En el séptimo capítulo se estudian los actuales protocolos de acceso al medio y se propone un nuevo protocolo que permite agilizar la toma de medidas para reducir de manera apreciable el tiempo empleado cuando hay varios dispositivos móviles.
- En el octavo capítulo se estudian los dispositivos de UWB para la localización en interiores y se presenta un nuevo algoritmo que utiliza un método TDOA para estimar la ubicación del objeto a localizar.
- En el capítulo noveno se resumen las aportaciones realizadas y se exponen las conclusiones alcanzadas, incluyendo las nuevas líneas de trabajo abiertas por esta tesis.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Introducción

En ambientes al aire libre, la infraestructura de satélites del sistema GPS es el método más utilizado en los sistemas de localización. Sin embargo, en ambientes interiores, este sistema no puede ser utilizado, ya que la señal GPS no está disponible, y hay que recurrir a otras técnicas.

En la actualidad, estas técnicas pueden basarse en el uso individual o combinado de sistemas láser, sistemas de ultrasonidos o incluso, sistemas de procesamiento de imágenes, para estimar la localización en interiores. Sin embargo, cuando las condiciones del entorno se ven afectadas por circunstancias adversas (humo, baja visibilidad, obstáculos, etc.) se debe recurrir a otro tipo de técnicas como las basadas en el radar o señales de radiofrecuencia.

En este capítulo se introduce, en primer lugar, el concepto de sistemas de localización en interiores. Se presentan las topologías típicas de estos sistemas, así como los distintos tipos de técnicas de localización. A continuación, se describe la metodología de localización convencional con sus técnicas principales (TOA, TDOA, AOA y RSSI). Se analizan las tecnologías más populares utilizadas en estos sistemas como son los identificadores de radiofrecuencia (RFID), la banda ultra ancha (UWB), las redes de comunicaciones móviles, las WLANs, los dispositivos ZigBee y otras tecnologías de comunicación inalámbricas. Se hace especial hincapié en la técnica basada en un

mapa de valores (*fingerprinting*), comentando y comparando varios sistemas típicos de localización en interiores que utilizan dicha técnica.

2.2. Sistemas de localización en interiores

Aunque se llevan realizando trabajos sobre sistemas de localización en espacios cerrados desde mediados de los años 80, estos estaban centrados principalmente en aplicaciones militares e industriales, mientras que su aplicación en el campo civil es comparativamente nueva, ya que ha sido desarrollada durante las últimas décadas.

Entre las múltiples aplicaciones de los sistemas de localización en interiores se pueden destacar el uso en sistemas industriales que mejoran la eficiencia de la producción mediante una mejor monitorización y control de la producción (industria del automóvil), seguimiento de público en conferencias y parques de atracciones, seguimiento de personal sanitario y equipo médico en grandes hospitales, distribución de equipajes y seguridad en aeropuertos, localización de artículos en grandes almacenes, etc.

2.2.1. Arquitectura de sistemas de localización en interiores

La Figura 2.1 ilustra un despliegue típico para un sistema de localización en interiores. Los sistemas de localización en interiores generalmente constan de los siguientes componentes:

- (a) Un conjunto de dispositivos utilizados para intercambiar señales y detectar los parámetros (tiempo, intensidad de señal, ángulo de la señal recibida, etc.) que contienen las referencias (distancia, dirección, etc.) para la localización de los objetivos (personas u objetos).
- (b) Un dispositivo que actúa como transmisor emitiendo la señal o recibiendo la respuesta ante la solicitud de localización de los otros dispositivos.

- (c) Un programa que recoge las mediciones y ejecuta un algoritmo para determinar la ubicación del objetivo a localizar.
- (d) Una plataforma que puede combinar la localización y otra información útil para proporcionar un servicio a los usuarios del sistema.

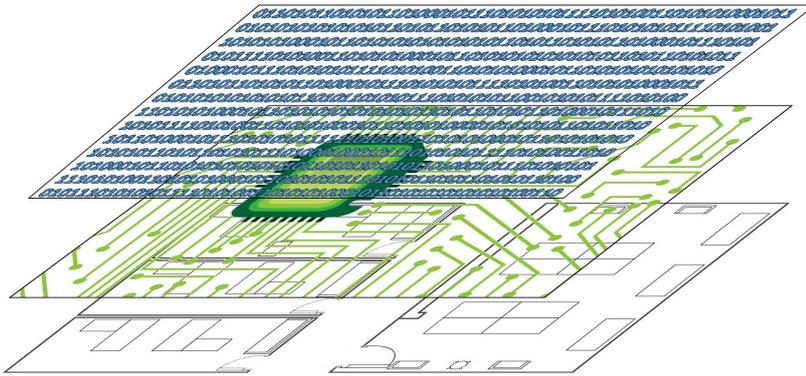


Figura 2.1: Sistema de localización en interiores: Sobre un escenario real se colocan una serie de dispositivos que intercambian señales para localizar los objetos móviles mediante un algoritmo informático.

Un sensor, en un sistema de localización en interiores, es un dispositivo que transmite o recibe y procesa una señal para estimar cualquier tipo de información física necesaria para llevar a cabo la localización. Estos sensores pueden actuar como transmisores o como receptores, o como ambos a la vez, de la señal utilizada. A su vez, deben estar comunicados con algún sistema que recopile la información para su posterior procesamiento.

Los sensores que actúan como receptores o transmisores pueden estar desplegados en el escenario considerado exclusivamente para fines de localización, o pueden ser parte de una infraestructura existente que proporciona una variedad de servicios.

El sensor que actúa como transmisor o receptor es, por lo general, un pequeño dispositivo pasivo o activo (por ejemplo, etiquetas de radiofrecuencia o *tags*, teléfonos móviles, ordenadores portátiles) que puede ser usado por personas o estar unido a los objetos de interés.

El término celda se utiliza para describir una unidad de superficie interior cubierta por una serie de receptores que trabajan juntos para encontrar la ubicación del transmisor en esa celda (Figura 2.2). El tamaño de la celda varía de un sistema a otro, dependiendo de la tecnología, la potencia de transmisión, tipo de sensores, etc. Este tamaño condiciona el error mínimo entre la celda donde está el objeto a localizar y las diferentes celdas vecinas en que dicho objeto puede ser posicionado por el sistema. Diferentes tamaños de celdas y de forma pueden coexistir en un sistema de localización en interiores según la situación específica. Mientras que una celda es cubierta por una serie de sensores, un sensor puede estar cubriendo varias celdas.

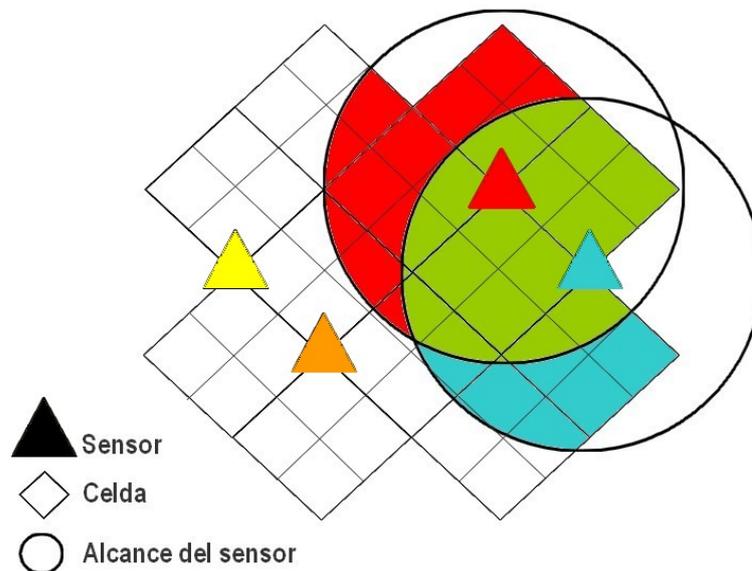


Figura 2.2: Cada sensor tiene un alcance que cubre varias celdas. Estos alcances se superponen dando lugar a varias celdas cubiertas por varios sensores.

Teniendo en cuenta la posición desde donde se hacen las medidas y la posición desde donde se utiliza la información, se pueden establecer dos tipos diferentes de topologías diferentes para los sistemas de localización [32] (Figura 2.3). La primera es el sistema de posicionamiento remoto en el que el dispositivo móvil es el transmisor de la señal o la señal es reflejada en él y varios dispositivos de medida fijos reciben dicha señal. Los resultados de todos estos dispositivos fijos son recopilados y la localización del transmisor se realiza en una estación central. La segunda es el autopoicionamiento en el cual el dispositivo de medida es el mismo dispositivo móvil. Este dispositivo

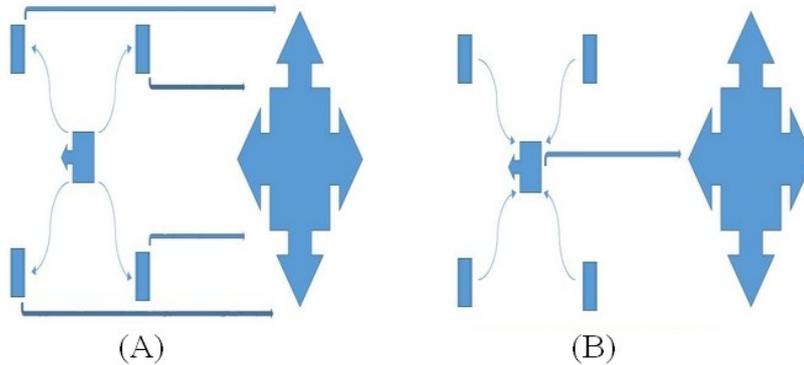


Figura 2.3: Topologías para los sistemas de localización. (A) El dispositivo móvil transmite la señal a varios dispositivos fijos que transmiten los resultados a una estación central. (B) El dispositivo móvil recibe la señal de los dispositivos fijos y es capaz de calcular su posición y transmitirla a la estación central.

recibe las señales de varios transmisores dispuestos en localizaciones conocidas y tiene la capacidad de calcular su posición basándose en las señales recibidas.

Si se establece un medio de comunicación inalámbrico en un sistema de posicionamiento, es posible enviar los resultados de las medidas desde el dispositivo de medida por autoposicionamiento a una estación remota. Esto se denomina posicionamiento remoto indirecto. Si los resultados de las medidas son enviadas desde una estación remota a una unidad móvil vía una conexión inalámbrica, se denomina autoposicionamiento indirecto.

2.2.2. Técnicas de localización

En función de la infraestructura existente hay dos maneras de enfocar el diseño de un sistema de localización en interiores. La primera de ellas consiste en el desarrollo de un nuevo sistema autónomo, incluidos los receptores y los transmisores, cuyo único propósito es su utilización para identificar la ubicación del objeto a localizar. El otro enfoque es usar la infraestructura ya existente, desplegada para propósitos generales, y aprovechar sus señales para localizar un objetivo.

En el primer tipo de sistema de localización en interiores los diseñadores tienen un control total sobre las especificaciones físicas y, en consecuencia, sobre la calidad de los resultados de la ubicación, lo que aumenta la precisión y el rendimiento del sistema. Los sistemas de esta categoría por lo general incluyen el hardware y el software completo relacionados con las tareas de localización. Por lo tanto, este tipo de sistemas tiene que ser instalado en el área de interés y el mantenimiento de tales sistemas requiere cuidados específicos.

En el segundo tipo de sistema de localización en interiores se evita el esfuerzo en términos de tiempo y coste necesario para la instalación de una nueva infraestructura y tiene la ventaja de la existencia de diversas aplicaciones informáticas que se pueden adaptar rápidamente a la infraestructura ya presente. Estos sistemas, sin embargo, necesitan ser complementados con algoritmos inteligentes adicionales para compensar la baja precisión de las referencias medidas.

Aparte del enfoque del diseño, otra forma de clasificar las técnicas de localización es mediante alguna característica de la señal medida. Por ejemplo, algunos de los sistemas pueden medir el tiempo de propagación de la señal a fin de obtener la distancia entre el transmisor y el receptor, método conocido como tiempo de llegada (TOA, *Time of arrival*). En otros casos, el nivel de potencia de la señal recibida (RSSI, *Radio Signal Strength Indicator*) se puede utilizar para estimar la distancia. También hay sistemas de medición basados en la diferencia del tiempo de llegada a varios receptores (TDOA, *Time Difference of Arrival*) y en el ángulo de llegada de la señal (AOA, *Angle of Arrival*). Los algoritmos de localización detrás de estos métodos son muy diversos. El método de localización adoptado por un sistema es mucho más relevante para el rendimiento de la localización que el tipo de infraestructura. En consecuencia, vamos a dedicar la siguiente sección, a la revisión de estos métodos de localización.

2.3. Metodologías de localización

La metodología de localización se ocupa de cómo localizar un objeto con la información física detectada en el proceso de medición. Las referencias más utilizadas son el tiempo y la distancia, mientras que en un sistema *fingerprinting* el objeto de la localización se ubica examinando el patrón

de radiación de la señal recibida. En [14] se realiza un estudio comparativo de varios métodos de localización que pueden ser utilizados en interiores, la mayor parte de ellos utilizan señales de radiofrecuencia.

A continuación, se resumen las técnicas principales.

- Tiempo de llegada (TOA): En el método TOA se mide el tiempo requerido para que una señal viaje desde un transmisor a un receptor. En interiores, donde la señal inalámbrica se propaga a una velocidad constante, este retardo de propagación es linealmente proporcional a la distancia de transmisión. Por lo tanto, de la multiplicación del retraso temporal medido por la velocidad de la propagación de la señal en el medio se obtiene la distancia entre el transmisor y el receptor.

En un sistema de TOA puro, para obtener las coordenadas de un objeto se requieren al menos tres sensores (Figura 2.4). Cada sensor determina una circunferencia donde puede estar situado el objeto a localizar. La localización se determina encontrando la intersección de las tres circunferencias correspondientes a las tres medidas de los TOA (trilateración).

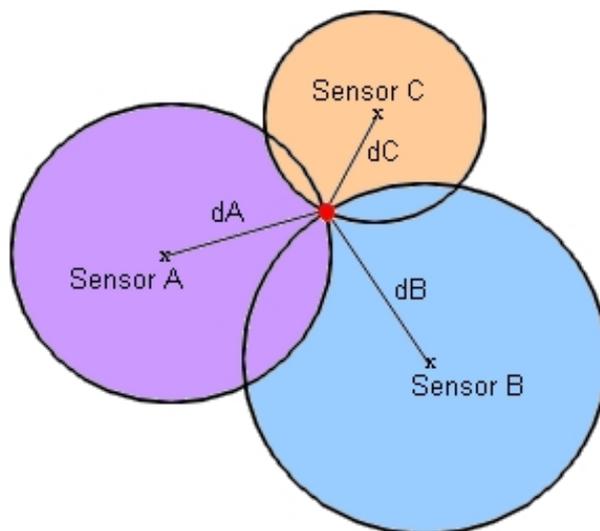


Figura 2.4: Tiempo de llegada (TOA). Cada sensor determina una circunferencia donde puede estar situado el objeto a localizar. La intersección de las tres circunferencias determina la localización.

Aunque la idea es simple, el método de localización TOA necesita una sincronización temporal entre todos los receptores y el objeto a localizar. Para garantizar la precisión de la localización en el rango de un metro, se necesita una precisión de nanosegundos en la sincronización, lo que supone un alto coste en términos de tiempo y esfuerzo en el desarrollo y ajuste del sistema.

Para superar las dificultades inherentes de las mediciones de TOA, en su lugar se puede medir el *time-of-flight* que consiste en medir el tiempo total de ida y vuelta de la señal transmitida y recibida en un dispositivo que intercambia información de localización con otro dispositivo del sistema. De esta manera, el requisito de tener una sincronización fina se podría evitar. Sin embargo, el tiempo de procesamiento de la generación de la señal de acuse de recibo debe ser altamente predecible, lo cual requiere un hardware muy estable en el receptor.

- Diferencia en tiempo de llegada (TDOA): Muchas de las soluciones de localización en interiores existentes se basan en un enfoque TDOA, que consiste en calcular la ubicación de un transmisor midiendo la diferencia de tiempo de llegada de una señal, transmitida desde ese transmisor a tres o más receptores. Mientras que el método TOA registra el tiempo en el que un transmisor envía una señal a los receptores, TDOA requiere que los receptores registren cuándo recibieron las señales. Los receptores se colocan en posiciones fijas conocidas.

Por ejemplo, en un sistema de localización basado en la identificación por radiofrecuencia (RFID, *Radiofrequency Identification*), una señal emitida desde un dispositivo RFID llegará en momentos ligeramente diferentes a dos receptores RFID (sensor A y sensor B) separados espacialmente (Figura 2.5). Teniendo en cuenta la ubicación de los dos receptores, podríamos encontrar una serie de ubicaciones del dispositivo que darían el mismo TDOA medido. El lugar de dichas posibles ubicaciones del dispositivo es una hipérbola H_{AB} . La introducción de un tercer receptor (sensor C) en una tercera ubicación proporcionaría otra hipérbola H_{BC} . En la intersección de las dos hipérbolas se encuentra el dispositivo. Dado que los receptores no necesitan saber el tiempo absoluto en el cual se transmitió el pulso -se necesita sólo la diferencia de tiempo-, la sincronización entre el dispositivo y los receptores se puede ignorar.

Se puede observar que la sincronización entre los receptores aún es necesaria con el fin de encontrar las diferencias de tiempo. Al igual que en el

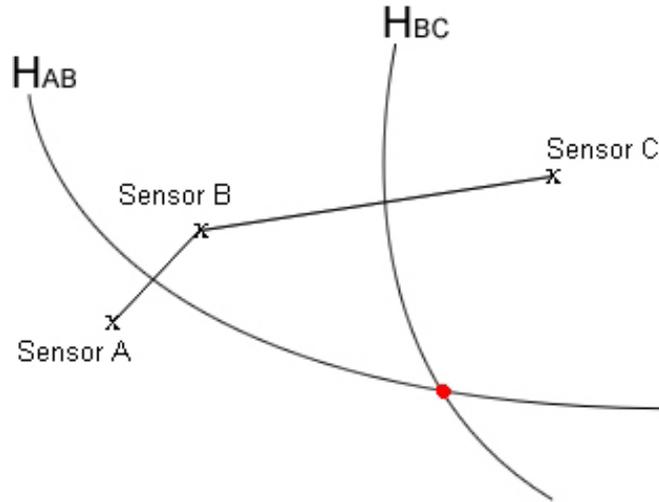


Figura 2.5: Diferencia en tiempo de llegada (TDOA). Las posibles ubicaciones del dispositivo con el mismo TDOA medido se encuentran en una hipérbola H_{AB} para los sensores A y B. La introducción de un tercer receptor (sensor C) en una tercera ubicación proporcionaría otra hipérbola H_{BC} . En la intersección de las dos hipérbolas se encuentra el dispositivo.

caso TOA, los errores de sincronización temporal causarían errores en la estimación de la posición. Sin embargo, la sincronización entre los receptores es más fácil que la sincronización de los receptores con el transmisor.

La precisión de la localización con el método TDOA se ve afectada principalmente por interferencias por múltiples trayectorias (*multipath*), obstáculos en el camino y ruido, que conducen a intersecciones inexactas de las hipérbolas.

- Ángulo de llegada (AOA): En la aproximación por ángulo de llegada, se utilizan técnicas de detección de la dirección, tales como antenas inteligentes, para detectar la dirección de una señal que llega al receptor. Los receptores (sensores A y B) están colocados en posiciones conocidas (Figura 2.6). Conocida la distancia entre los sensores (distancia d), la ubicación del transmisor se puede encontrar por la intersección de varios pares de líneas de dirección angular (α_A y α_B). Este enfoque requiere sólo dos receptores

para el posicionamiento. El transmisor y los receptores no necesitan estar sincronizados.

El inconveniente de este método es que su precisión está limitada por la directividad de la antena de medición, cuya exactitud es menor cuanto más se aleja el transmisor del receptor. Para realizar una medición fiable del ángulo, se necesita un complejo conjunto de agrupaciones de antenas por cada sensor. La precisión de la medición del ángulo se correlaciona enormemente con el número de elementos del conjunto de antenas. Por lo tanto, la medición exacta del ángulo se produce a costa de un mayor tamaño de la antena. Además, la medida del ángulo es bastante sensible al efecto de apantallamiento (*shadowing*) e interferencias por múltiples trayectorias, que son comunes en interiores.

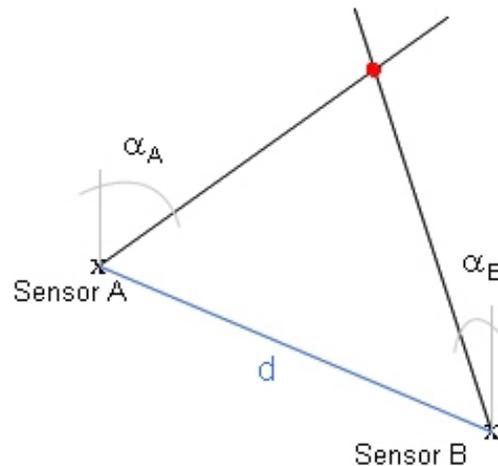


Figura 2.6: Ángulo de llegada (AOA). Los receptores (sensores A y B) están colocados en posiciones conocidas. Conocida la distancia entre los sensores (distancia d), la ubicación del transmisor se puede encontrar por la intersección de varios pares de líneas de dirección angular (α_A y α_B).

- Indicador de la intensidad de la señal recibida (RSSI): El método de localización RSSI (*Radio Signal Strength Indicator*) se basa en que, conocida la intensidad de señal original y el factor de atenuación del medio en que se propaga, se puede calcular la distancia recorrida midiendo la intensidad de

la señal recibida mediante el uso de la siguiente expresión

$$P = A * (dist)^{-n} \quad (2.1)$$

donde P es la intensidad de la señal recibida, A es la intensidad de la señal transmitida original, $dist$ es la distancia entre el transmisor y el receptor, y n es el coeficiente de atenuación en el medio de transmisión. Una ventaja práctica del método RSSI es la comodidad, ya que puede ser utilizado en muchos sistemas inalámbricos existentes sin modificación del hardware presente. El sistema de localización calcula la ubicación de un transmisor usando las distancias calculadas, resultado de la RSSI medida, entre el transmisor y unos pocos receptores. En tal caso, el algoritmo de estimación de la localización es el mismo que el método TOA, aunque el método de determinación de la distancia es diferente.

Sin embargo, en interiores, el efecto de apantallamiento y las interferencias por múltiples trayectorias hacen que un método basado sólo en mediciones de RSSI no sea muy fiable [17]. La sensibilidad a los cambios ambientales, tales como el movimiento de objetos en el interior del edificio, ya sea de personas o mobiliario, da lugar a cambios en la propagación de la señal, lo cual provoca cierta ambigüedad en la distancia estimada.

2.4. Tecnologías inalámbricas

En la última década el desarrollo de dispositivos de más reducido tamaño pero con prestaciones similares a las de un ordenador de sobremesa, como ordenadores portátiles, iPad, PDA y, sobre todo, teléfonos inteligentes, han provocado una demanda de servicios con unas condiciones de movilidad que no podían ser proporcionados mediante una conexión por cable. Ello ha propiciado el auge de las diversas tecnologías inalámbricas.

En la Figura 2.7 se puede observar una comparativa de las principales tecnologías inalámbricas en cuanto alcance y la tasa de transmisión de datos.

A continuación se exponen las tecnologías inalámbricas más populares utilizadas en la investigación de localización en interiores que incluyen la identificación por radiofrecuencia (RFID), la banda ultra ancha (UWB), la

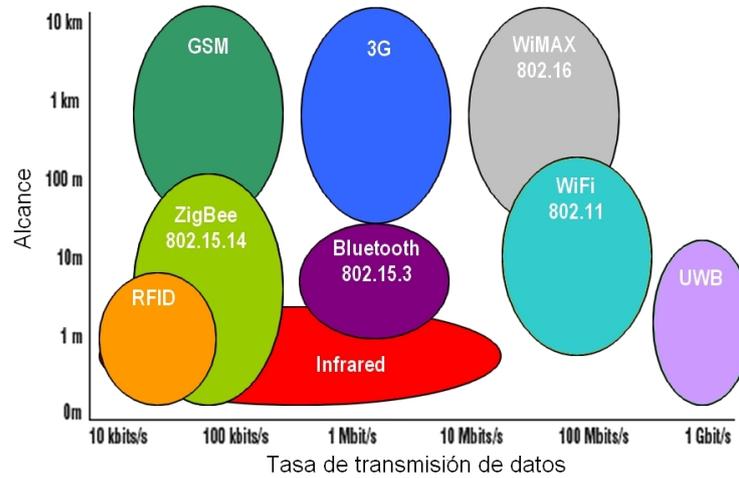


Figura 2.7: Comparativa de las tecnologías inalámbricas más utilizadas en función del alcance y la tasa de transmisión de datos.

comunicación móvil+ (GSM), la red de área local inalámbrica (WLAN) y los dispositivos ZigBee.

2.4.1. RFID

La identificación por radiofrecuencia usa la tecnología de comunicación por RF entre dos dispositivos, el lector y las etiquetas (*tags*), para realizar aplicaciones de identificación y seguimiento [33]. Los sistemas RFID se pueden clasificar en dos tipos, pasivos y activos, de acuerdo con el tipo de etiquetas utilizado. Las bandas de frecuencias típicas para los sistemas RFID son: frecuencia baja LF (9-125 kHz), frecuencia alta HF (13.56 MHz), frecuencia ultra alta UHF (433 MHz, 860-960 MHz) y la frecuencia de microondas (2.45 GHz-5.8 GHz).

Las etiquetas RFID pasivas funcionan mediante el campo magnético generado por los lectores de RFID. Se llama pasiva, porque puede funcionar sin una fuente de alimentación incorporada. Una etiqueta de RFID pasiva contiene dos partes principales, una antena para recibir y transmitir señales de RF, y un circuito integrado que almacena y procesa los datos.

La identificación y la información de los datos pertinentes se envían a un lector cuando una solicitud es recibida por la etiqueta. El lector, que por lo general está vinculado a una base de datos, es capaz de identificar el objeto unido a la etiqueta correspondiente.

Las etiquetas RFID pasivas son ampliamente utilizadas en muchos aspectos de la vida diaria, como por ejemplo, controles de entrada a edificios, pago de transportes, seguimiento de productos y sistemas de inventario (Figura 2.8 sacada de [34]).

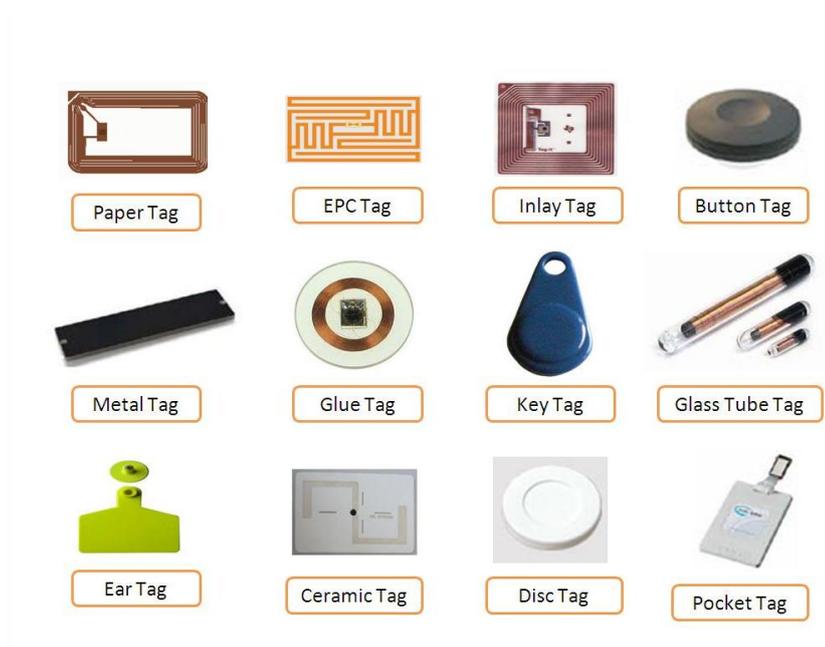


Figura 2.8: Diversos tipos de etiquetas de RFID.

Una etiqueta RFID activa, por otro lado, es un transceptor de RF que tiene su propia fuente de alimentación, generalmente una batería incorporada, y que puede transmitir la identificación y otros datos adicionales, cuando sea necesario o tras una solicitud externa. Aunque el diseño de su antena es de pequeño tamaño, la señal que radia puede alcanzar una distancia de hasta decenas de metros. Dado que una etiqueta RFID activa contiene circuitos de RF más sofisticados, es posible implementar más funciones y almacenar más datos en las etiquetas activas que en las etiquetas pasivas. Por lo tanto, las etiquetas RFID activas se emplean normalmente en aplicaciones más avanzadas, por ejemplo, gestión de fabricación, gestión de activos valiosos e identificación de animales.

Dado que los sistemas de RFID se pueden aplicar en una amplia variedad de escenarios, la tendencia actual es la de incorporar sensores para proporcionar más información aparte de la identificación. De ese modo, los usuarios de los sistemas de RFID pueden obtener una mayor cantidad de información actualizada de los objetos etiquetados. Por ejemplo, los parámetros del entorno, como la temperatura, la presión, y la humedad son de interés en aplicaciones particulares. Además, la ubicación de una etiqueta RFID es una información valiosa para el usuario del sistema.

Los sistemas de localización basados en RFID pasivos se basan generalmente en la detección de proximidad simple y la localización estimada de la etiqueta está asociada con la ubicación del lector correspondiente. Dado que las etiquetas RFID pasivas no tienen ninguna fuente de energía incorporada, el alcance de sus rangos de comunicación se limita por lo general a unos 2 metros. La amplia cobertura del sistema de localización RFID pasiva requiere una alta densidad de lectores, lo cual es costoso y, a veces ineficiente. Por otra parte, el sistema de localización RFID pasiva es capaz de proporcionar seguimiento de puntos de control, en cuyo caso se informará de la ubicación de una etiqueta cada vez que se detecta que pasa por un punto de control cubierto por un lector de RFID. En este caso, la cobertura total sobre el ambiente interior es innecesaria y por lo tanto el sistema de localización sólo tiene que vigilar algunos lugares de interés.

Algunos sistemas de localización basados en RFID activos usan el método RSSI para lograr un mejor rendimiento en la ubicación, por ejemplo, el sistema Landmarc [13]. Landmarc (*LocAtioN iDentification based on dynamic Active Rfid Calibration*) es un enfoque de la localización de las etiquetas RFID activas con los lectores RFID comerciales. El sistema está basado en la técnica de k -vecinos (sección 2.5.1). Una serie de etiquetas de referencia adicionales se colocan en posiciones conocidas, como puntos de medida en el sistema de localización. Los patrones RSSI de las señales de las etiquetas de referencia se usan para encontrar la ubicación relativa de las etiquetas de los usuarios. Estas etiquetas de referencia fijas adicionales ayudan al sistema a lograr una mejor precisión de la localización. Es obvio que la precisión de un sistema de este tipo depende del número de etiquetas de referencia, una mayor densidad de las etiquetas de referencia induce una mejor precisión de la localización.

En [35] se comparan las dos frecuencias usadas en el protocolo DASH como método de localización utilizando un modelo de propagación multipared. El DASH7 es un protocolo WSN (*Wireless Sensor and Actuator Network*)

dirigido al rango medio y comunicaciones de baja potencia en la banda por debajo del Ghz promovido por la DASH7 Alliance [36]. Tiene sus raíces en el estándar ISO 18000-7. DASH7 trabaja en las frecuencias de 433 Mhz y 915 Mhz que son las bandas industrial, científica y médica, así como en la frecuencia de 868 Mhz. Sobre un escenario de 66.7 m x 17.6 m se dispone un objeto móvil que, como promedio, envía 304 paquetes desde los 25 puntos de referencia separados 0.3 metros a los seis lectores de RFID dispuestos a los largo del escenario. Cada uno de estos lectores de RFID está conectado a una Raspberry Pi que envía la información a un servidor central.

Para tener en cuenta la pérdida de señal debida a paredes y techos se genera un modelo según una versión modificada del modelo ITU [37]. Obteniendo de modo experimental los parámetros de atenuación para cada una de las dos frecuencias elegidas en dicho escenario y utilizando el modelo de ruido gaussiano y la fórmula de Bayes, se estima la posición del objeto móvil. Los resultados proporcionan un error promedio de 8.27 m para la frecuencia de 433 Mhz y un error promedio de 1.27 m para la frecuencia de 868 Mhz.

La tecnología RFID ha sido ampliamente aceptada en muchas situaciones y la capacidad de localización basada en RFID abre un nuevo campo de aplicaciones de esta tecnología. Sin embargo, la adición de la funcionalidad de localización a un sistema RFID estándar, cuyo protocolo de RF no fue diseñado para el propósito de la ubicación, puede resultar una forma ineficiente para la construcción de un sistema de localización en interiores. Por lo tanto, en el siguiente apartado se muestra una tecnología que se propone de forma específica para proporcionar una mejor ubicación y capacidad de identificación, como es, la banda ultra ancha.

2.4.2. Banda ultra ancha

La banda ultra ancha (UWB, *Ultra Wide Band*) es una tecnología de radio que transmite pulsos muy cortos (inferiores a 1 nanosegundo) con un ciclo de trabajo reducido y un bajo nivel de energía. Utiliza un ancho de banda superior a 500 MHz. Tras la autorización por parte de la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos del uso sin licencia de la UWB en el rango de 3.1 a 10.6 GHz [38], se produjo un auge en la investigación de esta tecnología, y en particular, en su aplicación en sistemas de localización en interiores.

UWB ha demostrado ser una buena técnica para la localización en interiores capaz de proporcionar una excelente precisión en la ubicación [39]. La detección de los pulsos de llegada en una señal UWB requiere el uso de un filtro adaptado o también se puede llevar a cabo mediante la correlación de la señal recibida en el receptor. Los sistemas inalámbricos convencionales sufren distorsión debido a la interferencia producida por múltiples trayectorias que limita la precisión de la ubicación. Con la tecnología UWB, la corta duración y el ancho de banda característico del impulso transmitido hace que sea posible proporcionar TOA precisos, mientras que los componentes por trayectorias múltiples que llegan se pueden excluir debido a la resolución temporal fina inherentemente de la señal de UWB. Los sistemas UWB son capaces de detectar pulsos de energía más baja, en comparación con las señales de RF convencionales. Mientras que las señales de RF convencionales operan en una sola banda, el sistema de UWB puede transmitir señales a través de múltiples bandas.

Aunque la combinación de estos retardos de tiempo y el uso de relojes de alta frecuencia en los dispositivos de hardware permiten una aplicación de alta precisión, incluso para distancias en el intervalo de unos pocos centímetros, la adquisición de los retardos temporales requiere una estrecha sincronización de tiempo entre el emisor y el receptor de la señal UWB. En el caso de las técnicas basadas en TOA, este requisito se puede evitar implementando el algoritmo de rango bidireccional (TWR, *Two Way Ranging*) [40], que se basa en una secuencia de dos o más intercambios de paquetes entre los dos dispositivos e implica la transmisión de paquetes en ambas direcciones. No obstante, los retardos temporales obtenidos de esta manera todavía se ven afectados por algunas fuentes de error, tales como: las diferentes desviaciones del reloj y la calibración de los retardos del hardware interno (diferentes retardos de la antena de envío y recepción) [41]. Además, el empleo de este método complica la implementación del objeto móvil para ser localizado porque tiene que realizar el intercambio de paquetes TWR con todas las balizas del sistema.

Por otro lado, los enfoques TDOA realizan la localización utilizando sólo la diferencia del tiempo de llegada de la señal UWB a las balizas del sistema [42]. Este método simplifica el papel del objeto móvil, ya que sólo tiene que transmitir, pero aún requiere una sincronización de tiempo ajustada de todos los relojes de las balizas. Hay algunos trabajos anteriores que mantienen la sincronización de las balizas a expensas de transmitir paquetes de sincronización periódicos [42–46] o emitir paquetes desde las balizas de acuerdo a una secuencia predefinida [47]. Sin embargo, estos métodos aumentan enormemente el consumo de energía y mantienen el canal ocupado de manera

regular, lo que reduce la capacidad general del sistema.

El trabajo en la referencia [48] propone un algoritmo de localización basado en TDOA que no requiere sincronización de tiempo de los relojes de las balizas. Sin embargo, este sistema fue concebido para funcionar con señales acústicas, donde se emplean relojes de baja frecuencia relativa. Además, no tiene en cuenta las desviaciones de los relojes, lo que es de capital importancia en los algoritmos de localización de UWB debido a los relojes de alta frecuencia utilizados.

UbiSense [49] es una empresa que proporciona un sistema de posicionamiento basado en la tecnología UWB. Utiliza la localización por triangulación usando tanto la diferencia de tiempo de llegada (TDOA) como el ángulo de llegada (AOA). El uso de estas dos técnicas y la poca influencia de paredes y otros elementos, contribuye a ofrecer una precisión de unos 15 cm, con un retraso corto en la estimación de la posición.

El sistema UbiSense consta de tres partes: receptores, etiquetas de seguimiento, y una plataforma de software. Las etiquetas activas emiten pulsos de UWB que son recibidos por los receptores que envían la información de la localización de las etiquetas a la plataforma de software. La plataforma de software no sólo incluye la localización de las etiquetas sino una monitorización en tiempo real de las mismas en el área de cobertura.

El sistema UbiSense se organiza por celdas. En cada celda existen al menos cuatro receptores que cubren un área de hasta 400 m^2 . Las etiquetas son inalámbricas, ligeras y con una batería de una duración de 1 año. El mayor inconveniente es el alto coste del sistema.

2.4.3. Redes de comunicaciones móviles

La información de la ubicación obtenida mediante GSM (*Global System for Mobile Communications*) u otras redes de comunicaciones móviles ha estado disponible para los usuarios de móviles desde hace años. La información de la ubicación proporcionada por los operadores de telefonía móvil se obtiene utilizando la técnica ID de célula (*Cell-ID*), que es similar al método de detección por proximidad donde la ubicación del usuario móvil se asocia con la ubicación de la estación base a la que está conectado. Este tipo de servicio de ubicación está disponible para los usuarios móviles en exteriores

e interiores, pero la precisión de localización es, en general, baja, en el rango de 50-200 metros. Esta precisión se puede mejorar si el edificio está cubierto por varias estaciones base.

En [50] utilizan la red de Telecomunicaciones Inalámbricas Mejoradas Digitalmente (DECT, *Digital Enhanced Cordless Telecommunications*) para resolver el problema de posicionamiento en interiores. Utilizaron el algoritmo *Gaussian Process* (GP) para calcular la ubicación del teléfono basándose en el RSSI de los teléfonos de la red DECT. Su sistema de posicionamiento de proceso gaussiano (GPPS, *Gaussian Process Positioning System*) puede proporcionar una precisión entorno a los 7.5 metros. También utilizaron el algoritmo de k -vecinos para comparar con el método GP, y mostraron que este método puede alcanzar una precisión de 7 metros para la red celular DECT.

En [51] se trata de localizar a un individuo mediante el teléfono móvil en una planta con varias habitaciones. Con técnicas RSSI *fingerprinting* se toman un gran número de puntos de medida, unos utilizados para ajustar el método y el resto para puntos de prueba. En cada punto se toman aproximadamente 500 canales. Se trata de un posicionamiento de grano grueso, ya que el objetivo es localizar al individuo en una habitación.

En [52] se presenta otra posible técnica para la localización con redes móviles mediante el uso de señales moduladas del tipo DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), que es una modulación popular debido a su inmunidad frente a interferencias y es la técnica empleada por los sistemas CDMA (*Code Division Multiple Access*). Con esta modulación, el receptor determina la TDOA por la correlación entre una secuencia conocida, pseudo-ruido (PN), y la señal de radio recibida. La distancia entre el usuario móvil y la estación base se determina a partir del primer pico de correlación. Sin embargo, debido a la escasez de ancho de banda disponible [53], la técnica DSSS con sistemas CDMA, no es capaz de proporcionar una precisión adecuada y los errores medios están dentro de un rango de valores de hasta 20 metros.

2.4.4. Red inalámbrica de área local

Una red de área local inalámbrica (WLAN) es un sistema sin cables de comunicación de datos flexible que puede reemplazar o extender una LAN cableada para proporcionar funcionalidad adicional. Mediante la tecnología

de radiofrecuencia, o las WLAN infrarrojas (IR), transmiten y reciben datos a través de paredes, techos e incluso estructuras de cemento, sin cableado. Una WLAN ofrece todas las características y beneficios de las tecnologías LAN tradicionales como Ethernet y Token Ring, pero sin las limitaciones de estar conectado por un cable. Esto proporciona una mayor libertad y flexibilidad. Las redes de área local inalámbrica se han utilizado cada vez más en los últimos años, en particular desde 1997, cuando se emitió el primer estándar WLAN IEEE 802.11, seguido por su competidor europeo *High Performance LAN* (Hiper LAN). En ciertos lugares, el uso de WLAN podría ahorrar millones en costes y tiempo de implementación en comparación con las redes cableadas permanentes. En otros lugares, los servicios WLAN son complementarios a las LANs cableadas existentes, lo que agrega la ventaja de la movilidad del usuario. Actualmente existe un gran número de estándares de LAN inalámbrica de diferentes órganos de normalización. El principal problema es que no existe un estándar único como Ethernet con una compatibilidad garantizada entre todos los estándares y dispositivos.

El modo de infraestructura y el modo *ad hoc* son las dos topologías más comunes que son compatibles con LAN inalámbricas. El modo de infraestructura es algunas veces llamado *Basic Service Set* (BSS), y se basa en un punto de acceso (AP, *Access Point*) que actúa como controlador en cada célula o canal de radio. Si la estación A desea comunicarse con la estación B, pasa por el AP. Este modo de funcionamiento se utiliza principalmente en aplicaciones empresariales y domésticas, tanto en espacios cerrados como al aire libre. El punto de acceso realiza varias tareas, como la conexión a una red cableada o la función de puenteo para conectar varias celdas o canales WLAN. Los modos *ad hoc* se conocen como modo *peer to peer* en la literatura. En este modo, los nodos móviles pueden formar redes entre sí sin la ayuda de ninguna infraestructura fija o inalámbrica como el AP. Se utiliza principalmente para construir rápida y fácilmente una red donde no hay infraestructura disponible. Un buen ejemplo del uso de este modo podría ser en el campo militar o en un centro de convenciones para compartir archivos o compartir información entre los usuarios. Otro modo al que se hace referencia en el estándar IEEE 802.11 es el *Extended Service Support* (ESS), donde múltiples BSS se unen para usar el mismo canal y aumentar el rendimiento total. Básicamente este modo es un conjunto de BSS trabajando juntos.

El creciente número de puntos de acceso WLAN en las principales ciudades facilita el diseño de sistemas de localización en interiores basados en la infraestructura WLAN existente y permite reducir el coste de los servicios de localización. La precisión de los sistemas de posicionamiento WLAN típica

es de unos pocos metros aproximadamente, con un rango de actualización de pocos segundos. La ventaja principal de este sistema es su compatibilidad con la WLAN existente.

Desde la aparición del sistema RADAR [18] han surgido numerosos sistemas que utilizan la tecnología WLAN para la implementación de sistemas de localización. Estos sistemas se basan en la potencia de la señal y utilizan métodos probabilísticos, redes neuronales, redes bayesianas y otros métodos para mejorar la precisión en la localización.

En el sistema Horus [54] se utilizan distribuciones probabilísticas de la potencia de la señal para mejorar la precisión y reducir el ruido de los canales inalámbricos. Asimismo, se utilizan técnicas de *clustering* en el mapa de localización para reducir el coste computacional. En una planta de un edificio de 68 m x 26 m se establece una rejilla con celdas de 1.5 m y se toman 300 muestras en 110 puntos de prueba mediante 4 APs, obteniéndose un error inferior a 2 metros en el 90 % de los casos.

Una variante del sistema anterior [55] analiza uno de los aspectos de las características temporales del canal inalámbrico: la correlación de muestras desde un mismo AP. Demuestran que muestras consecutivas pueden tener una correlación de 0.9. Tratan estas series de muestras como series temporales y utilizan técnicas de análisis de series temporales para estudiar sus características. Basado en un modelo autoregresivo presentan una técnica que utiliza múltiples muestras de cada AP para mejorar la precisión de la localización. Los resultados muestran que la precisión de la distancia media mejora 0.73 metros (50 %) usando la técnica modificada.

En [56] se toman 400 muestras de la potencia de la señal de 3 APs en 56 puntos de prueba sobre una planta de un edificio de 25.5 m x 24.5 m que incluyen más de once espacios entre aulas y despachos. Se utilizan redes neuronales para estimar la localización obteniendo un error medio de 1.5 metros.

El sistema Ekahau [57] combina redes bayesianas, complejidad estocástica y aprendizaje competitivo *online*, que aporta información sobre la localización mediante un servidor central. Se obtiene una precisión de 1 a 3 metros.

Los sistemas basados en seguimiento de robots [58] también utilizan la infraestructura IEEE 802.11 y técnicas de *tracking* para refinar la localización. En un edificio con un pasillo de forma rectangular de 32.5 m x 17 m,

se toman medidas en puntos separados 1.5 m en dos direcciones. Para cada una de las 14 balizas distribuidas en el edificio se toman dos histogramas en cada punto. El primero es la distribución del número de veces que cada baliza aparece en la medida y el segundo es una distribución del RSSI y se utiliza para la localización la posición de máxima probabilidad calculada aplicando directamente la regla de Bayes. Con ello se obtiene que un 77 % de los puntos estén por debajo de un error de 1.5 metros. Para refinar la precisión se modeliza el movimiento del operador intentando seguir su posición mediante un modelo oculto de Markov. Con ello se consigue que un 64 % de los puntos estén por debajo de un error de 1 metro.

En [59] se utilizan las medidas RSSI para buscar ubicaciones candidatas en el espacio con respecto a la señal de cada baliza por separado. Se forman polígonos de M -vértices eligiendo al menos un candidato de cada baliza (suponiendo un total de M balizas). La media de las coordenadas de los vértices del polígono más pequeño (que tiene el perímetro más corto) da la estimación de la localización. Con diferentes algoritmos obtiene un 50 % de los puntos por debajo de un error de 4 metros.

En [60] se presenta un sistema de localización llamado “LOCALI” donde no se requiere una base de datos de calibración ni actualizaciones posteriores. Para ello reduce el escenario elegido a un mapa de píxeles donde se tiene en cuenta las diferentes estructuras de los obstáculos para generar modelos con línea de visión directa y sin ella para cada AP y estimar la localización aplicando técnicas de solapamiento de los mapas de RSSI para cada AP. Se crea una imagen de la planta del escenario con una resolución de 10 pixel/m, donde a las paredes de cemento se les asigna el color RGB blanco y a las paredes de madera el color RGB gris, sobre fondo negro. El color indicará el factor de atenuación de la pared en cuestión. Posteriormente, se divide el escenario en celdas cuadradas de 10 pixel/m y se crea el mapa RSSI para cada AP en cada celda. La matriz generada tiene en cuenta el número de paredes que tiene que atravesar la señal.

Para estimar la posición se propone un procedimiento en cuatro etapas que comprende una primera selección de las tres APs con un nivel RSSI más fuerte. Después se binariza el mapa RSSI en función de un umbral establecido para cada AP, dando el valor 1 si la celda tiene un valor inferior a 3 dB de diferencia con el valor RSSI recibido y un valor 0 en caso contrario. Con los tres mapas binarizados (uno por AP) se realiza una operación de intersección y se obtiene la región en común. Finalmente, el centroide del área común proporciona la posición estimada del objetivo. Se utilizaron dos esce-

narios diferentes en la Universidad de Yeungman, una zona de pasillo y un área abierta. En el primer escenario se seleccionaron 12 Aps y 54 puntos de referencia separados 1 metro entre ellos a lo largo del pasillo. Para el segundo escenario se utilizaron 7 Aps y 98 puntos de referencia dispuestos en forma rectangular alrededor de la zona abierta. Los resultados arrojan alrededor de un 50 % de precisión por debajo de los 2 metros.

En [61] se presenta un algoritmo basado en la interpolación triangular y la extrapolación con el fin de evitar la fase de calibración inherente a los sistemas que usan la técnica *fingerprinting*. Sobre la planta de un edificio de 39.83 m x 25.60 m y una rejilla de celdas cuadradas de 1.42 m se colocan 4 APs y se toman al menos 40 muestras de RSSI en las cuatro direcciones (mirando al norte, sur, este y oeste) en los 207 puntos de referencia. Compara sus resultados (5.4 metros) con los obtenidos utilizando los algoritmos clásicos (4.7 metros).

2.4.5. ZigBee

ZigBee es el nombre dado a una serie de protocolos de comunicación inalámbrica para transmisión de información de bajo consumo. Está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*). ZigBee utiliza la banda para usos industriales y científicos (ISM, *Industrial Scientific and Medical*) que comprende las frecuencias de 868 MHz en Europa, 915 MHz en Estados Unidos y 2.4 GHz en todo el mundo. Aunque los fabricantes diseñan sus componentes para la banda de 2.4 GHz, ya que es libre en todo el orbe. La ventaja de esta tecnología se basa en la sencillez de la electrónica, su bajo consumo y la topología de red en malla, frente a otras redes inalámbricas semejantes de la familia WPAN, como por ejemplo el Bluetooth (Tabla 2.1).

Esta tecnología es la más común en la implementación de redes de sensores inalámbricos. Este tipo de redes se han aplicado a múltiples entornos, incluyendo medicina, agricultura, medio ambiente, militar, monitorización de inventario, detección de intrusión, seguimiento de movimiento, mal funcionamiento de maquinaria, juguetes, automatización del hogar o de la oficina (control de temperatura, luces, ventanas, puertas, alarmas, etc.), en el campo de la educación [62], y muchos otros. En el campo médico, las redes de sensores se pueden utilizar para monitorizar de forma remota y discreta los parámetros fisiológicos de los pacientes, como el latido del corazón o la pre-

Categoría	ZigBee	Bluetooth	WIFI
Alcance	50-1600m	10m	50m
Extensión	Automática	Ninguna	Depende de la red existente
Batería	Años	Días	Horas
Complejidad	Simple	Complicada	Muy complicada
Velocidad de transmisión	250Kbps	1Mbps	1-54Mbps
Rango de frecuencias	868MHz, 916MHz, 2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz
Nodos de red	65535	8	50
Linking time	30ms	Superior a los 10s	Superior a los 3s
Coste por unidad	Bajo	Bajo	Alto
Coste de uso	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Seguridad	128bit AES	64bit, 128bit	SSID
Nivel de integración y reliability	Alto	Alto	Normal
Coste inicial	Bajo	Bajo	Normal
Dificultad de uso	Fácil	Normal	Difícil

Tabla 2.1: Análisis comparativo de las tecnologías ZigBee, Bluetooth y WIFI.

sión arterial, e informar al hospital cuando alguno de estos parámetros sufre alguna alteración [63–66]. En agricultura, se pueden utilizar para monitorizar las condiciones climáticas de grandes superficies cultivadas y calcular diferentes necesidades de agua o productos químicos. Los sistemas de detección de contaminación también se pueden beneficiar de las redes de sensores. Los sensores pueden controlar los niveles actuales de sustancias contaminantes en una ciudad o en un río e identificar la fuente de posibles situaciones anómalas. Se pueden emplear sistemas de detección similares para monitorizar los niveles de lluvia y de agua y prevenir inundaciones u otros desastres [67]. Otra posible aplicación es el seguimiento de las especies animales y la recopilación de datos sobre sus hábitos, población o posición [68–70]. Los sensores pueden proporcionar informes de los datos ambientales durante largos periodos de tiempo. Ésta es una mejora muy importante con respecto a las condiciones de funcionamiento anteriores en las que los seres humanos tenían que operar

a pie de campo y tomar periódicamente medidas manuales, lo que conlleva menos datos, mayores errores, mayores costos y una interferencia con las condiciones de vida de las especies observadas. En las aplicaciones de vigilancia, las redes de sensores se despliegan en estructuras tales como puentes, edificios, aeronaves, cohetes u otros equipos militares que requieran una vigilancia continua para garantizar la responsabilidad y la seguridad [71]. Las redes de sensores pueden usarse para detectar y localizar daños, así como para predecir la vida útil de los materiales de manera más efectiva y económica con respecto a los sistemas de monitorización tradicionales. Los militares también pueden aprovechar la tecnología de redes de sensores. Pueden desplegar tales redes detrás de líneas enemigas y observar movimientos o presencia de tropas y recopilar información geográfica sobre el área de despliegue.

Esta tecnología también se utiliza para la localización en interiores. Para ello se utiliza una red formada por varios sensores ZigBee que implementa el estándar IEEE 802.15.4 actuando como balizas, y uno más, que actúa como transmisor que es el sensor que se quiere localizar [20]. Para determinar dicha ubicación se utilizan las mediciones de RSSI que recibe el transmisor desde las balizas.

En [72] se trata de localizar un contenedor en un entorno muy controlado. Los dispositivos ZigBee se colocan en los laterales del contenedor en dos niveles. Se utiliza la técnica *fingerprinting* para tomar medidas RSSI cada 0.6 metros. Se introduce el concepto de “spatial reasoning”, un filtrado espacial de la señal para ajustar la posición que mejora el filtrado temporal normalmente usado. Se toman datos RSSI para posiciones cercanas a la que se quiere medir y se hace un filtrado pasa baja. La distribución de las balizas permite un posicionamiento en tres dimensiones. Se obtiene un 61.1 % de acierto de los 18 puntos de prueba tomados, con errores que van de 0.6 a 2.14 metros en el resto de puntos.

2.4.6. Otras tecnologías

Aparte de las principales tecnologías antes expuestas, existen otros sistemas que hacen uso de otros medios inalámbricos.

Tanto el sistema WhereNet [73] como el sistema PinPoint [74] operan en la banda de frecuencia ultra alta (UHF, *Ultra High Frequency*) entre 868 MHz y 2.4 GHz. Aunque WhereNet utiliza los 2.4 GHz como las WLAN,

implementa el protocolo ANSI 371.1 optimizado para localización de señales de baja potencia, obteniendo una precisión de entre 2 y 3 metros. PinPoint dispone de un conjunto de antenas que emiten y reciben señales de 40 MHz de una etiqueta colocada en el objeto móvil a localizar. La precisión obtenida es de 1 metro.

También merece la pena mencionar los sistemas comerciales de posicionamiento en interiores que utilizan técnicas de red de malla, como el sistema de posicionamiento MeshNetwork [75]. La tecnología MPS aprovecha los métodos patentados de localización y determinación de posición integrados en la tecnología de radio de división de acceso múltiple por cuadratura (QDMA, *Quadrature Division Multiple Access*) de MeshNetwork, que utiliza DSSS y opera en las bandas ISM de 2.4 GHz. Se obtiene una precisión del 50 % dentro de los diez metros.

La radiación infrarroja inalámbrica (IR) es el uso de la tecnología inalámbrica en los dispositivos o sistemas que transmiten los datos mediante radiación infrarroja. La IR se utiliza en la red de área personal inalámbrica (WPAN), ya que tiene un haz de ángulo de transmisión estrecho de corto alcance adecuado para apuntar y recibir señales de manera selectiva. Las principales características de este sistema consisten en el confinamiento de la señal dentro de la habitación (la señal IR no atraviesa las paredes) y la ausencia de interferencia electromagnética.

El sistema de posicionamiento local EIRIS [76] utiliza una tecnología triple IRFID que combina señales IR, RF (UHF) y LF (transpondedor RF de baja frecuencia). Combina las ventajas de cada tecnología, es decir, la ubicación de la habitación de IR, la amplia gama de RF y la sensibilidad del LF a la medida. Sin embargo, en comparación con los sistemas de RF es más costoso para una precisión inferior al metro.

2.5. La técnica de *fingerprinting*

2.5.1. Introducción

La mayoría de los enfoques de localización en interiores adoptan la coincidencia de “huellas digitales” como el esquema básico para la determinación de localización. La idea principal de este esquema se basa en recopilar las características del escenario (*fingerprint*) en puntos determinados de cada una de las áreas de interés y luego construir una base de datos de “huellas digitales” tomando medidas de la señal. La localización de un objeto se determina entonces haciendo coincidir a partir de la proximidad la medición en vivo con las medidas almacenadas en la base de datos [15].

Este método no requiere hardware especializado ni en el dispositivo móvil ni en los dispositivos fijos, ni es necesario sincronizar el tiempo entre los dispositivos. Puede ser implementado totalmente en software lo cual puede reducir la complejidad y el costo significativamente en comparación con la angulación o los sistemas puramente basados en la trilateración temporal [77].

Esta técnica de localización llamada *fingerprinting* consta de dos fases [10]. La primera fase es la llamada fase de calibración o fase de entrenamiento, y la segunda fase es la fase de localización. En la fase de calibración, se construyen los mapas *fingerprint*. Los mapas más precisos tienen en cuenta al mismo tiempo las mediciones empíricas y los modelos de propagación de la señal para posteriormente poder determinar la ubicación del objetivo. En esta primera fase, se debe registrar la creación de un mapa de radio para la inspección del sitio donde se supone que el posicionamiento funciona. Básicamente, el mapa de radio es una base de datos de valores en puntos predefinidos conocidos (coordenadas). Paso a paso, para cada “huella digital”, se obtiene una medición que incluye la información sobre todas las estaciones y su intensidad de señal recibida. Cuando el sistema de localización está en funcionamiento, la llamada fase de localización, la estación móvil mide las propiedades de la señal en un lugar desconocido. A continuación, se comparan los valores actuales de intensidad de la señal medida con los valores de la base de datos.

El principal inconveniente del enfoque de *fingerprinting* es el laborioso proceso de calibración. El principal reto para las técnicas de localización basadas en *fingerprinting* es la sensibilidad a los cambios ambientales, tales

como el movimiento de objetos en el interior del edificio, ya sea de personas o mobiliario, lo que da lugar a cambios en la propagación de la señal, difracción y reflexión. Para mantener la precisión del posicionamiento, el proceso de calibración debe repetirse periódicamente para hacer un recálculo del mapa de intensidades de señal predefinido.

La principal ventaja del método *fingerprinting* es su aplicabilidad a las infraestructuras inalámbricas existentes, ya que muchos de los sistemas inalámbricos ya cuentan con la funcionalidad para medir RSSI. Por lo tanto, este método ha sido ampliamente adoptado por los sistemas de localización en espacios cerrados basados en tecnologías WLAN [16] [12], GSM [13], Bluetooth [78] y RFID [18] [19].

Sin embargo, en la mayoría de los casos hasta ahora, la precisión global de los sistemas de localización basados en RSSI no es tan buena como la de los sistemas basados en TOA o TDOA. Esto se debe principalmente a la complejidad del ambiente interior y a que es difícil encontrar un buen modelo que sea aplicable a una amplia variedad de entornos. Además, la intensidad de la señal recibida puede ser fácilmente alterada si alguien tiene la intención de atenuar o amplificar la potencia transmitida, lo que hace que sea una mala opción para aplicaciones de seguridad.

Por ello, la técnica de *fingerprinting* suele ir complementada de algún tipo de algoritmo que mejore la precisión de la localización. Los algoritmos más usados están basados en el algoritmo del vecino más próximo (NNSS, *Nearest Neighbor in Signal Space*) [53] [79] [80] por su sencillez y fiabilidad. En este algoritmo se define el vector distancia d_l que contiene las distancias vectoriales respectivas a todos los puntos de medida ($d_{p=1}, d_{p=2}, \dots$). Después se determina el mínimo ($\min(d_l)$) y se asignan las coordenadas del punto a localizar (p).

$$d_l = \begin{pmatrix} d_{p=1} \\ d_{p=2} \\ \cdot \\ \cdot \\ d_{p=K} \end{pmatrix} \rightarrow \min(d_l) \rightarrow p$$

Otra variante de dicho algoritmo es el llamado k -vecinos (KNNSS, *k-Nearest Neighbour in Signal Space*). En este método se realiza una ponde-

ración de los vecinos más próximos. De este modo, los pesos se dividen de manera uniforme alrededor de los k puntos de medida que se utilizarán y luego las coordenadas de los puntos se multiplican por el respectivo factor de ponderación w_r y se dividen por la suma de todos los pesos w .

$$w_r = \frac{1}{k}, k \geq 2 \quad (2.2)$$

con

$$c_l = \sum_{p=1}^k \frac{w_r}{\sum_{p=1}^k w_r} \cdot c_p \quad (2.3)$$

donde c_l es la coordenada del punto a localizar y c_p la coordenada del punto de medida.

2.5.2. Algoritmos de *fingerprinting*

En el año 2000 un grupo de investigadores de Microsoft propuso un sistema de localización y seguimiento de usuarios dentro de un edificio basado en las señales de RF producidas por las redes inalámbricas, llamado RADAR [18] que introducía la técnica *fingerprinting*.

El sistema RADAR graba y procesa los valores de RSSI enviados por el objeto móvil a localizar en cuatro orientaciones de 90° a tres balizas desplegadas de manera que cubren toda el área de interés. Inicialmente, los relojes del objeto móvil y las balizas se sincronizan mediante paquetes UDP *broadcast*. Después, el objeto móvil envía paquetes UDP y las balizas, que recogen la información RSSI, la almacenan junto con la marca temporal, la orientación y el identificador de la baliza. En el cálculo de la posición se emplean métodos empíricos que evalúan la distancia euclídea entre la medición actual del RSSI y cada una de las mediciones almacenadas en la base de datos durante la fase de calibración. Para mejorar la precisión también se emplean métodos analíticos realizando una estimación del RSSI recibido dependiendo de la distancia entre el objeto móvil y cada una de las balizas y del número de paredes entre ellos, y así, poder triangular su posición. El sistema propor-

ciona un 75 % de aciertos con un error de localización que está por debajo de los 5 metros.

Desde entonces han surgido numerosos algoritmos para mejorar la precisión de esta técnica. Entre ellos, MoteTrack [19] que propone una aproximación descentralizada utilizando motas Berkeley Mica2 para obtener una mayor robustez y que el sistema no se degrade cuando falle una baliza, haya pérdidas de información o perturbaciones en la señal de RF. Para ello, se distribuye la información de la base de datos RSSI entre las balizas con un protocolo de cálculo de localización descentralizado y una métrica de distancia adaptativa en función de las balizas que han fallado. El sistema utiliza hasta 20 balizas que emiten en 7 niveles de potencia y se toman al menos 30 medidas RSSI para cada uno de los diferentes parámetros, con lo que se obtiene una base de datos estadísticamente fiable. El método se basa en la toma de la señal RSSI más intensa para localizar la baliza más cercana, después se toman los valores RSSI para las tres balizas más cercanas y se calcula la localización comparándolas con toda la base de valores RSSI para esas balizas. En una segunda aproximación, limita el conjunto de valores RSSI para cada baliza, estableciendo un valor por debajo del cual ya no se almacenan valores para dicha baliza. Se utiliza la baliza con el valor más fuerte de RSSI para localizar el objeto móvil. El sistema proporciona un 80 % de aciertos con un error de localización que está por debajo de los 3 metros.

También se han realizado sistemas desde una aproximación probabilística. En [20] se crea una red ZigBee mediante 4 balizas que emiten en un solo nivel de potencia para cada uno de los 30 puntos de la calibración. Se toman 10 medidas a lo largo del tiempo para construir una función de distribución de probabilidad (PDF, *Probability Distribution Function*) y se calcula un vector de probabilidad que se almacena en la base de datos. Para la localización se aplican las funciones de probabilidad sobre los puntos de medida partiendo de 4 medidas RSSI de los puntos de prueba. Posteriormente, se accede a la base de calibración para comprobar qué opción minimiza la probabilidad parcial para cada punto. El sistema proporciona un 70 % de aciertos con una tolerancia de 0.5 metros.

Se pueden encontrar en [21] otros métodos estadísticos que utilizan bases de datos de valores RSSI, tomados de los puntos de acceso de una infraestructura WLAN existente. En este sistema se aplican técnicas basadas en:

- o Intervalos de confianza: En las mediciones de la calibración para cada

punto se toman unos valores máximo y mínimo para cada una de las diez balizas utilizadas, creando así un intervalo de confianza para cada baliza que comparará con los intervalos de confianza generados por el objeto móvil en el punto a localizar.

- Percentiles: Similar al anterior, pero en vez de utilizar intervalos de confianza utiliza percentiles que pueden proporcionar más información sobre el RSSI. Con los percentiles para cada baliza se adjudican una serie de pesos para cada celda. Para las cinco celdas con menor peso, se calcula el centroide donde estaría situado el objeto a localizar.
- Distribuciones empíricas: Partiendo del conjunto de valores RSSI tomados en la fase de calibración para todas las balizas, se crea una “firma” para cada celda del escenario. Durante la fase de localización a cada celda se le asigna un peso que corresponde a la media empírica de la divergencia *Kullback-Leibler* (KLD) [81]. La celda con menos peso es la elegida.
- Modelo Gaussiano Multivariable (MvG): Explora la interdependencia entre los valores RSSI en cada celda para varias balizas, que puede proporcionar información sobre la geometría del escenario y puede ser cuantificado usando correlaciones espaciales de segundo orden entre las medidas, generando para cada celda una “firma” mediante una distribución gaussiana multivariable tanto para la fase de calibración como para la fase de localización.

Luego, calcula la distancia KLD entre ambas “firmas”. Una variación de este algoritmo se hace de forma iterativa por regiones. Se divide el escenario en regiones y se aplica el MvG a cada región utilizando los valores RSSI de las balizas incluidas en esa región. De este modo, se pueden eliminar regiones enteras en una primera iteración. En posteriores iteraciones, se aproxima la posición a la celda donde se situaría el punto de prueba.

- Modelo *Compressive Sensing* (CS): Debido a que las medidas RSSI pueden estar muy próximas para puntos muy separados se pretende obtener una función que provoque un cambio de espacio, como la transformada de coseno discreta (DCT, *Discrete Cosine Transform*) en procesamiento de señales, y aumente la dispersión entre dichas medidas. Para la reconstrucción de la base de medidas RSSI utiliza dos métodos diferentes: el método de puntos interiores *Primal-Dual* (L1) y un algoritmo iterativo ortogonal de búsqueda coincidente (OMP,

Orthogonal Matching Pursuit Algorithm). Ello reduce el número de medidas RSSI empleadas al 25 % del número total de medidas adquiridas.

Las pruebas para comprobar los resultados de cada técnica se realizan en dos escenarios. Un laboratorio con un área de 7 m x 12 m cubierta por 10 balizas y dividida en celdas de 55 cm x 55 cm, y en el Cretaquarium, un acuario de Grecia, cubriendo con 7 balizas un área de 1.760 m^2 dividido en celdas de 1 m x 1 m. En ambos escenarios se toman las medidas en dos condiciones, con una o dos personas presentes (escenario Sc-A) y con un grupo de entre 10 y 25 personas presentes (escenario Sc-B).

Para el primer escenario, se obtienen errores medios de 2.19 metros para la técnica con el intervalo de confianza, 1.10 metros para la técnica con los percentiles, 4.2 metros para la técnica de distribución empírica, 1.09 metros para el modelo MvG y 1.08 metros para el modelo CS, para el caso Sc-A. Para el caso Sc-B se obtienen errores medios de 2.60 metros para la técnica con el intervalo de confianza, 2.20 metros para la técnica con los percentiles, 3.20 metros para la técnica de distribución empírica, 1.10 metros para el modelo MvG y 1.08 metros para el modelo CS.

Para el segundo escenario se obtienen errores medios de 2.20 metros para la técnica con los percentiles, 1.48 metros para el modelo MvG y 1.10 metros para el modelo CS con L1 y 1.09 metros para el modelo CS con OMP, para el caso Sc-A. Para el caso Sc-B se obtienen errores medios 4.15 metros para el modelo MvG y 4.14 metros para el modelo CS con L1 y 3.59 metros con OMP. El resto de técnicas proporcionan errores significativamente más elevados.

También se realiza un estudio de la influencia del número de balizas en el error proporcionado por el método MvG en el primer escenario, que aumenta hasta un error de 1.80 metros al reducir el número de balizas a solamente 2.

En [22], se presenta una comparación entre métodos deterministas y probabilísticos, proponiendo variaciones y métodos combinados de ambos. Los métodos deterministas proporcionan un vector que representa una media estimada del RSSI para una localización dada. Partiendo del método determinista KOLA, una variante del algoritmo del vecino más próximo [79], donde se considera la distancia media de los k -vecinos más próximos, propone tres nuevas variantes:

- UKOLA (*Unweighted KOLA*): En esta variante, partiendo de los resultados del vecino más próximo, selecciona una lista con las primeras k localizaciones. Una vez seleccionada una localización, el método UKOLA ignora todas las siguientes apariciones. Por lo tanto, ignora las diferentes orientaciones y proporciona el mismo peso para la media a cada una de las localizaciones seleccionadas, aunque aparezcan varias veces en la lista.
- IWKOLA (*Iteration Weighted KOLA*): En esta aproximación, se añade un peso a cada localización dependiendo de cuántas veces aparece antes de tener las k localizaciones.
- WKOLA (*Weighted KOLA*): En este caso, primero se determinan las k localizaciones usando el método UKOLA. Después, a cada localización se le asigna un peso en función de su probabilidad. A la localización más probable (la que aparece más veces) le asigna un peso k , a la siguiente un peso $k - 1$, y así sucesivamente, hasta la menos probable, a la que se le asigna un peso 1.

Los métodos probabilísticos proporcionan una función de distribución de probabilidad (PDF, *Probability Distribution Function*) del RSSI para una localización dada. El algoritmo Normal PDF (NPDF) almacena para cada punto en la fase de calibración una serie de medidas RSSI para cada baliza, construye el histograma y calcula su normal (mediana) y su desviación estándar. En la fase de localización, un estimador suma las probabilidades de que el objeto móvil esté en ese punto para todas las balizas. La posición se obtiene a partir de la función de localización con el máximo valor.

Este método NPDF se combina con las variantes de KOLA (NKOLA) y WKOLA (NWKOLA), considerando sólo las k balizas que cumplen los criterios de KOLA y WKOLA respectivamente. También implementan un algoritmo que combina el método NPDF con la regla de Bayes.

El escenario elegido para las pruebas experimentales tiene unas dimensiones de 36.6 m x 61 m. Como balizas utilizan todos los puntos de acceso existentes de la WLAN, con lo que no se tiene un control preciso del número de balizas. Se realiza una comparación entre las medidas de todos los puntos de acceso (dimensión estándar) y las medidas sólo de aquellos puntos de acceso que aparecen tanto en la fase de calibración como en la fase de localización (dimensión reducida). Con una media de 17 balizas y usando los 11 canales del espectro 802.11 para identificar todos los puntos de acceso

disponibles, el sistema selecciona 5.000 medidas RSSI aleatoriamente de una base de datos de 100.000 medidas RSSI observadas. La Tabla 2.2 muestra el error promedio para los diferentes métodos comentados.

Algoritmo	Precisión (m)
NNSS	4.5
NPDF	3.6
NNSSR	3.5
Bayessian	3.3
WKNNSS	3.2
KNNSS	3.2
KNPDF	2.6
WKNPDF	2.7
KNNSSR	2.2
WKNNSSR	2.0

Tabla 2.2: Precisión para los distintos algoritmos presentados. El sufijo R indica dimensión reducida, el prefijo K indica el algoritmo KOLA y el prefijo WK indica el algoritmo *Weighed* KOLA.

En [82] se propone un método basado en la divergencia simétrica de Bregman que incorpora la técnica KNN. La estimación de la posición del objeto móvil se determina mediante una combinación ponderada de la muestra más cercana usando la divergencia de *Jensen-Bregman* (JBD) que unifica las distancias euclidiana y de Mahalanobis con información teórica de la divergencia *Jensen-Shannon* (JSD) de las medidas. Siendo el escenario la primera planta de un edificio de la Western Michigan University, se utiliza un Samsung S5 *smartphone* como objeto móvil. Los valores RSSI en la fase de calibración se toman para cuatro orientaciones diferentes (45°, 135°, 225° y 315°) para evitar los efectos de bloqueo de cuerpo, con un escaneo realizado cada 100 segundos en cada dirección para reducir los efectos de la variación de la señal.

En la fase de localización se toman 5 muestras cada segundo para acelerar el proceso. Se estudia el efecto en la precisión en función del número de APs (de 5 a 50) y del número de vecinos más próximos (de 5 a 80), obteniéndose los mejores resultados para 22 APs y 80 vecinos. Asimismo, se comparan los resultados con otros métodos como KNN [83], *compressive sensing* [84] y *kernel-based method* [85] y KLMVG [86] como puede verse en la Tabla 2.3.

También se han propuesto otros métodos para mejorar la precisión de las medidas RSSI durante la fase de calibración haciendo que dichas medidas

Técnica	Error promedio (m)	Precisión (m)
KNN1	1.8	3.7
Kernel-based	1.6	3.6
CS-based	1.5	2.7
KLMVG	1.02	2.13
JSD	0.98	1.93
JBD	0.89	1.85

Tabla 2.3: Precisión para los distintos algoritmos presentados.

cumplan ciertos requisitos.

Así, en [23], se adapta el algoritmo de la distancia euclídea (EDA) para escenarios grandes y cambiantes teniendo en cuenta sólo aquellas balizas que aportan información. Para adaptarse al cálculo de la posición dependiendo del entorno utiliza las 4 reglas siguientes, que deben ser cumplidas por el número de balizas y las medidas RSSI, para que la medida RSSI sea tomada en cuenta:

- Si la posición estimada está fuera del rango de la baliza, esta baliza no se considera. Debe haber un mínimo de 4 balizas válidas.
- Se establece un valor mínimo para la medida RSSI en la fase de calibración o en la de localización.
- Se establece un valor mínimo para la medida RSSI tanto en la fase de calibración como en la de localización.
- La medida RSSI de la fase de localización incluye un valor RSSI mayor que cierto límite de una de las balizas no incluida en las medidas RSSI de la fase de calibración.

El escenario elegido cubre tres plantas, cada una con un pasillo de 2 m x 36 m y un vestíbulo de 21 m x 12 m con puntos de medidas cada 1 m x 1 m y un total de 24 balizas distribuidas a lo largo del escenario. Para cada punto se toman 15 medidas RSSI para cuatro direcciones (0°, 90°, 180°, 270°). Después de cada medida, se calcula la media para cada baliza. El error promedio decrece de 2.5 metros a 1.8 metros al aumentar el número de balizas seleccionadas de 1 a 7. Con EDA adaptado el sistema consigue que

el 50 % de los puntos tengan un error inferior a 2.12 metros. Para reducir este error, introduce una media de las 20 posiciones estimadas. Ello reduce el error a 2.06 metros. Para intentar reducir el esfuerzo de la calibración, también se estudia la influencia del tamaño de la celda. El error aumenta de 2.12 metros para una celda de 1 m x 1 m hasta 3.64 metros para una celda de 6 m x 6 m. La influencia de utilizar hasta cuatro direcciones no es tan lineal, obteniéndose un error que varía entre 2.92 metros para una sola dirección (90°) hasta los 2.06 metros para tres direcciones (0°, 180°, 270°).

En [24], sobre un escenario diáfano de 10 m x 10 m con tres balizas, compara el punto de prueba con la base de medidas RSSI en dos casos: eliminando aquellas medidas que son iguales para diferentes coordenadas y sin eliminar dichas medidas. Aplica un algoritmo sencillo de *matching* y consigue un 89 % de aciertos en el caso con medidas redundantes y un 95 % en el caso de haber eliminado las medidas redundantes.

En [25] se hace un uso combinado de la técnica de KNNSS y la lógica difusa (FIS, *Fuzzy Inference Engine*). Las medidas RSSI se utilizan para crear la base de calibración y calcular los k -vecinos del dispositivo móvil en dicha base. La distancia euclídea de los k -vecinos es enviada al FIS para calcular el peso de cada vecino que luego se utiliza para calcular la posición. El algoritmo se muestra más preciso que la triangulación, la multilateración o la técnica fuzzy pura (FLIPS, *Fuzzy Logic Inferences Per Second*). En un escenario diáfano de 5 m x 5 m con celdas 1 m x 1 m se despliegan cuatro balizas para crear la base de medidas RSSI. El sistema proporciona un error promedio de 1.57 metros frente a los 2.34 metros con la técnica KNNSS pura con multilateración (cuyo algoritmo es además mucho más complejo) y los 3.58 metros con FLIPS.

Existen métodos que combinan las medidas RSSI con otros parámetros (movimiento, aceleración, etc.), como por ejemplo [26], que combina la localización y modelado simultáneos (SLAM, *Simultaneous Localization and Mapping*), método que intenta resolver las cuestiones que provoca el colocar un robot en un escenario y posición no conocidos, y que sea capaz de construir un mapa del escenario y determinar su posición dentro del mismo, junto con calibración WIFI. Para estimar la navegación se utilizan sensores de movimiento (magnetómetro para la dirección y acelerómetro para los pasos), utilizando un algoritmo de *clustering* (algoritmo de k -medias) para organizar el espacio y, a partir de ahí, determinar la división en espacios físicos (“mi oficina”, “cafetería”, “biblioteca”). Con ello se reduce el tiempo de la fase de calibración *off-line* aunque a costa de una menor precisión, y no

requiere sensores de observación de altas prestaciones, pues la localización geométrica por coordenadas no es necesaria, ya que se localiza al robot en uno de los espacios físicos antes determinados. Como escenario utiliza una planta del edificio aprovechando como balizas los 8 puntos de acceso de la planta y otros puntos de acceso de otras plantas. Para la calibración WIFI utiliza 100 medidas de RSSI para puntos espaciados cada tres metros, eliminando puntos intermedios con una diferencia menor de un cierto valor (entre 6 y 10 dBm). En la fase de localización, se amplía el espacio y se toman 5 muestras cada 1.5 metros.

Aunque la mayoría de los sistemas generalmente sólo utilizan una frecuencia y una o unas pocas potencias, la flexibilidad de los dispositivos en cuanto a la selección de número de canales y niveles de potencia, ha hecho que se incremente el número de medidas RSSI para cada punto, lo cual ayuda a mejorar la precisión de la localización a costa de una base de datos más grande, lo que conlleva un mayor tiempo y coste computacional.

En [27], se utilizan cuatro dispositivos ZigBee para localizar un robot que se mueve en ambientes de baja visibilidad (edificios con humo) dentro del proyecto GUARDIANS [87]. Mediante la técnica *fingerprinting* se toman medidas RSSI para 6 canales de frecuencias y 4 niveles de potencias que cubren el rango proporcionado por los dispositivos ZigBee utilizados. En tres escenarios diferentes, un jardín, un aula y una zona de pasillo, cada uno con características específicas que afectan a la señal de propagación, se colocan 4 balizas y se toman 5 medidas RSSI para cada punto de prueba en celdas de 1 m x 1 m. Se almacenan en la base de calibración un total de 96 paquetes que contienen tanto las medidas RSSI para transmisiones desde la baliza al objeto móvil como del objeto móvil a la baliza. Para reducir el tiempo de cálculo se hace una media de las medidas RSSI. Se comparan los resultados obtenidos con los algoritmos KNNSS y distancia mínima con los resultados obtenidos mediante el sistema ARIEL [88], sistema que usa diferentes tipos de sensores para calcular la posición (láser, sónar, WIFI y ZigBee) y decide cuál es el óptimo en cada momento dependiendo de las condiciones ambientales (visibilidad en entornos con humo debido a situaciones de emergencia). Utiliza una modificación del algoritmo KNNSS, que tiene en cuenta tanto las coincidencias exactas como las pequeñas diferencias, y asigna diversos pesos según unos parámetros límites para seleccionar 5 candidatos y elegir el mejor o hacer una media de ellos. También se realiza una comparación con un sistema de red neuronal con topología de 3 capas y 100 neuronas en la capa de entrada y 200 neuronas en la capa oculta. El sistema ofrece en el escenario pasillo un error medio de 1.7 metros eligiendo el mejor candidato o haciendo

la media entre los mejores candidatos respectivamente, frente a los 2 metros para el sistema ARIEL, 3.15 metros de la red neuronal, 3.56 metros de la distancia mínima y 2.5 metros del k -vecinos.

En [28], se propone una aproximación llamada SIB (*Shorter Is Better*) que utiliza los valores RSSI de los niveles de potencias bajas para establecer un límite y excluir las medidas para los niveles de potencias altas. En un escenario que cubre un área de 52 m x 48 m, se despliegan 37 balizas y se toman 100 medidas RSSI para cada punto de prueba en celdas de 1 m x 1 m. Primero se estima el nivel de potencia máxima y luego se transmite en los 29 niveles de potencia posibles. En la fase de localización se excluyen aquellas balizas en las que no se observa el nivel mínimo de potencia y sólo se comparan aquellas balizas en que son visibles tanto la potencia máxima como la mínima. Se realiza una comparativa utilizando sólo el nivel máximo de potencia (error de 7.6 metros), utilizando sólo el nivel mínimo de potencia (error de 3.42 metros) y utilizando todos los niveles de potencia (error de 5.13 metros), frente al sistema SIB que ofrece un error promedio de 1.15 metros.

Otra manera de reducir el tamaño de la base de datos consiste en aplicar técnicas de interpolación. Estas técnicas se han demostrado útiles para reducir el número de puntos de medida necesarios para la precisión deseada, tanto en redes basadas en tecnología IEEE 802.11 como en redes IEEE 802.15.4.

En [30], se realiza una comparativa para 15 escenarios abiertos (4.3 km x 4.3 km) para los que utiliza tecnología GSM y 15 escenarios cerrados (40.5 m x 40.5 m) para los que utiliza tecnología WLAN. Genera una rejilla de 0.5 m x 0.5 m en 6 de los escenarios y un muestreo aleatorio en los 9 restantes. Se aplican tres métodos de interpolación espacial:

- El método Kriging supone que la variación espacial de las medidas se puede calcular a partir de las medidas circundantes según unas funciones homogéneas en toda la región. Estas funciones se pueden obtener analizando la correlación espacial entre las medidas en función de la distancia entre ellas, calculando la semivarianza entre medidas separadas por distancias diferentes.
- El método modificado de Shepard (MSM, *Modified Shepard Method*) usando ponderación por distancia (IDW, *Inverse Distance Weighting*) que utiliza un método de mínimos cuadrados de distancia inversa.

- Gradiente más inverso de la distancia al cuadrado (GIDS, *Gradient plus Inverse Distance Squared*), método basado en la regresión múltiple lineal.

Se compara el mapa de medidas RSSI original con el interpolado en términos de error relativo medio absoluto (RMAE, *Relative Mean Absolute Error*) observando, en general, que el error de interpolación decrece cuando aumenta el número de observaciones y que la colocación regular de las balizas provoca mejores resultados de interpolación. También se observa que los errores de localización son mayores en espacios cerrados que abiertos y que una rejilla regular de celdas proporciona una mejor interpolación que un muestreo aleatorio.

En cuanto a los métodos de interpolación, el método Kringing ofrece mejores resultados en términos de errores de interpolación. Sin embargo, el método MSM con IDW es el método más flexible y robusto para la estimación del mapa. El sistema proporciona un RMAE en torno al 10 % para 36 observaciones, un 6 % para 400 observaciones y un 5 % para 947 observaciones para los escenarios cerrados.

En [29], propone un estudio de la reducción del tiempo empleado en crear la base de datos de calibración mediante la interpolación usando una función de base radial (RBF, *Radial Basis Function*). Para probarlo, en la planta de un edificio de 31 m x 92 m se toman medidas RSSI en 118 despachos (celdas de 2.85 m x 2.85 aproximadamente), con un total de 137 puntos de calibración mediante los 22 AP presentes (con una media de 3.6 por punto) almacenando un total de 27.796 lecturas en un primer día y un total de 25.457 lecturas el segundo día.

En la Figura 2.9 se puede observar el error promedio en función de la fracción de puntos de calibración utilizados. Con el 50 % de puntos de calibración el error aumenta un 20 % (0.74 metros) y con un 20 % el error aumenta un 42 % (1.59 metros). Otro resultado que aporta es que la cantidad de tiempo utilizado en la recopilación de medidas en cada punto de la fase de calibración no afectaba de manera significativa a la precisión (prácticamente el mismo error de 3.75 metros para sesenta segundos que para veinte segundos).

En [89], se parte del modelo de propagación de la señal y propone varios modelos para estimar la media de pérdidas de señal en los trayectos. Estos modelos son:

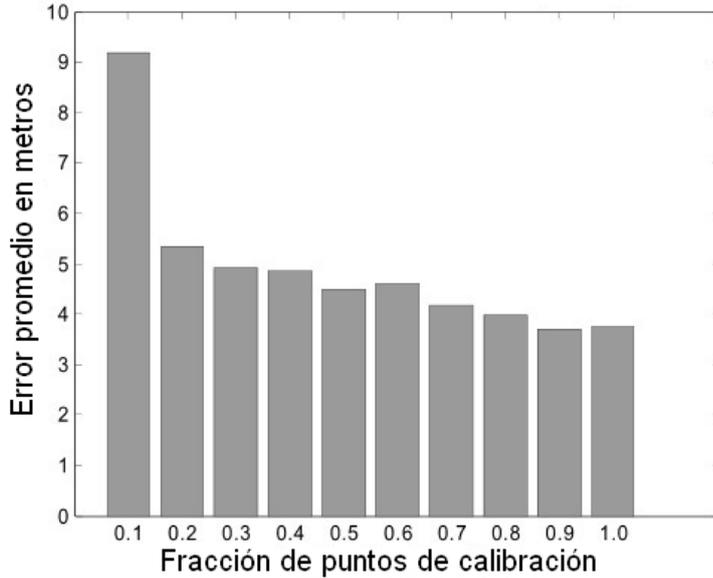


Figura 2.9: Error frente a fracción de puntos de calibración.

- El modelo de pendiente única (OSM, *One-Slope Model*) que asume una dependencia lineal entre la pérdida de señal en el trayecto y el logaritmo de la distancia entre la baliza y el objeto móvil [90]

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.4)$$

donde $PL(d_0)$ es la referencia de la pérdida en el trayecto a la distancia d y n especifica el comportamiento de la pérdida en el trayecto para un tipo de edificio en particular. Esta n puede variar aproximadamente entre 2 y 6.5 [91].

- El modelo multiparedes (MWM, *Multi-Wall Model*), que es una generalización del OMS, introduce la atenuación producida por paredes y suelos

$$PL(d)[dB] = 10n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \sum_{p=1}^P WAF(p) + \sum_{q=1}^Q FAF(q) \quad (2.5)$$

donde P y $WAF(p)$ y Q y $FAF(p)$ son el número y el factor de atenuación de paredes y suelos respectivamente entre la baliza y el objeto móvil [92].

- El nuevo modelo empírico (NEM, *New Empirical Model*) [93] es una modificación del modelo MWM que tiene en cuenta el ángulo de incidencia con paredes y suelos para calcular el coeficiente de atenuación y añade una compensación por la difracción de la señal en las esquinas del escenario.

En el escenario utilizado existen dos plantas, la primera abierta y la segunda un escenario de oficinas con paredes y otros obstáculos, que cubren un área de 60 m x 24 m y es dividido en una rejilla de celdas de 2 m x 2 m. En el artículo se representan 100 medidas RSSI proporcionadas por 10 balizas en cada uno de los 168 puntos de prueba. Se propone recopilar el menor número de muestras posibles y completar la base de calibración con valores interpolados mediante el método OSM, ya que, aunque sea inferior a los otros métodos, ofrece una complejidad computacional menor. Para la localización se aplica el algoritmo del vecino más próximo.

Utilizando sólo 18 puntos de medida en la planta cerrada, el sistema ofrece una precisión en la localización de 3.6 metros para el algoritmo propuesto (Tabla 2.4).

	Media	50 %	67 %	90 %
Medido	2.45	1	2.2	6.7
OSM	11.9	8.2	14.8	23.2
MWM	9.1	7.7	11.2	20.2
NEM	3.4	2.2	3.9	7.6
Propuesto	3.6	2.4	3.9	11

Tabla 2.4: Precisión de la localización en metros para los algoritmos descritos.

En el artículo [94] se utiliza el CSI (*Channel Status Information*) en vez del nivel RSSI para crear la base *fingerprinting*, ya que el CSI puede proporcionar más información *multipath* que el RSSI, con diferentes niveles de potencia y fases en diferentes subportadoras. Asimismo, se pretende incrementar la base de datos con un esfuerzo reducido por parte del operador. Para ello se convierten los datos CSI en mapas de amplitud y se propone un método basado en una *Generative Adversarial Network* (GAN) para generar de manera rápida más muestras y mapas de amplitud. Sobre un escenario de 7 m x 7 m dividido en 49 celdas se coloca una antena transmisora y 3 antenas receptoras. Para cada uno de los 49 puntos de referencia, situados en el centro de las celdas, se toman 500 paquetes de CSI. Hay 3 enlaces y cada

enlace contiene 30 subportadoras. Así que cada muestra CSI tiene $1 \times 3 \times 30$ dimensiones. Para cada punto se seleccionan aleatoriamente 100 muestras durante 1.000 veces para dibujar el mapa de amplitudes. Después se usa el modelo AF-DCGAN (*Amplitude Feature Deep Convolution GAN*) para generar 1.000 mapas de amplitud para puntos de referencia, aumentando así la base de datos inicial. Los puntos de localización son diferentes de los puntos de referencia y se sitúan en los vértices de las celdas. Luego, se calcula el centro geométrico de los cuatro puntos con más similitud para la localización, Finalmente, realiza una comparación con otros métodos como el FIFS [95], DeepFI [96] y GPR [97]. Se pueden observar los resultados en la Tabla 2.5.

Método	Error promedio (m)
Base de datos inicial	1.34
Base de datos ampliada un 40 %	1.31
Base de datos ampliada un 70 %	1.23
Base de datos ampliada un 100 %	1.18
FIFS	1.39
DeepFI	1.22
GPR	1.75

Tabla 2.5: Precisión de la localización en metros para los algoritmos presentados.

En [98] se utilizan infrarrojos piroeléctricos (PIR, *Pyroelectric Infrared*) para situar a la persona en una zona y la técnica *fingerprinting* para localizar su posición. Los sensores PIR detectan la radiación electromagnética emitida por las personas cuando atraviesan el campo visual del sensor. La salida del sensor está caracterizada por la magnitud del voltaje observado. En un área despejada de 15 m x 15 m se colocan cuatro APs (una en cada esquina) y cuatro sensores PIR situados de manera cada uno cubre un cuadrante del área completa. Sobre una rejilla de 0.6 m x 0.6 m se toman 625 muestras de RSSI en el centro de cada celda. Utilizando el algoritmo KNN se obtiene una precisión por debajo de 0.6 metros para el 93 % de los puntos.

La técnica *fingerprinting* es una de las más utilizadas en los sistemas de localización en interiores y los algoritmos utilizados para mejorar la precisión son muchos y variados. La siguiente Figura ?? resume algunos de los sistemas comerciales ya comentados con sus características principales adaptado de [39].

Sistema	Tecnología inalámbrica	Algoritmo de localización	Precisión	Acierto	Complejidad	Escalabilidad/ Dimensiones	Robustez	Coste
Microsoft Radar	WLAN/RRSI	KNNSS	3-5m	50% dentro de los 2,5m y 90% dentro de los 5,9m	Moderada	Buena/2D, 3D	Buena	Bajo
Horus	WLAN/RRSI	Métodos probabilísticos	2m	90% dentro de los 2,1m	Moderada	Buena/2D	Buena	Bajo
DIT	WLAN/RRSI	MLP, SVM, etc.	3m	90% dentro de los 5,12m para MLP; 90% dentro de los 5,40m para SVM;	Moderada	Buena/2D, 3D	Buena	Bajo
Ekahau	WLAN/RRSI	Métodos probabilísticos	1m	50% dentro de los 2m	Moderada	Buena/2D	Buena	Bajo
Snap Track	GPS asistido, TDOA		5-50m	50% dentro de los 25m	Alta	Buena/2D, 3D	Pobre	Medio
WhereNet	UHF TDOA	Mínimos cuadrados	2-3m	50% dentro de los 3m	Moderada	Muy buena/2D, 3D	Buena	Bajo
Ubisense	UWB unidireccional TDOA+AOA	Mínimos cuadrados	15cm	99% dentro de los 30cm	Respuesta en tiempo real (1Hz-10Hz)	2-4 sensores por celda (100-1000m); 1 Ubitag por objeto/2D, 3D	Pobre	Medio a alto
Sapphire Dart	UWB unidireccional TDOA	Mínimos cuadrados	<30cm	50% dentro de los 30cm	Respuesta en frecuencia (0,1Hz-1Hz)	Buena/2D, 3D	Pobre	Medio a alto
SmartLOCUS	WLAN RSSI + Ultrasonidos RTOF	N/A	2-15cm	50% dentro de los 15cm	Media	Buena/2D	Buena	Medio a alto
EIRIS	IR+UHF RSSI+LF	Basado en PD	<1m	50% dentro de 1m	Media a alta	Buena/2D	Pobre	Medio a alto

Sistema	Tecnología inalámbrica	Algoritmo de localización	Precisión	Acierto	Complejidad	Escalabilidad/ Dimensiones	Robustez	Coste
SpotON	RFID/RSSI	Ad-Hoc trilateración	Depende del tamaño del cluster	N/A	Media	Clúster al menos 2 etiquetas/2D	Buena	Bajo
LANDMARC	RFID/RSSI	KNNSS	<2m	50% dentro de 1m	Media	Alta densidad de nodos	Pobre	Bajo
TOPAZ	Bluetooth (RSSI) + IR	Basado en PD	2m	95% dentro de los 2m	Retraso en la localización 15-30s	Nodos cada 2-15m	Pobre	Medio
MPS	QDMA	Ad-Hoc trilateración	10m	50% dentro de los 10m	1s	Excelente/2D, 3D	Buena	Medio
GPPS	DECT sistema celular	Proceso gaussiano/KNNSS	7,5m para GP; 7m para KNNSS	50% dentro de los 7,5m	Media	Buena/2D	Buena	Medio
Robot-based	WLAN/RRSI	Aproximación bayesiana	1,5m	80% dentro de los 10m	Media	Buena/2D	Buena	Medio
MultiLoc	WLAN/RRSI	SMP	2,7m	50% dentro de los 2,7m	Baja	Buena/2D	Buena	Medio
TIX	WLAN/RRSI	TIX	5,4m	50% dentro de los 5,4m	Baja	Buena/2D	Buena	Medio
Pin-Point 3D-ID	UHF (40MHZ) RTOF	Aproximación bayesiana	1m	50% dentro de 1m	5s	Buena/2D, 3D	Buena	Bajo
GSM <i>fingerprinting</i>	Red celular GSM/RRSI	KNNSS ponderado	5m	80% dentro de los 10m	Media	Excelente/2D, 3D	Buena	Medio

Figura 2.10: Comparativa de diferentes características de algunos de los sistemas de localización en interiores expuestos.

2.5.3. Métricas

En la técnica de *fingerprinting* se comparan las medidas RSSI tomadas durante la fase de calibración con las medidas RSSI tomadas durante la fase de localización. Para la comparación, se aplica un criterio de similitud para estimar la mejor localización. En [99], se ofrece una recopilación en familias de las diversas métricas, así como una resolución de indeterminaciones y otros problemas en la implementación de las fórmulas.

En [100], se presentan las nueve métricas más comunes que se utilizan para la localización en interiores. Partiendo de la distancia universal de Minkowski, obtiene otras tres distancias e introduce otras seis distancias para su comparación, obteniendo un total de diez distancias.

1. - Distancia de Minkowski

La ecuación es la siguiente

$$L_q(X, Y) = \sqrt[q]{\sum_{i=1}^N |Y_i - X_i|^q} \quad (2.6)$$

donde X_i es cada una de las medidas RSSI en la fase de entrenamiento, Y_i cada una de las medidas RSSI en la fase de localización, q es el parámetro norma y L_q es la distancia entre los puntos.

2. - Distancia de Manhattan

Eligiendo $q = 1$ en la fórmula de la distancia Minkowski, se obtiene la distancia Manhattan. Representa la distancia entre dos puntos siguiendo una rejilla de ángulo recto. La ecuación es la siguiente

$$L_1(X, Y) = \sum_{i=1}^N |Y_i - X_i| \quad (2.7)$$

3. - Distancia Euclídea

Es la más utilizada y describe la distancia mínima entre dos puntos en el espacio euclídeo. La ecuación es la siguiente

$$L_2(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N |Y_i - X_i|^2} \quad (2.8)$$

Tiene su base en el conocido teorema de Pitágoras, donde la distancia entre dos puntos sería la longitud de la hipotenusa y los catetos estarían formados por las proyecciones de los puntos sobre los ejes coordenados.

La distancia euclídea se utiliza en el campo de la edición digital de fotografía ya que permite la detección automatizada de bordes.

4. Distancia de Chebyshev

Tomando $L = \infty$ en la distancia de Minkowski se obtiene la distancia Chebyshev que determina la diferencia absoluta máxima entre dos pares de vectores. La ecuación es la siguiente

$$L_{\infty}(X, Y) = \max_N |Y_i - X_i| \quad (2.9)$$

5. - Distancia de Canberra

La distancia de Canberra es similar a la distancia de Manhattan pero ponderada por la suma de los valores absolutos. Cada elemento tiene así un valor entre 0 y 1. La ecuación es la siguiente

$$d_c = \sum_{N=1}^N \frac{|Y_i - X_i|}{|Y_i| + |X_i|} \quad (2.10)$$

6. - Distancia Coseno

La distancia Coseno describe más la similaridad entre dos vectores que la distancia. El término derecho de la ecuación puede tomar valores entre -1 y 1. Cuanto mayor sea el valor, más parecidos son ambos vectores. La ecuación es la siguiente

$$d_{cos} = 1 - \frac{\sum_{N=1}^N Y_i \cdot X_i}{\sqrt{\sum_{N=1}^N Y_i^2} \sqrt{\sum_{N=1}^N X_i^2}} \quad (2.11)$$

7. - Distancia de Sorensen

La distancia Sorensen es otra variante de la distancia Manhattan donde su valor es normalizado. Cada elemento tiene así un valor entre 0 y 1. Es usada en ecología para comparar la similitud entre distintas especies. La ecuación es la siguiente

$$d_{sor} = \frac{\sum_{N=1}^N |Y_i - X_i|}{\sum_{N=1}^N |Y_i + X_i|} \quad (2.12)$$

8. - Distancia de Hellinger

En esta distancia la norma de las raíces cuadradas de los vectores se dividen por $\sqrt{2}$. La ecuación es la siguiente

$$d_{hel} = \frac{1}{\sqrt{2}} \|\sqrt{Y_i} - \sqrt{X_i}\| \quad (2.13)$$

9. - Distancia Chi-cuadrado

Es similar a la distancia euclídea pero ponderada por un factor ρ_N . La ecuación es la siguiente

$$d_{chi} = \sum_{N=1}^N \frac{(Y_i - \rho_N)^2}{\rho_N} \quad (2.14)$$

donde

$$\rho_N = \frac{Y_i + X_i}{2} \quad (2.15)$$

10. - Distancia de Jeffrey

También utiliza el factor ρ_N . La ecuación es la siguiente

$$d_{jef} = \sum_{N=1}^N \left(Y_i \cdot \log \frac{Y_i}{\rho_N} + X_i \cdot \log \frac{X_i}{\rho_N} \right) \quad (2.16)$$

En la referencia [100], una vez introducidas las métricas, se realiza un experimento sobre un escenario con un área de 40 m x 20 m donde se sitúan 93 puntos de medida en celdas de 2.5 m x 2.5 m. Usando los seis AP como balizas, el sistema almacena las medidas RSSI para cuatro orientaciones diferentes de las cuatro redes WIFI presentes en el escenario y se seleccionan aleatoriamente 6 puntos de prueba para su localización. Utiliza los algoritmos NNSS, KNNSS y KWNNSS. El sistema proporciona los menores errores promedio para el algoritmo KWNNSS con distancia de Hellinger (0.3 metros) y con distancia Euclídea (0.31 metros) y los mayores para el algoritmo NNSS con las distancias de Chebysev y Coseno (1.79 metros).

2.6. Conclusiones

Tanto las metodologías como los sistemas inalámbricos descritos tienen sus ventajas y sus inconvenientes. Generalmente, las condiciones del escenario a estudiar y las necesidades del sistema determinarán la tecnología inalámbrica a utilizar. Existen sistemas, como el seguimiento de maletas en los aeropuertos mediante etiquetas de RFID, que llevan muchos años en funcionamiento con buenos resultados. El desarrollo de la tecnología ZigBee, unido a su bajo coste y a la posibilidad de adaptarse a cualquier escenario, ha hecho que en los últimos años, esta tecnología haya sido utilizada en multitud de sistemas. La proliferación de los puntos de acceso WLAN en edificios de grandes instituciones ha provocado que esta tecnología sea una de las más utilizadas. En unos casos, la necesidad de usar las infraestructuras existentes o el coste del sistema determinará el sistema elegido. En otros casos, será la necesidad de una alta precisión. El uso de diferentes tecnologías al mismo tiempo puede ayudar a mejorar el sistema completo.

Análogamente, los diversos algoritmos de localización vienen determinados por la complejidad del sistema. La técnica de *fingerprinting* permite adquirir una gran cantidad de medidas para la localización aunque a costa de un mayor consumo de tiempo y recursos. Esta técnica se combina con algoritmos probabilísticos y/o deterministas para mejorar la precisión de la localización.

Capítulo 3

Descripción de los escenarios y del hardware utilizado

3.1. Introducción

Los distintos sistemas descritos en el capítulo anterior se han implementado mediante el uso de diversas tecnologías como, por ejemplo, RFID, WIFI, ZigBee, etc., para lo que han utilizado diferentes dispositivos como *tags*, APs, WSNs, etc. La elección depende de las diversas circunstancias del escenario a tratar, como pueden ser las infraestructuras ya existentes, la necesidad de una alta precisión o simplemente el coste del sistema.

En este capítulo se introducen los escenarios utilizados en las pruebas experimentales desarrolladas. El primer escenario elegido es una sección del segundo piso del segundo bloque del edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSE) en Burjasot. Esta sección comprende un laboratorio, tres despachos y parte del pasillo. Se trata de un escenario cerrado con paredes y obstáculos diversos. Asimismo, en colaboración con la Universidad Jaime I de Castellón, también se eligió el escenario pasillo de dicha universidad (UJI), presentado en [27], que consiste en un escenario más abierto y sin paredes. De este modo, se pretende comparar los resultados obtenidos en unos escenarios bastante dispares. En ambos escenarios se utilizan diversas potencias y canales con un número de puntos de medida similar.

Como no se requería que la precisión en la localización en el escenario de la ETSE fuese extremadamente alta, se pretendía una precisión en torno al metro, se utilizaron los dispositivos ZigBee que sirven para cubrir dicha precisión. La técnica utilizada fue la de *fingerprinting*, cuya primera fase consiste en la recogida de datos y en la creación de una base de calibración. Para colocar el transmisor en los distintos puntos de medida de un modo no manual se pensó en algún tipo de robot que se pudiera configurar para lograr un desplazamiento por el escenario de una forma lo suficientemente precisa y rápida. Por tanto, se hacía necesario algún tipo de microcontrolador para establecer una conexión entre los dispositivos ZigBee y el robot. La elección de estos dispositivos vino dada por la disponibilidad de todos ellos en el departamento de Informática de la ETSE, a excepción del robot que fue cedido por el departamento de Electrónica de la ETSE.

En este capítulo, se describen el hardware empleado para la realización de las pruebas en los escenarios antes descritos. Para el escenario de la ETSE se utilizaron motas Crossbow's TelosB para las balizas y el transmisor, el robot Lego Mindstorm EV3 para el desplazamiento por el escenario, una Raspberry Pi para la toma de datos y para interconectar las motas con el robot y, finalmente, un portátil para manejar a distancia la Raspberry Pi estableciendo para ello una red *ad hoc* mediante un conector USB WIFI.

También se describen, de manera más breve, el hardware implementado en el escenario de la UJI, donde se utilizaron microcontroladores CC2431 de Texas Instruments montados sobre un módulo SmartRF04EB para el transmisor y el mismo microcontrolador montado sobre un módulo SoC_BB para las balizas, una plataforma Erratic-Videre para el desplazamiento por el escenario, un AOpen Mini-PC MP915 que actúa como consola de control de todo el sistema y que posee una tarjeta WIFI para la comunicación con la estación base.

3.2. Descripción de los escenarios

3.2.1. Descripción del escenario de la ETSE

Las pruebas se realizaron en el segundo piso del segundo bloque del edificio de la ETSE sito en la Avenida Universidad s/n de Burjasot en Valencia

(España). La Universidad de Valencia está asociada al proyecto Eduroam (contracción de *education roaming*) [101], un servicio de acceso sin hilos a la red en sus distintas estancias y alrededores de las mismas. La red informática de la Universidad de Valencia cubre 3 campus con más de 90 edificios. Para dar conectividad a todos estos edificios se dispone de más de 1.200 dispositivos de red que incluyen conmutadores Ethernet 10/100/1000/10000 Mbps, más de 40 enrutadores y más de 1.300 puntos de acceso para la red inalámbrica. La red está segmentada en más de 300 VLAN's y más de 300 subredes IPv4 e IPv6. Para establecer una conexión con ella sólo se necesita disponer de una cuenta de correo de la Universidad de Valencia o de cualquier institución participante en el proyecto Eduroam y de un ordenador configurado para poder obtener su dirección de red mediante DHCP/BOOTP, con soporte para protocolo de acceso a la red 802.1x mediante WPA2/AES y una tarjeta o dispositivo de red inalámbrica que cumpla con las especificaciones 802.11b o 802.11g. Adicionalmente, en algunos lugares se soportan las especificaciones 802.11a y 802.11n. En función de la calidad de la señal que se reciba en un punto determinado, la red inalámbrica permite un ancho de banda de hasta 56 Mbps.



(a) Despachos 2.2.4 y 2.2.6.

(b) Despacho 2.2.2

Figura 3.1: Despachos del escenario de la ETSE

Para este experimento en concreto, se utilizaron los despachos 2.2.2, 2.2.4, 2.2.6, el laboratorio de proyectistas 2.2.1 y parte del pasillo existentes entre dichos despachos y el laboratorio. Los despachos tienen unas dimensiones de 2.85 metros de ancho, 6.75 metros de largo y una altura de 3.15 metros, con una puerta de entrada de 0.9 metros de ancha en el extremo noreste, un armario empotrado a la derecha de la puerta de entrada y un ventanal desde el suelo al techo en el extremo suroeste (Figura 3.1a). La puerta también es de cristal, las paredes tienen revestimiento de madera y el techo posee un revestimiento de corcho. Los despachos 2.2.4 y 2.2.6 tienen la misma distribución de mobiliario con dos mesas en forma de L, un sillón para el profesor y dos sillas por mesa para los alumnos. El despacho 2.2.2 también tiene dos mesas en forma de L, un sillón para el profesor y dos sillas por mesa, aunque el posicionamiento de las mesas es diferente y, además, dispone de un armario de metro y medio de alto y un metro de ancho, diversas cajas de embalaje y una cajonera en el suelo junto a la pared sureste. (Figura 3.1b).



(a) Laboratorio 2.2.1

(b) Pasillo

Figura 3.2: Laboratorio y pasillo del escenario de la ETSE

El laboratorio tiene unas dimensiones de 6.75 metros de ancho, 9 metros de largo y una altura de 3.15 metros. La puerta de entrada es de cristal de 1.2 metros de ancha y el lado noreste es un ventanal en su totalidad. Dispone de

8 mesas con ordenadores y pantallas en dos grupos enfrentadas de dos en dos, con un pasillo entre ambos grupos. Junto al ventanal se sitúan tres mesas más sin ordenadores ni pantallas. En los lados noroeste y sureste hay dos armarios de madera en cada uno. (Figura 3.2a). La parte de pasillo utilizado tiene unas dimensiones de 2.15 metros de ancho por 8.70 metros de largo (Figura 3.2b).

Se puede ver la disposición completa de los despachos y el laboratorio y su orientación en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Esquema del escenario de la ETSE.

3.2.2. Descripción del escenario de la UJI

Se introduce el escenario pasillo de la Universidad Jaime I presentado en [27]. Dicho escenario, situado en la segunda planta del edificio de la Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales, con unas dimensiones de 17 m x 10 m, era más abierto, sin estancias separadas pero con columnas, el



Figura 3.4: Escenario pasillo de la UJI.

hueco de una escalera, barandillas y puertas de metal y celosías en el techo (Figura 3.4 y 3.5).

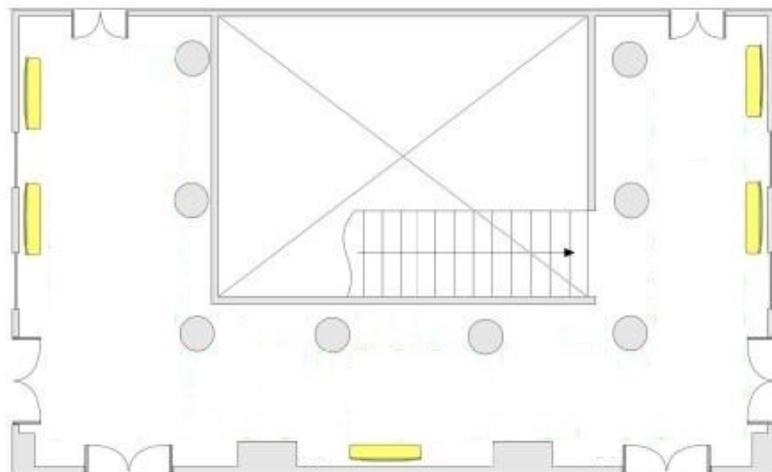


Figura 3.5: Esquema del escenario pasillo de la UJI.

3.3. Despliegue

3.3.1. Introducción

Uno de los principales problemas en la localización en interiores basados en RSSI viene dado por la fuerte atenuación de la señal producida por las paredes presentes en el escenario y por los efectos de la propagación *multipath*. Un estudio previo de la correcta localización de las balizas teniendo en cuenta el tamaño del escenario y los puntos de referencia, tanto en cantidad como en situación, puede ayudar a mejorar la precisión deseada. En [102] presentan como los principales factores que influyen en la precisión de la localización en interiores los siguientes:

- La necesidad de obtener información de al menos tres balizas para conseguir una localización sin ambigüedades del objeto móvil.
- Para reducir la zona donde puede estar el objeto móvil el ángulo de visión entre éste y las balizas debe ser igual.
- En un escenario de interior los dispositivos transmisores y receptores están rodeados por paredes y mobiliario que provocan que las señales reflejadas por los obstáculos alcancen al receptor, propagándose a lo largo de diferentes caminos, dando así diferentes fases. Otro problema es la correcta estimación del coeficiente de reflexión de cada obstáculo.
- En los escenarios de interior no es posible la visión directa entre la baliza y el objeto móvil en todos los puntos de referencia. Por ello hay que tener en cuenta una atenuación adicional.
- La elección de un correcto modelo de propagación de la señal depende de las condiciones del escenario seleccionado. Para sistemas que utilizan la RSSI, generalmente, se utilizan métodos empíricos basados en la toma de un gran número de medidas.

Sin embargo, las condiciones reales de cada escenario son las que determinan, en la mayoría de los casos, la colocación de las balizas y de los puntos de referencia.

3.3.2. Despliegue en el escenario de la ETSE

Se situaron 6 balizas para cubrir el escenario. Una baliza en cada uno de los despachos, otra en el pasillo y otras dos en el laboratorio. Dichas balizas se colocaron colgando de las barras de luz a 2.5 metros del suelo.

Los puntos de medida (puntos azules) y las balizas (puntos verdes) se dispusieron como se indica en la Figura 3.6. En total, se tomaron medidas en 98 puntos del escenario separados 90 centímetros unos de otros salvo unos pocos puntos intermedios que estaban separados 60 centímetros.

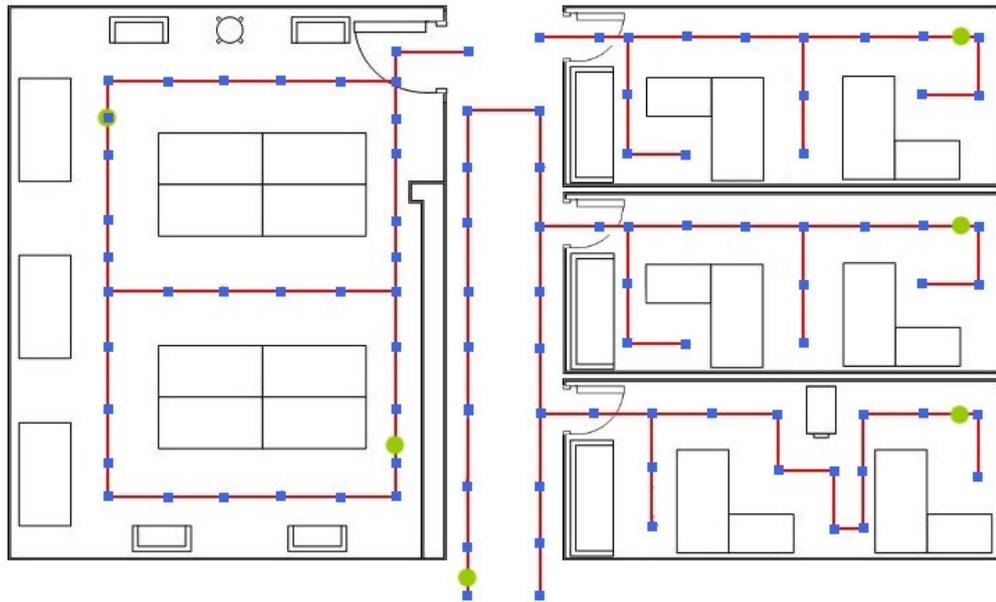


Figura 3.6: Puntos de medida (color azul) y balizas (color verde) para el escenario de la ETSE.

3.3.3. Despliegue en el escenario de la UJI

Se define una rejilla (Figura 3.7) de 113 puntos de medida (puntos verdes) separados 1 metro entre cada uno de ellos y se disponen cuatro balizas B_i en posiciones conocidas a unos 180 centímetros del suelo (puntos rojos).

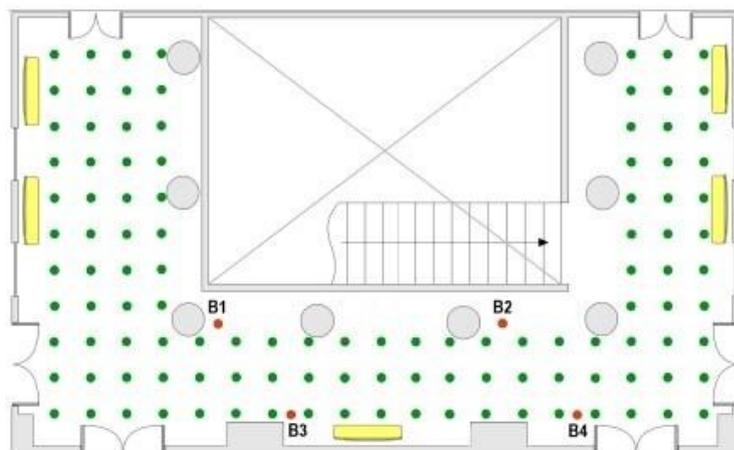


Figura 3.7: Los puntos verdes representan los puntos de medida y los puntos rojos (Bi) las cuatro balizas para el escenario de la UJI.

3.4. Hardware utilizado en los escenarios

3.4.1. Motas Crossbow's TelosB

El desarrollo de nuevas tecnologías inalámbricas ha disparado el número de aplicaciones prácticas sobre todo en el ámbito urbano [103]. Los dispositivos ZigBee están pensados para aplicaciones que necesiten establecer una comunicación segura con una tasa de envío de datos baja y con un consumo bajo de la batería.

Para el escenario de la ETSE se eligieron las placas TelosB (Figura 3.8a) del fabricante Crossbow (actualmente parte de Memsic), que son comúnmente conocidas como “motas”. Son una plataforma diseñada para la transmisión inalámbrica de datos, tanto en el campo de la investigación como en el de la industria. Dicha plataforma fue desarrollada por la UC Berkeley. El término “motas” se refiere a una clase general de tecnologías cuyo objetivo es conseguir unos sensores pequeños, robustos y versátiles que puedan fácilmente ser desarrollados en amplias áreas. Crossbow se refiere a su línea de motas como “Smart Dust” sugiriendo que un día la tecnología alcanzará el nivel de nanoescala. Las motas son alimentadas por dos pilas AA, aunque se pueden alimentar mediante el conector USB.

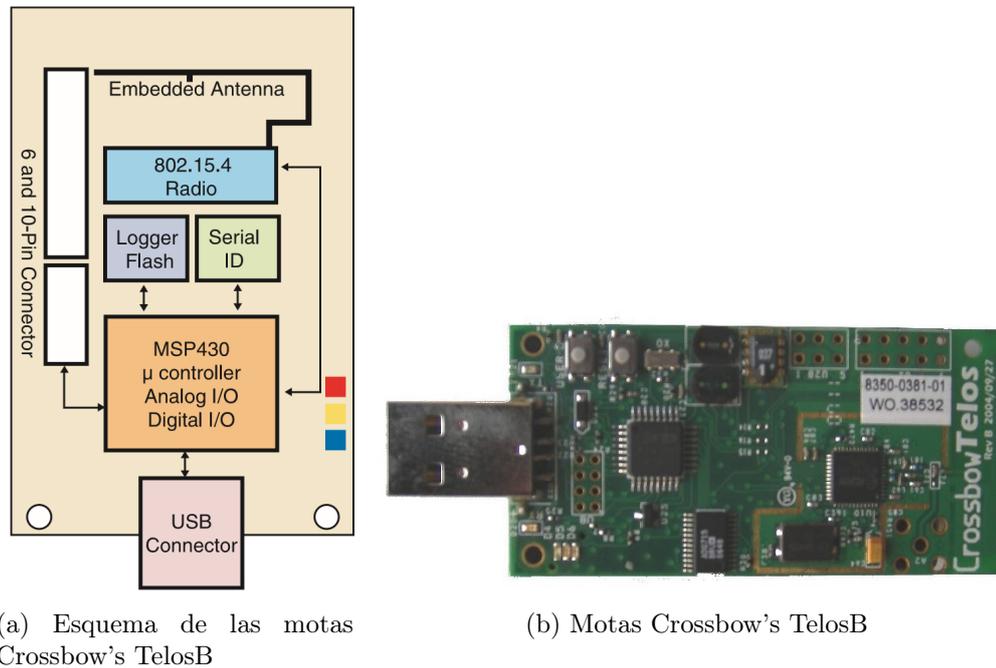


Figura 3.8: Motas Crossbow's TelosB.

Las principales características de estas motas según su *datasheet* [104] son:

- IEEE 802.15.4/ZigBee.
- 2.4 to 2.4835 GHz, compatibilidad global con la banda ISM.
- 250 kbps *data rate*.
- Antena integrada en la placa.
- 8 MHz TI MSP430 microcontrolador con 10kB RAM.
- Bajo consumo de corriente.
- 1MB de memoria flash.
- Programación y toma de datos vía USB.
- Sistema operativo TinyOS 1.1.10 o superior.

La principal ventaja de estas motas es su bajo consumo y su principal desventaja es que la antena está integrada en la propia placa.

Estos dispositivos se han utilizado en multitud de aplicaciones prácticas, como por ejemplo:

- en el medio urbano, para detección de atascos de tráfico [105].
- en el medio rural, para monitorizar los diferentes sistemas de una granja avícola [106].
- en el hogar, para monitorizar el consumo energético producido por los diferentes dispositivos [107].
- en la industria, para mejorar la eficiencia de los sistemas lumínicos en los edificios [108].
- en el campo de la medicina, tanto para controlar la propagación de enfermedades infecciosas, como en su estudio [109] o para vigilar el movimiento de los enfermos de Parkinson con el fin de administrarles la medicación en el momento adecuado [110].

El lenguaje utilizado para la programación de las motas es el TinyOS, sistema operativo de código abierto para dispositivos inalámbricos de bajo consumo y especialmente útil para dispositivos con microcontroladores que tienen sensores o capacidades de red. Está diseñado para microcontroladores de unos pocos KB de RAM y unas pocas decenas de KB de código. TinyOS está escrito en NesC (*Network Embedded Systems C*), una variante del lenguaje C, aunque los programadores pueden escribir aplicaciones en C. Debido a la multitud de usuarios e investigadores y a sus más de diez años de existencia tiene un código muy robusto y eficiente. TinyOS tiene un amplio soporte de redes, y ello incluye excelentes diseños de protocolos, que se han convertido en estándares *de facto*, o en algunos casos, parte de los estándares de Internet. En parte, este soporte es debido al uso de TinyOS como plataforma por los grupos principales de investigación de dispositivos inalámbricos de bajo consumo.

3.4.2. Microcontrolador CC2431 y *sockets*

Para el escenario de la UJI, se eligió el microcontrolador CC2431 de Texas Instruments (Figura 3.9). El modelo elemental de este micro consta de un procesador Intel 8051 a 32 MHz, con una memoria flash de 128Kb, una memoria RAM de 8Kb y un conector para la antena.

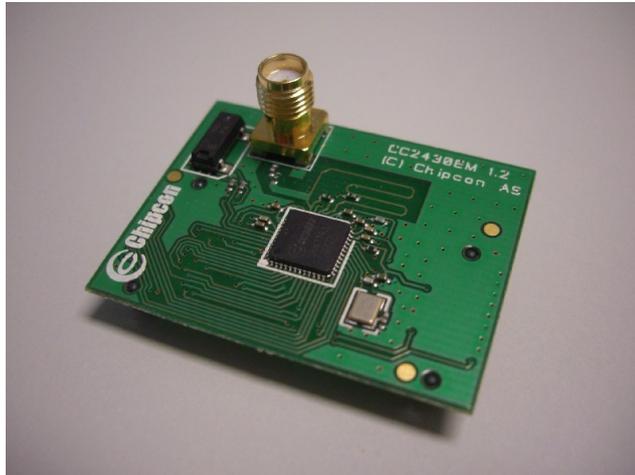


Figura 3.9: Modelo elemental del microcontrolador CC2431.

Para las baliza se montó el micro sobre el *socket* módulo SoC_BB que le proporciona una plataforma autónoma (Figura 3.10).

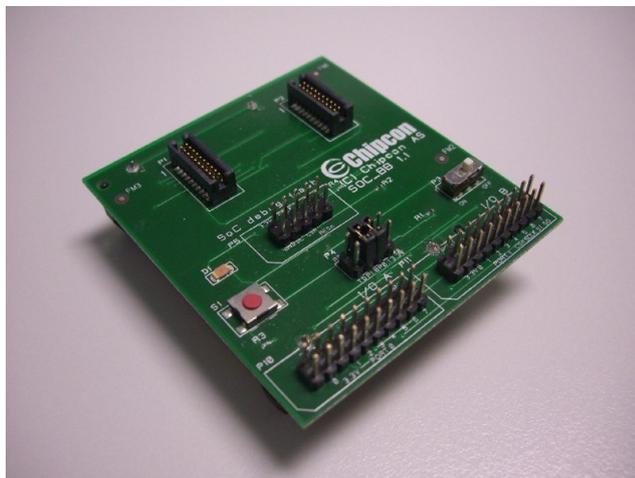


Figura 3.10: *Socket* módulo SoC_BB.

Para el transmisor se instaló el micro sobre un *socket* módulo SmartRF04EB, mucho más complejo que el anterior (Figura 3.11), que le permite conectividad con otros periféricos (en este caso, el miniPC). Este módulo dispone de diversos puertos de comunicación, conectores, conversores A/D y D/A, y un led LCD.

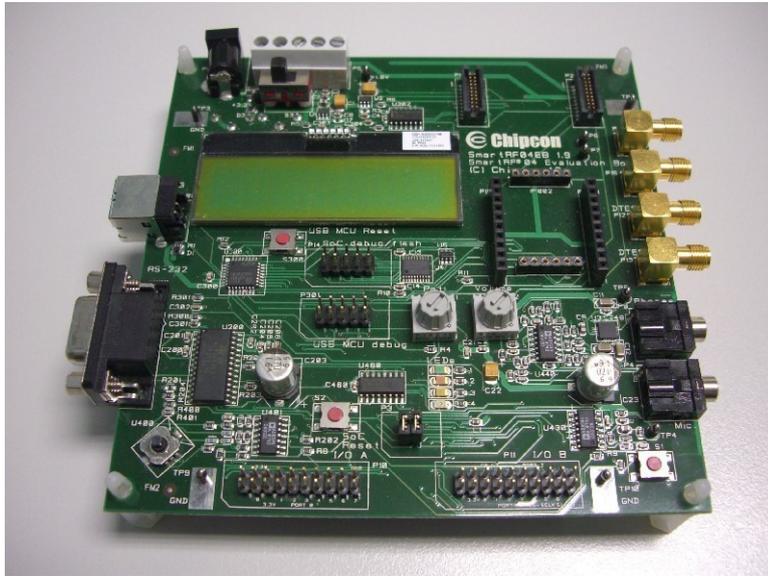


Figura 3.11: *Socket* módulo SmartRF04EB.

3.4.3. Robot Lego Mindstorm EV3

La plataforma robótica comercializada por Lego [111] se ha convertido en una de las más utilizadas en el campo educativo, gracias a su bajo coste (en comparación con otras plataformas, como por ejemplo, VEX [112]) y a la posibilidad de crear más modelos de robots simplemente ampliando el juego de piezas (Figura 3.12, tomada de [113]).

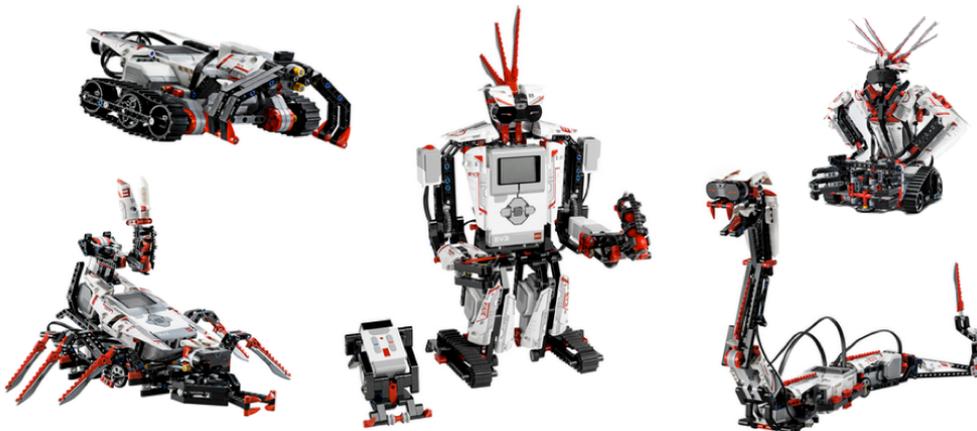


Figura 3.12: Diversos modelos de robots construidos con Lego.

El EV3 es la tercera generación del *kit* robótico de Lego (la EV por “evolution” y el 3 por ser la tercera generación) tras sus modelos RCX y NTX. Las principales diferencias con los modelos anteriores radican en el “ladrillo” programable (Figura 3.13), que incorpora un microcontrolador ARM9 sobre Linux, un conector USB y una ranura para una tarjeta Micro SD de hasta 32 GB.



Figura 3.13: El “ladrillo” del EV3.

Aunque existen distintos *kits* con más o menos componentes, para los experimentos en el escenario de la ETSE se ha utilizado el llamado “*kit* educativo” que es el que habitualmente se usa en institutos de educación para iniciar a los jóvenes en el mundo de la robótica. Este *kit* consiste en 1 “ladrillo” programable EV3, 2 motores grandes, 1 motor mediano, 2 sensores de contacto, 1 sensor de color, 1 sensor giroscópico, 1 sensor ultrasónico, cables, 1 batería recargable y multitud de piezas Lego para la construcción de los diversos modelos.

En este caso, se ha construido el modelo básico (Figura 3.14) ya que presenta mayor robustez y estabilidad para instalar la plataforma donde va montada la mota transmisora.

La comunicación con el ladrillo se puede llevar a cabo mediante infrarrojos, conexión Bluetooth, USB o WIFI. Dispone de cuatro salidas para los motores y otros dispositivos y cuatro entradas para los diferentes sensores.

Con la plataforma EV3 se han construido notables modelos como Braigo [114] un impresor de braille, el CubeStormer III [115], robot que tiene el record Guinness en la resolución del cubo de Rubik y el Lego Bookreader [116]

lector de libros digitales que incluso puede digitalizarlos.



Figura 3.14: Modelo seleccionado (foto sacada del manual de Lego).

El lenguaje de programación del ladrillo es el “NI LabVIEW for Lego Mindstorms” que es una nueva versión enfocada al ámbito educacional del LabVIEW 2012 SP1 (aunque existen otras alternativas como RobotC, EV3dev, leJOS, OpenRoberta, EV3 Basic, Scratch). En las siguientes Figuras (Figura 3.15 a Figura 3.21) se muestran los bloques de programación, que se encuentran divididos en seis apartados según su funcionalidad.

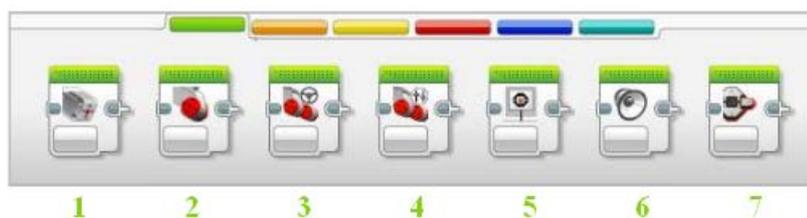


Figura 3.15: Bloques de acción: 1-4 Motores 5 Pantalla 6 Sonido 7 Luz de estado.

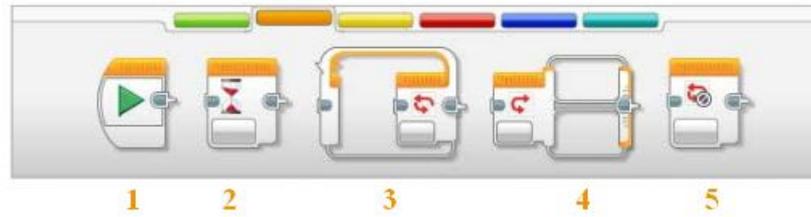


Figura 3.16: Bloques de flujo: 1 Iniciar 2 Esperar 3 Bucle 4 Interruptor 5 Interruptor de bucle.

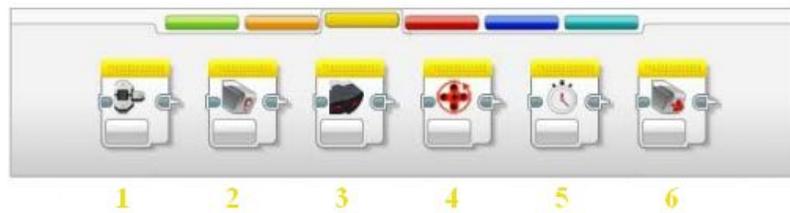


Figura 3.17: Bloque de sensores: 1 Botones bloque EV3 2 Sensor de color 3 Sensor de infrarrojo 4 Rotación del motor 5 Temporizador 6 Sensor táctil.



Figura 3.18: Bloques de datos: 1 Variable 2 Constante 3 Op. secuenciales 4 Op. lógicas 5 Matemática.



Figura 3.19: Bloques de datos: 6 Redondear 7 Comparar 8 Alcance 9 Texto 10 Aleatorio.



Figura 3.20: Bloques avanzados: 1 Acceso al archivo 2 Mandar mensaje 3 Conexión Bluetooth 4 Mantener activo 5 Valor del sensor 6 Motor sin regular 7 Invertir el motor 8 Detener programa.

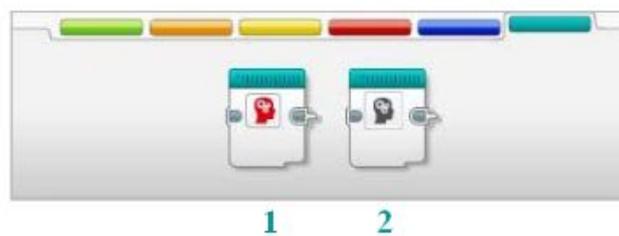


Figura 3.21: Mis bloques: 1-2 Para crear bloques propios a partir de segmentos de programa previos.

Uniendo los distintos componentes de cada bloque se crean los programas que controlan al robot. En la sección 4.4 se explica el funcionamiento del robot y su desplazamiento por el escenario elegido.

3.4.4. Plataforma Erratic-Videre

En el escenario de la UJI se utilizó la plataforma Erratic-Videre para el desplazamiento del transmisor por dicho escenario (Figura 3.22). Esta plataforma robótica dispone de dos ruedas motrices laterales y una frontal, una amplia plataforma superior donde instalar los dispositivos necesarios, sensores de ultrasonidos y una tarjeta controladora con puerto USB.



Figura 3.22: Plataforma Erratic-Videre.

3.4.5. Raspberry Pi

Este miniordenador del tamaño de una tarjeta de crédito ha sido desarrollado por la Raspberry Pi Foundation [117] para propósitos educativos y de investigación. Desde su aparición en Febrero de 2012 ha ido evolucionando con diversas revisiones y modelos, encontrándose en estos momentos en la tercera generación con el modelo Raspberry Pi Compute Module 3+ de enero de 2019. Se han construido numerosas aplicaciones prácticas con la Raspberry Pi:

- para el mundo de la seguridad en la automoción con sistemas de aviso y prevención de accidentes de vehículos [118].
- en paneles de aviso para estaciones de trenes, información de tráfico y grandes almacenes [119].
- para el seguimiento de multitudes en grandes eventos [120].
- para control de sistemas y dispositivos a distancia [121] [122] [123].

Dexter Industries [124] ha desarrollado el llamado BrickPi que es una Raspberry Pi modificada para adaptarse al robot Lego Mindstorm y actuar en lugar del “ladrillo” original.

Para la toma de datos y el control del robot se utilizó una Raspberry Pi modelo B1. Este miniordenador posee una arquitectura ARMv6 (32 bits) con una Broadcom BCM2836 SoC que incorpora un procesador ARM1176JZF-S *single core* a 700 MHz y una memoria SDRAM de 512 MB. Tiene además, dos entradas USB, entrada microUSB, entrada de vídeo para conectar una cámara, entradas/salidas de audio, conector HDMI, tarjeta SD de 8 GB, conector ethernet y un conector GPIO de 26 pines. El esquema interno se puede ver en la Figura 3.23.

La Raspberry Pi utiliza distribuciones Linux y admite diferentes herramientas y lenguajes de programación. Por ejemplo, el lenguaje de programación C, utilizado en la biblioteca WiringPI, u otros lenguajes como C#, Ruby, Java, Perl, BASIC y Python, instalando las bibliotecas y compiladores adecuados.

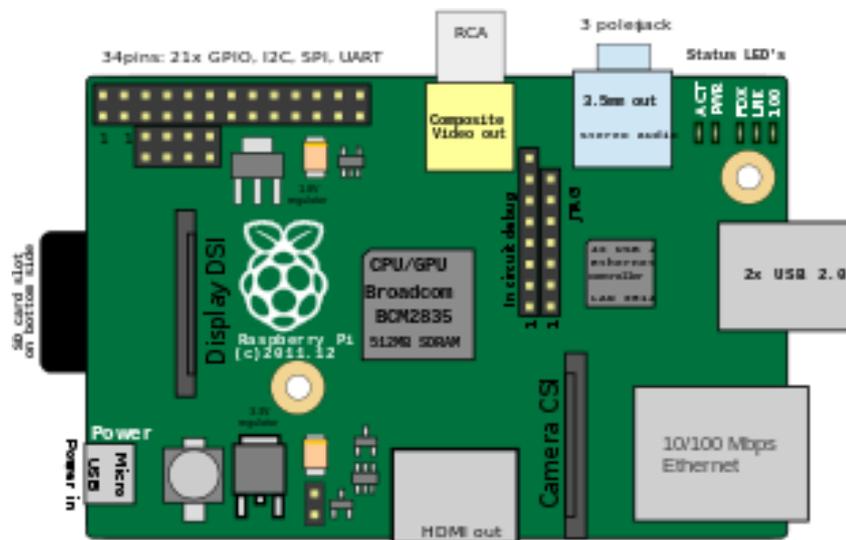


Figura 3.23: Esquema interno de la Raspberry Pi modelo B1.

3.4.6. AOpen MiniPC MP915

De modo análogo, para el escenario de la UJI, el mini-PC es el encargado de comunicar y administrar los distintos periféricos (Figura 3.24), además de actuar como controlador del sistema, almacenar la información recogida y ejecutar los cálculos para la determinación de la localización. Posee un procesador VIA de 1.2 GHz, 1Gb de memoria RAM, 40 GB de disco duro, puertos USB y sistema operativo Ubuntu 7.4.0.



Figura 3.24: AOpen MiniPC MP915.

3.4.7. Hardware auxiliar

Por último, para el escenario de la ETSE y con el fin de evitar los rebotes de la señal del transmisor con el suelo se construyó una plataforma de 1 metro de altura con cuatro varillas de madera de pino y seis cuadrados de madera de balsa espaciados a lo largo de la estructura para dar una mayor estabilidad a la estructura y que no hubiera un balanceo al frenar el robot cuando llegase al punto de medida (Figura 3.25a). En el primer piso se situó la Raspberry Pi y en el último el transmisor Crossbow's TelosB, conectados mediante un cable USB que ascendía a lo largo de la estructura de madera. Se montó toda la estructura sobre el robot Lego sujetándolo mediante gomas elásticas (Figura 3.25b).

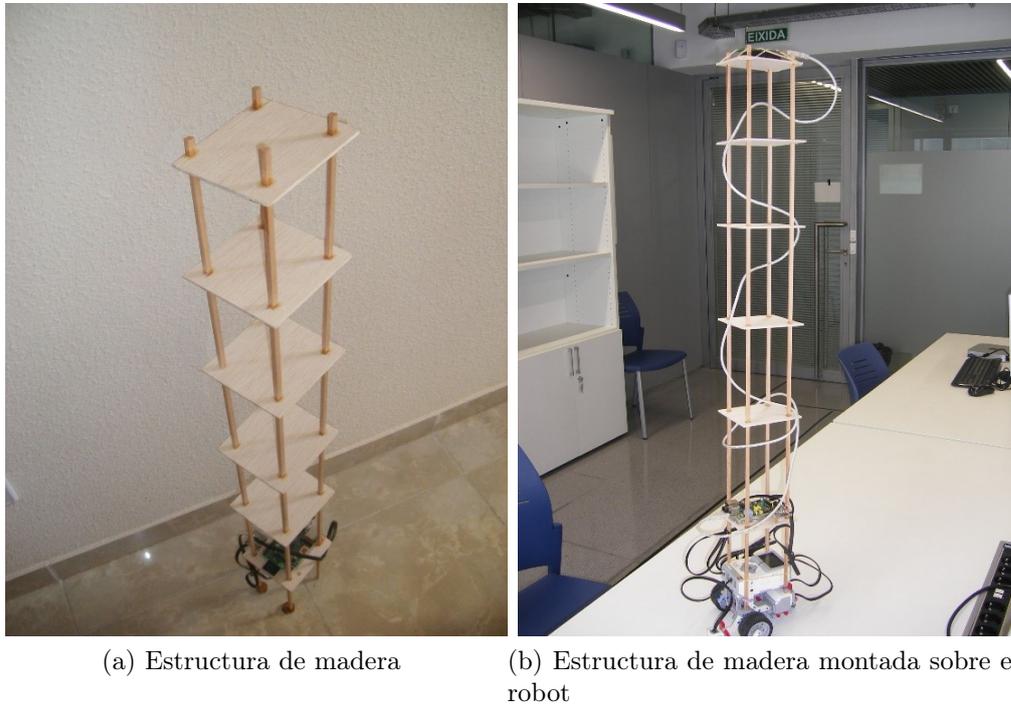


Figura 3.25: Montaje de la estructura de madera sobre el robot.

Para interconectar la Raspberry Pi con el robot Lego se hizo una pequeña placa (Figura 3.26) cuya misión era indicar a la Raspberry Pi que el robot había llegado a su posición y que podía empezar la toma de datos y, viceversa, indicar al robot que la toma de datos había finalizado y que podía avanzar hasta la siguiente posición. Para ello se utilizaron las entradas y salidas del robot y el conector GPIO de la Raspberry Pi de la siguiente manera:

- El pin 1 de la GPIO proporciona un voltaje de 3.3 voltios y el pin 5 está conectado a tierra. Asimismo, los cables de tierra de los puertos 1 y D del robot Lego están conectados al pin 5. El puerto D está conectado a los motores del robot Lego y el puerto 1 a una entrada a la que se suele conectar un pulsador o un sensor de contacto.
- El pin 8 de la GPIO está configurado como entrada y conectado al punto medio de un divisor de resistencias R_2 y R_3 de $1k\Omega$ cada una, ya que el voltaje proporcionado por el robot Lego es de unos 5 voltios y la Raspberry Pi trabaja con voltajes de 3.3 voltios. Cuando el programa implementado en el robot Lego pone su puerto D a

cero, el pin 8 se pone a nivel bajo y el programa implementado en la Raspberry Pi comienza la toma de datos. El led blanco D1 se enciende durante un segundo y luego se apaga para indicar que todo ha funcionado correctamente.

- o El pin 4 está configurado como salida y conectado a la base de un transistor Q2N2222. Cuando el programa implementado en la Raspberry Pi pone el pin 4 a uno, pone en funcionamiento el transistor y proporciona un nivel alto al puerto 1 del robot Lego. En ese momento, se pone en marcha el programa implementado en el robot Lego y avanza hasta la siguiente posición. El led rojo D2 se mantiene encendido para indicar que todo ha funcionado correctamente.

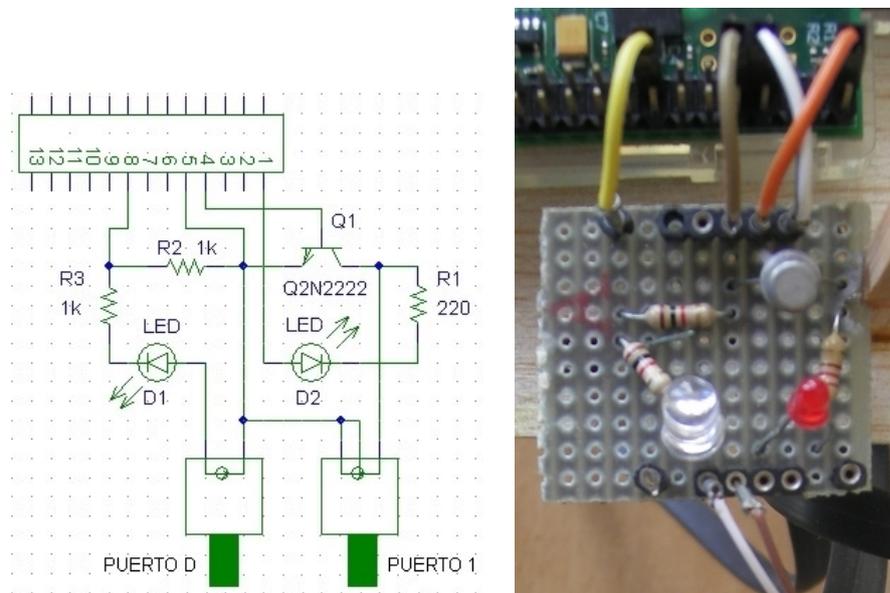


Figura 3.26: Esquema y foto de la placa de interconexión entre el robot Lego y la Raspberry Pi.

3.4.8. Portátil

Finalmente, para poner en marcha el sistema en el escenario de la ETSE se utilizó un portátil marca ASUS Eee PC con sistema operativo Windows XP y un conector USB WIFI marca Netgear y modelo WNA1000M para crear una red *ad hoc*. Desde el ordenador se conectaba vía WIFI con la Raspberry Pi y se ponía en marcha el programa de toma de datos implementado en ella.

3.4.9. Montaje final

El montaje final de todos los componentes se puede observar en la Figura 3.27).

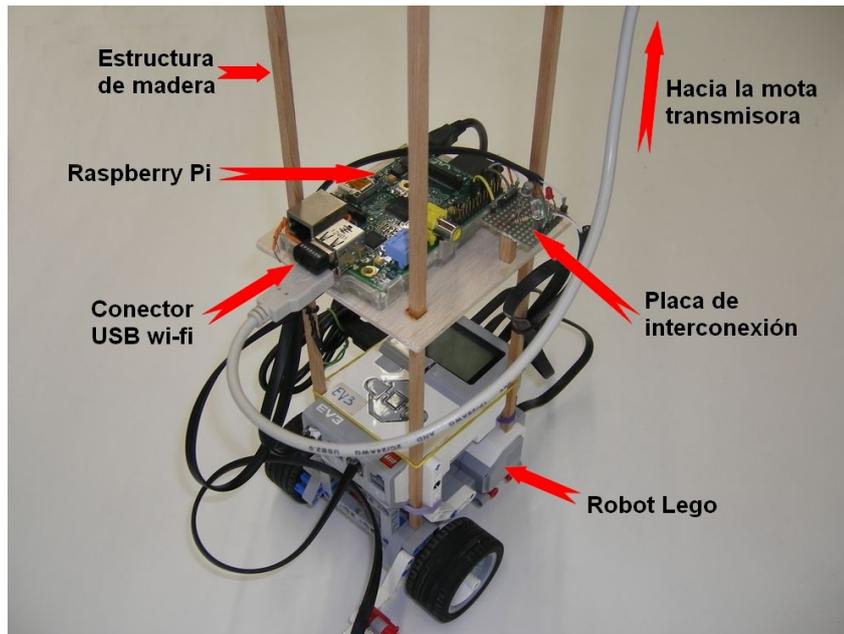


Figura 3.27: Montaje final de todos los dispositivos utilizados en el escenario de la ETSE.

La principal preocupación estaba en la estabilidad del sistema durante la etapa de movimiento del robot Lego y, sobre todo, durante los arranques y paradas en los puntos de medida. Existía la posibilidad de que el vaivén de la estructura provocara que el robot Lego volcara al arrancar o parar o al hacer los giros por el escenario. También existía la posibilidad de que al frenar y llegar al punto de medida, la estructura siguiera con un cierto vaivén y la toma de medidas se pudiera ver afectada. El peso de la estructura, más la mota, más la Raspberry Pi, más los cables que conectaban los distintos dispositivos, todo ello montado sobre el robot Lego, aunque no suponían un gran peso, también podía provocar que el robot Lego se viese ralentizado o patinase de forma irregular al hacer los giros.

A pesar de que al arrancar el movimiento del robot Lego la estructura sufría un cierto tirón y durante el tiempo que estaba avanzando mantenía

cierto vaivén, al llegar al punto de medida y detenerse el robot Lego, la estructura se estabilizaba de forma casi inmediata, con lo que la mota situada en lo alto de dicha estructura estaba totalmente quieta en el momento de empezar la toma de datos. De igual modo, el peso del conjunto no afectó de forma perceptible a los movimientos del robot Lego.

Para el escenario de la UJI, se puede ver el montaje final en la Figura 3.28. En este montaje se pueden ver algunos periféricos que no se han descrito anteriormente, como un telémetro láser, una cámara Firewire y algunos más, que se utilizaron para otros experimentos.

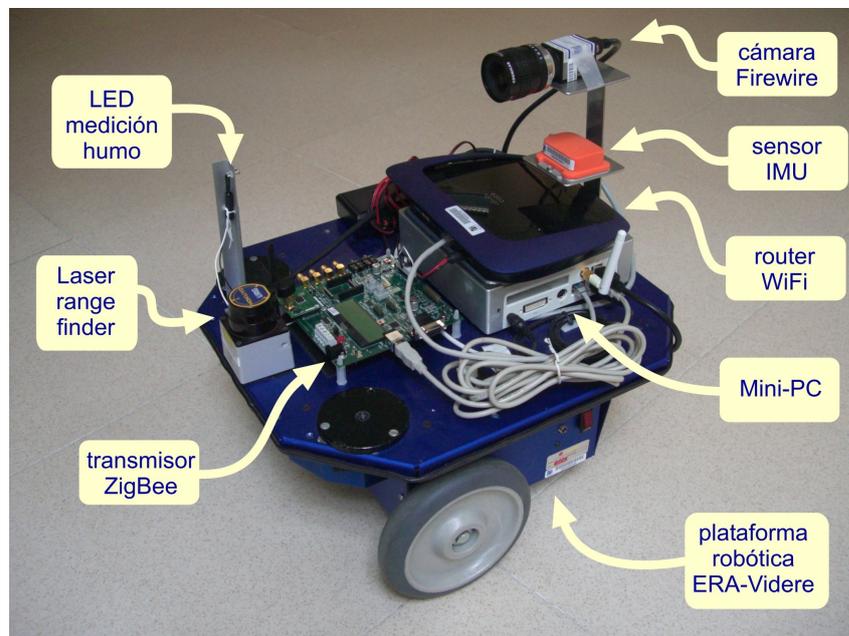


Figura 3.28: Montaje final de todos los dispositivos utilizados en el escenario de la UJI.

3.5. Conclusiones

Se han descrito en este capítulo las características de los escenarios que se han utilizado para los experimentos realizados, así como la distribución de los puntos de referencia en los mismos. La notable disparidad entre ellos, uno más abierto y con pocos obstáculos y otro más cerrado con paredes y diversos obstáculos, nos permiten comparar el comportamiento de la señal

de RF y su influencia en la precisión de la localización.

También se han descrito los distintos componentes del hardware utilizado en cada uno de los escenarios y el hardware adicional que se tuvo que construir para poder interconectar los diversos componentes en el caso del escenario de la ETSE.

Capítulo 4

Entrenamiento y localización

4.1. Introducción

Se exponen en este capítulo las fases de entrenamiento y localización en los dos escenarios descritos en el capítulo anterior. Para ello se presentan los programas que se utilizaron en la toma de datos y se explica el desplazamiento del robot por el escenario de la ETSE. Asimismo, se expone el algoritmo de localización utilizado y los resultados obtenidos para la localización en ambos escenarios.

4.2. Entrenamiento del sistema de la ETSE

La primera fase del método de localización usando *fingerprinting* consiste en realizar una primera fase de calibración, que incluye una toma de medidas que serviría como base de datos con la que comparar la segunda toma de medidas durante la fase de localización. Una de las motas TelosB se usa como transmisor y otras seis motas como balizas dispuestas como indica la Figura 3.6. En este sistema se emplean seis niveles de potencia y seis canales, indicados en las Tablas 4.1 y 4.2. Se eligió el criterio de tomar dos valores bajos, dos medios y dos altos, tanto para potencias como para canales. Se toman tres medidas por cada baliza, cada potencia, cada canal y cada uno de los 98 puntos de medida, haciendo un total de 63.504 paquetes, cada uno

de los cuales contiene tanto el nivel de RSSI con que la baliza recibió el paquete del transmisor como el nivel de RSSI con que el transmisor recibió la confirmación de la baliza.

Valor	Potencia (dBm)
10	-25
13	-18
20	-11
23	-8
30	-3
33	-1

Tabla 4.1: Valores de niveles de potencias utilizados en la toma de datos para construir la base de calibración en el escenario de la ETSE.

Canal	Frecuencia (MHz)
6	2405
7	2410
15	2435
16	2430
25	2475
26	2480

Tabla 4.2: Valores de niveles de frecuencias utilizados en la toma de datos para construir la base de calibración en el escenario de la ETSE.

Las motas TelosB trabajan bajo el sistema operativo TinyOS. Se trata de un sistema operativo diseñado específicamente para los microcontroladores que llevan los dispositivos inalámbricos de bajo consumo y enfocado a operaciones de ultra bajo consumo. TinyOS facilita la creación de aplicaciones de redes de sensores al aportar una serie de servicios y abstracciones tales como lectura de sensores, comunicación, almacenaje y *timers*. Sus aplicaciones y sistemas, así como el propio sistema operativo, están escritos en NesC (*Network Embedded Systems C*), una variante del lenguaje C. Un programa en NesC está estructurado mediante componentes, el usuario crea su propio componente ayudado a su vez de otros componentes ya creados. Dos componentes se podrán comunicar entre sí mediante una interfaz, la cual definirá una serie de métodos (*commands* y *events*) los cuales deberán ser implementados en cada componente. Así, un método podrá solicitar la ejecución de un *command* de otro componente; por otro lado, para enviar una notificación se utilizará un *event*. Todo componente está dividido en tres partes:

configuración, módulos e implementación. La configuración (*wiring*) es una declaración de las interfaces utilizadas y proporcionadas por un componente. Los módulos es la parte en la que se programarán las acciones que llevará a cabo nuestro componente. La implementación es donde se realizan las acciones de nuestro programa.

Para la programación de las motas se han usado dos programas. Para programar la mota que va montada sobre el robot Lego y que actúa como transmisor, se ha usado como punto de partida el programa *BaseStationP.nc* que se encuentra en el repositorio de la Universidad de Berkeley [125]. Este programa intercambia paquetes de radio entre el transmisor y una baliza por una determinada potencia y canal. Dicho programa se ha modificado para que permita variar el nivel de potencia y cambiar de canal y así poder hacer todas las medidas posibles.

El transmisor enviará dos paquetes (Figura 4.1). El primero utilizando la potencia 33 y el canal 26, ya que las balizas inicialmente siempre están escuchando por el canal 26. Este paquete prepara a la baliza para la respuesta haciendo que la baliza cambie al canal y al nivel de potencia deseados. Luego, el transmisor emitirá un segundo paquete por la potencia y canal fijados, recibiendo la respuesta de la baliza por dicha potencia y canal.

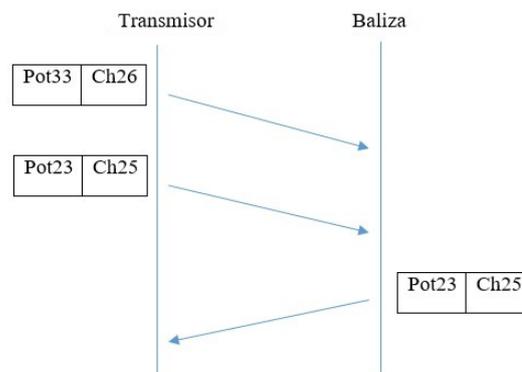


Figura 4.1: Esquema de llamada/respuesta entre transmisor y baliza.

El otro programa utilizado ha sido el llamado *Oscilloscope.nc*, también presente en el repositorio de la Universidad de Berkeley, y que se ha adaptado para que la mota que actúa como baliza responda por esa potencia y canal solicitados.

Un paquete típico tiene la siguiente estructura

```
$/serialpacket localhost 115200 0 0 5 26 33 10 0x22 0x93 23 33 0 0 23 33
1 1 0 255
```

donde

- serialpacket aplicación para el envío.
- localhost 115200 puerto de escucha - velocidad de comunicación.
- 0 formato de cabecera.
- 0 formato de cabecera.
- 5 dirección baliza.
- 26 canal por el que transmitir.
- 33 potencia con la que transmitir.
- 10 longitud.
- 0x22 tipo.
- 0x93 *handler*.
- 23 canal al que cambiar la baliza (si el canal por el que transmite y canal al que cambiar coinciden, la baliza responderá).
- 33 potencia de la respuesta de la baliza.
- 0 RSSI de la transmisión baliza->mota.
- 0 RSSI de la transmisión mota->baliza.
- 23 información canal.
- 33 información potencia.
- 1 posición x.
- 1 posición y.
- 0 contador.
- 255 contador.

Finalmente, se implementa sobre la Raspberry Pi el programa *Serial-SendPacket.c* que es parte de la librería TinyOS para gestionar la recepción de paquetes en el ordenador que hace de servidor, y mediante la librería *serialsource.h*, utiliza las funciones *read_serial_packet* y *write_serial_packet*, contenidas en esa librería, para leer y escribir los paquetes antes descritos y que permite transmitir y recibir a la mota que está instalada sobre el robot Lego directamente mediante USB. En el programa se crea un hilo que está ejecutando la función *send_packet* donde se forma el paquete a enviar y se transmite mediante el USB. El programa realiza una serie de bucles *for* anidados para ir variando las balizas, los niveles de potencia y el número del canal e ir escribiendo los paquetes. Se implementa la función *Recibir* con la que vamos leyendo los paquetes recibidos y se van imprimiendo en el fichero de salida y en la pantalla.

Para controlar el inicio y parada de la toma de medidas se hace uso de la librería *wiringPi.h* que controla los pines de la GPIO de la Raspberry Pi. Mediante las funciones *digitalWrite* y *digitalRead* se pueden activar o desactivar los pines, o bien, simplemente, leer su estado.

- *wiringPiSetup()*; activa las funciones de la librería *wiringPi*.
- *pinMode(7, OUTPUT)*; configura el pin 4 como salida conectado al puerto 1 del robot Lego.
- *digitalWrite(7,HIGH)*; pone a uno el pin 4.
- *pinMode(3, INPUT)*; configura el pin 8 como entrada.
- *digitalRead(3)*; lee el valor que haya en el pin 8, conectado al puerto D del robot Lego.

La conexión entre los pines de la GPIO y los puertos del robot Lego se realiza mediante cables RJ-12. Hubo que modificar los conectores de estos cables, ya que, por un lado, la entrada de los puertos del robot Lego tiene la pestaña de cierre a un lado, en vez de en medio como la mayoría de conectores y, por el otro, hubo que cortar el conector y conectar los distintos cables internos a la placa de interconexión, según el esquema de la Figura 3.26 del capítulo anterior.

Así pues, el funcionamiento completo es el siguiente:

- Se coloca el robot en el primer punto de medida. Se activa el robot.
- Desde el portátil, vía WIFI, se pone en marcha el programa *Serial-SendPacket* contenido en la Raspberry Pi.
- El transmisor emite por el canal 26, indicando a la baliza el canal y la potencia a las que debe cambiar, ya que las balizas están siempre escuchando por el canal 26. El transmisor emite de nuevo por el canal y potencia elegidos, recibiendo la respuesta de la baliza por dicha potencia y canal. El paquete conteniendo tanto el valor RSSI de la transmisión como de la recepción se guarda en el fichero de salida y se imprime por la pantalla del portátil.
- Se realizan todas las medidas variando las balizas, las potencias y los canales. Una vez terminado, el programa activa el puerto 1 del robot, con lo que éste se pondrá en marcha y ejecutará el programa del robot avanzando hasta el siguiente punto de medida. Al llegar a él, se detendrá y el programa del robot pondrá a cero el puerto D, con lo que el pin 8 de la Raspberry Pi detectará un cero y se pondrá de nuevo en marcha la toma de medidas.
- El proceso se repite hasta completar todos los puntos del escenario.

4.3. Entrenamiento del sistema de la UJI

Para el entrenamiento de este sistema se utiliza un microcontrolador CC2431 como transmisor y otros cuatro microcontroladores como balizas dispuestas como indica la Figura 3.7. En este sistema se emplean cuatro niveles de potencia y seis canales, indicadas en las Tablas 4.3 y 4.4, realizando cinco mediciones para cada uno de los 113 puntos de medida, lo que arroja un total de 96 mediciones por cada uno de ellos. Cada uno de estas mediciones contiene tanto el nivel de RSSI con que la baliza recibió el paquete del transmisor como el nivel de RSSI con que el transmisor recibió la confirmación de la baliza.

Cada medida requiere dos paquetes, el enviado por el transmisor y el devuelto por la baliza. El paquete enviado por el transmisor contiene cuatro campos de 1 byte cada uno. El primer campo es el comando a ejecutar por la baliza, indicando el método de localización a utilizar. El segundo campo es una combinación del canal, la potencia y la baliza, según la expresión

Valor	Potencia (dBm)
3	-25.2
19	-5.7
95	-0.4
255	0.6

Tabla 4.3: Valores de niveles de potencias utilizados en la toma de datos para construir la base de calibración en el escenario de la UJI.

Canal	Frecuencia (MHz)
11	2405
13	2415
16	2430
19	2445
22	2460
26	2480

Tabla 4.4: Valores de niveles de frecuencias utilizados en la toma de datos para construir la base de calibración en el escenario de la UJI.

$$comb = canal \cdot 6 + potencia \cdot 4 + baliza \quad (4.1)$$

donde *canal* puede tomar los valores de 0 a 5, *potencia* los valores de 0 a 3 y *baliza* los valores de 1 a 4. El tercer campo indica el orden del paquete dentro del bloque de medidas para cada combinación *comb*. El último paquete indica el número de paquetes de que consta el actual bloque de medidas.

Al recibir el paquete del transmisor, cada baliza calcula el RSSI con que fue recibido, configura su nivel de potencia según el del paquete recibido y devuelve un paquete con cuatro campos de 1 byte cada uno. Los dos primeros campos de este paquete son las coordenadas *x* e *y* de la baliza. El tercer campo indica el número de baliza y el último el valor RSSI con que recibió el paquete del transmisor.

Primeramente, se introducen las coordenadas de las balizas en el transmisor y se coloca éste en la posición de medición. El transmisor comienza el envío de paquetes a la baliza esperando confirmación por parte de ésta. En caso de no recibir la respuesta, enviará de nuevo el paquete hasta un máximo de cinco veces, asignando el valor mínimo de RSSI (-99 dBm) si finalmente

no se recibe la confirmación.

El transmisor envía al mini-PC mediante el puerto serie RS232 los paquetes con la siguiente estructura:

- Byte Valor
- 1 Coordenada x de la baliza.
- 2 Coordenada y de la baliza.
- 3 Número de la baliza.
- 4 Nivel de potencia utilizado por el transmisor.
- 5 Número de canal utilizado.
- 6 RSSI del primer paquete recibido por la baliza.
- 7 RSSI del primer paquete recibido por el transmisor.
- ...
- ...
- ...
- 14 RSSI del quinto paquete recibido por la baliza.
- 15 RSSI del quinto paquete recibido por el transmisor.
- 16 Indicador del tipo de paquete.

Este proceso se repite para cada una de las balizas hasta terminar con las posibles combinaciones de potencias y balizas para un determinado canal. En este momento, se procede al cambio de canal de todos los dispositivos y se comienza de nuevo con la toma de mediciones. Para asegurarse del cambio de canal, el transmisor envía un paquete a cada una de las balizas indicando el nuevo canal, cambia a ese canal y espera confirmación por parte de las balizas. Este paquete consta de 4 campos de 1 byte cada uno. El primer campo indica el nivel de potencia emitido (el máximo posible) y el segundo el nuevo canal por el que transmitir. Los otros dos campos están vacíos. Una

vez cambiado al nuevo canal, se repite la toma de mediciones hasta completar dicho canal.

El proceso se repite hasta completar todos los canales posibles sobre todos los puntos de medida del escenario.

4.4. Desplazamiento por el escenario de la ETSE

Para automatizar el desplazamiento de la mota transmisora por el escenario de la ETSE, se la situó sobre el robot Lego EV3 de la forma descrita en el capítulo anterior. Para trazar el recorrido que debía realizar el robot Lego por las distintas estancias se dispuso cinta adhesiva de color negro sobre el suelo del escenario (Figura 4.2), siguiendo el trazado que marca la línea roja en la Figura 3.6 del escenario.



Figura 4.2: Recorridos del robot Lego trazado con cinta adhesiva negra.

Gracias a un programa de seguimiento de línea (*Line Follower*) el robot Lego seguía el trazado marcado. Básicamente, el programa consiste en el siguiente bloque de instrucciones (Figura 4.3). En este bloque cada motor (B y C) controla la velocidad de cada una de las ruedas.

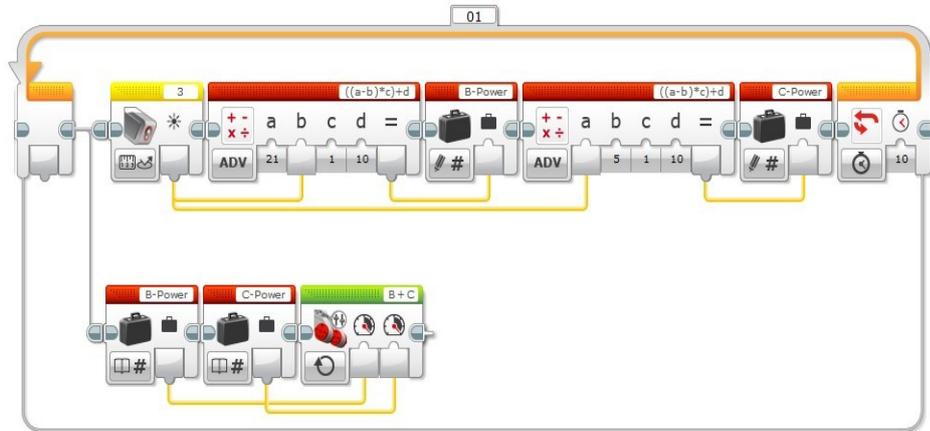


Figura 4.3: Bloque principal de instrucciones.

El sensor de color (Figura 4.4) situado en el puerto 3 del robot Lego se utiliza para seguir la línea negra. En el modo “Intensidad de la luz reflejada”, el sensor de color mide la intensidad de la luz que se refleja desde una lámpara transmisora de luz de color rojo. Esta intensidad se mide en un porcentaje de 0 a 100, siendo 0 para tonos muy oscuros y 100 para tonos muy brillantes. De este modo, se puede hacer que vaya siguiendo el borde la línea que separa el blanco del suelo del negro de la cinta adhesiva. Si aumenta ese porcentaje es que se está desviando hacia el suelo y se le indica aumente la velocidad del motor contrario lo que provoca que vuelva a seguir el borde de la cinta. Si disminuye es que se está desviando hacia la cinta y se le indica que aumente la velocidad del otro motor para volver a seguir el borde de la cinta.



Figura 4.4: Sensor de color (foto sacada del manual de Lego).

Para que el movimiento sea lo más fluido posible debe seguir la ecuación de una recta $y = mx + n$. Para ajustar la velocidad se utiliza un bloque matemático para cada motor (Figura 4.5). En la opción “avanzado” de este bloque se dispone de cuatro variables (a, b, c y d) con las que se pueden realizar operaciones aritméticas. En nuestro caso, se requiere la ecuación de una recta, por lo que se anota la fórmula $((a-b)*c)+d$, en el pequeño recuadro superior izquierda del bloque. La calibración de nuestro sensor proporciona unos valores de $a = 21$, cuando el sensor está directamente sobre el suelo del escenario, y $b = 5$, cuando el sensor está sobre la cinta adhesiva negra. Se utilizan estos valores para controlar el giro de cada uno de los dos motores. La variable $c = 1$ indica la potencia de cada motor y con la variable $d = 10$ se consigue un movimiento suave (*smooth*) y continuo del robot Lego. Se mantiene el bucle durante 10 segundos que es el tiempo que tarda en avanzar los 90 centímetros entre un punto y el siguiente.

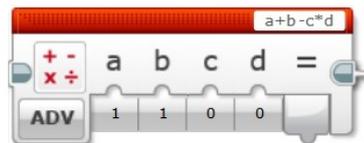


Figura 4.5: Bloque matemático.

Debido a la existencia de mobiliario y a la necesidad de mantener la equidistancia entre muebles y paredes, la distancia entre los puntos de prueba del escenario no era la misma para todos ellos. Por eso, el tiempo que el robot Lego necesitaba para su desplazamiento de un punto a otro no era siempre 10 segundos. Se necesitó un periodo de entrenamiento para ajustar los diferentes tiempos.

En el caso de que hubiera que hacer algún giro se añadía el bloque de *Giro por Rotaciones* (Figura 4.6).



Figura 4.6: Bloque de rotación.

Este bloque activa ambos motores, espera hasta que uno de ellos ha girado el número de rotaciones en la entrada *Rotaciones* (0.5 en este caso) y luego apaga ambos motores. Si en la entrada *Dirección* se pone -100 hará un giro a derechas (+100 indicaría un giro a izquierdas). En la entrada *Potencia* se pone 20 que será la velocidad de los motores. El giro del robot Lego se efectúa manteniendo apagado uno de los motores y en marcha el otro. Debido a ello, al hacer dos giros de 90° para conseguir que el robot Lego diera la vuelta, se producía un desplazamiento del mismo (Figura 4.7). Ello obliga a que, cuando el robot Lego debe volver por un camino que ya ha recorrido, se necesite una segunda línea de cinta adhesiva (Figura 4.8).

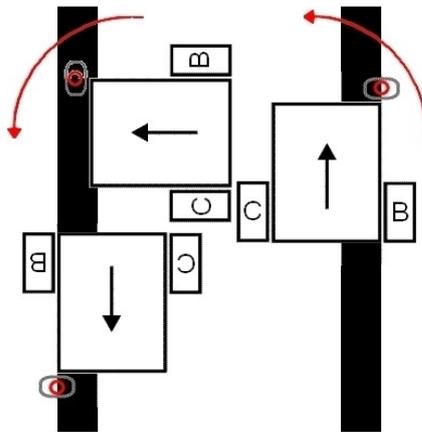


Figura 4.7: Desplazamiento del Robot al girar 180° sobre la rueda C.

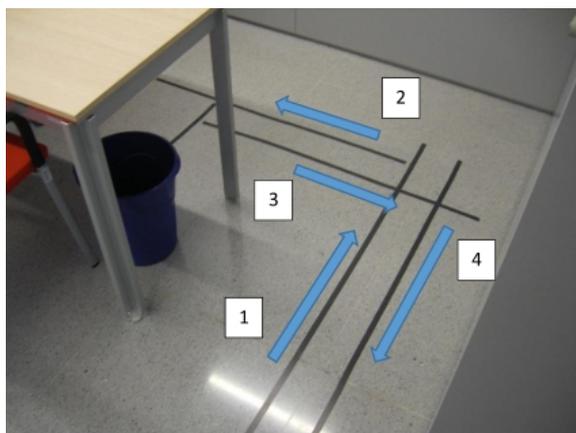


Figura 4.8: Recorridos de ida 1-2 y vuelta 3-4.

Finalmente, el robot Lego tenía que recibir las instrucciones de frenado después de llegar al punto de medida y arrancar una vez se habían realizado las medidas. Para ello se utilizó el siguiente bloque de instrucciones. (Figura 4.9)



Figura 4.9: Bloque de instrucciones de parada y arranque.

El primer bloque detiene los dos motores, luego se activa el puerto D durante un segundo y se desactiva. El último bloque mantiene al robot Lego en espera hasta la activación del puerto 1. Tanto el puerto como D como el 1 del robot están conectados al conector GPIO de la Raspberry Pi mediante cables RJ-12 según el circuito de la Figura 3.26. La desactivación del puerto D le indica a la Raspberry Pi que puede empezar el programa de toma de medidas. Cuando éste acaba, manda una señal por el puerto 1, poniendo en marcha de nuevo el programa del robot.

4.5. Algoritmo de localización

Una vez finalizada la fase de entrenamiento ya se dispone de una base de datos con la que trabajar. Durante la etapa de localización el proceso de medición se debe repetir de nuevo para cada punto sobre el que se localiza el nodo transmisor y los valores de RSSI obtenidos se comparan con todos los datos almacenados en la base de calibración. Mediante técnicas de *finger-printing* se obtienen ciertos parámetros que permitirán elegir el punto más parecido al que está situado el transmisor en la base de datos. Existen gran variedad de estas técnicas conocidas como algoritmos de clasificación supervisada. El más conocido de ellos es el método *k*-vecinos (KNNSS, *k*-Nearest Neighbor in Signal Space).

En este método un objeto es clasificado dentro de un conjunto en función del mayor número de elementos que se encuentren a cierta distancia a él.

Es decir, dados una base de registros $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ y un conjunto de clases $C = c_1, c_2, \dots, c_m$, el problema de la clasificación es encontrar una función $f : X \rightarrow C$ tal que cada x_i es asignada a una clase c_j . Estos casos clasificados crean una base de datos con la que comparar un nuevo caso no clasificado. El pseudocódigo del algoritmo vendría dado por

INICIO

Entrada: Casos ya clasificados $D = (x_1, c_1), (x_2, c_2), \dots, (x_n, c_n)$

nuevo objeto $r = (r_1, r_2, \dots, r_n)$

Para todos los objetos ya clasificados (x_i, c_i)

calcular la distancia $d_i = d(x_i, r)$

Ordenar d_i en orden ascendente

Seleccionar los K casos D con distancia menor a r

Asignar r a la clase más frecuente en D

FINAL

Dado que este método es uno de los más eficaces y fáciles de implementar, se ha utilizado en multitud de artículos con diferentes variantes, como se vio en la sección 2.4. De los métodos conocidos se eligió para esta tesis el implementado en [126]. En este método en particular se utilizan dos parámetros llamados “coincidencias” y “diferencia”, donde el primero es una estimación de la similitud entre los elementos a comparar y viene dado por la siguiente expresión

$$\begin{aligned} \text{coincidencias} = \{ & |SSB(b, p, c) - MSB(b, p, c)| < re \} \cdot f_{pb} + \\ & \underbrace{(b=1, p=1, c=1)} \\ & \{ |SST(b, p, c) - MST(b, p, c)| < re \} \cdot f_{pt} \end{aligned} \quad (4.2)$$

mientras que el segundo parámetro calcula la diferencia simple entre valores

$$\begin{aligned} \text{diferencia} = \{ & |SSB(b, p, c) - MSB(b, p, c)| \} \cdot f_{pb} + \\ & \underbrace{(b=1, p=1, c=1)} \\ & \{ |SST(b, p, c) - MST(b, p, c)| \} \cdot f_{pt} \end{aligned} \quad (4.3)$$

donde:

- b - Identificador de la baliza (1...6).
- p - Identificador del nivel de potencia (1...6).
- c - Identificador del canal (1...6).
- SSB - Valor almacenado de la intensidad de señal recibida por la baliza.
- MSB - Valor medido de la intensidad de señal recibida por la baliza.
- SST - Valor almacenado de la intensidad de señal recibida por el transmisor.
- MST - Valor medido de la intensidad de señal recibida por el transmisor.
- re - Radio de equivalencia.
- fpb - Factor de peso para las mediciones recibidas por las balizas.
- fpt - Factor de peso para las mediciones recibidas por el transmisor.
- la condición $A < B$ se evalúa como cierta si es "0" y como falsa si es "1".

Para comparar los resultados entre un candidato u otro se introducen una serie de parámetros auxiliares que calculan las relaciones de diferencias y coincidencias entre ambos, así como una serie de parámetros umbrales que establecen los límites de decisión. Con todo esto, se obtiene un listado con los ocho mejores aspirantes. En base a unos parámetros umbrales más restrictivos, si hay algún aspirante que supera en gran medida a los demás, éste es el elegido. En caso contrario, se elegirá aquel aspirante que posea un mayor número de vecinos utilizando la distancia euclídea.

4.6. Resultados

Tras la fase de calibración se realizó la toma de datos propiamente dicha en el escenario de la ETSE. De nuevo, se tomaron tres medidas por cada baliza, cada potencia, cada canal y cada uno de los 98 puntos de medida,

haciendo un total de 63.504 paquetes, cada uno de los cuales contiene tanto el nivel de RSSI con que la baliza recibió el paquete del transmisor como el nivel de RSSI con que el transmisor recibió la confirmación de la baliza. Posteriormente, se calcula la media de los tres valores medidos tanto en la fase de calibración como en la fase de localización, y se realizan los cálculos con esta media.

Se aplicó el algoritmo k -vecinos modificado expuesto anteriormente para obtener el mejor candidato para cada punto de medida. En la Tabla 4.5 se exponen, de manera resumida, el error promedio en metros obtenido para cada punto, tanto para el método expuesto como para el método de k -vecinos original.

Punto de medida	k -vecinos original	k -vecinos modificado
Punto 1	3.00 m	0.90 m
Punto 2	0.00 m	0.00 m
...
...
...
...
...
...
Punto 97	9.49 m	2.85 m
Punto 98	8.00 m	2.40 m
Error promedio	1.59 m	0.99 m
Desviación estándar	1.59 m	1.16 m

Tabla 4.5: Resultados del error promedio en metros para el algoritmo de k -vecinos original y el algoritmo de k -vecinos modificado para el escenario ETSE.

Como se puede observar en la Tabla 4.5, el error promedio obtenido para el método de k -vecinos original es de 1.59 metros y para el método utilizado es de 0.99 metros, lo que indica el buen funcionamiento de dicho algoritmo en este caso.

Además, en la Figura 4.10 se muestra el porcentaje de puntos de prueba que producen un error de localización que es inferior a un cierto valor. El resultado principal de este gráfico es que el 89% de los puntos de prueba

producen un error inferior a 2 metros y sólo un 2% de los puntos de prueba se localizan con un error superior a 4 metros.

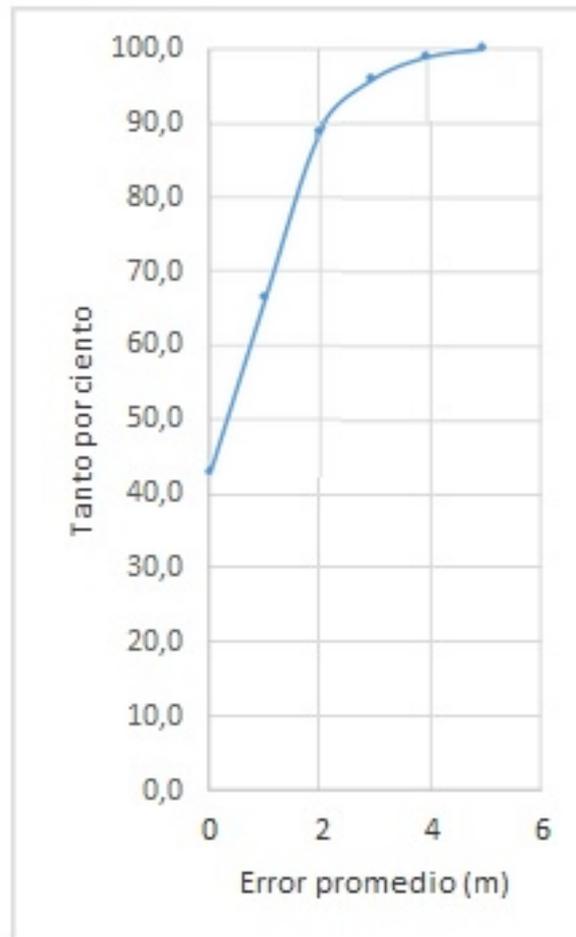


Figura 4.10: Porcentaje de puntos de medida que producen un error de localización inferior a cierto valor.

Los resultados demuestran que las técnicas de *fingerprinting*, más un algoritmo de localización adecuado, proporcionan unos valores de precisión suficientes para la localización en interiores.

Análogamente, en el escenario de la UJI, se aplicó el algoritmo *k*-vecinos modificado anteriormente para obtener el mejor candidato para cada punto de medida. Igualmente, se calcula la media de los cinco valores medidos tanto en la fase de calibración como en la fase de localización, y se realizan

los cálculos con esta media.

En la Tabla 4.6 se exponen, de manera resumida, el error en metros obtenido para cada punto, tanto para el método expuesto como para el método de k -vecinos original.

Punto de medida	k -vecinos original	k -vecinos modificado
Punto 1	5.00 m	3.00 m
Punto 2	5.00 m	2.00 m
...
...
...
...
...
...
Punto 121	1.00 m	2.24 m
Punto 122	4.00 m	5.00 m
Error promedio	2.59 m	2.02 m
Desviación estándar	2.59 m	1.88 m

Tabla 4.6: Resultados del error promedio en metros para el algoritmo de k -vecinos original y el algoritmo de k -vecinos modificado para el escenario UJI.

De igual modo que en el escenario de la ETSE, el algoritmo modificado demuestra su buen funcionamiento, mejorando la precisión de la localización.

4.7. Conclusiones

Sobre ambos escenarios se ha realizado un despliegue de dispositivos Zig-Bee para cubrir las áreas a medir, que hacían uso de diversos niveles de potencia y diferentes canales de frecuencia que se han detallado en este capítulo. En ambos escenarios se ha aplicado la técnica de *fingerprinting* para mediciones de RSSI y se han presentado los programas implementados en la toma de datos. También se ha explicado el desplazamiento de la plataforma robótica sobre el escenario de la ETSE.

Asimismo, se ha descrito una variante del algoritmo de k -vecinos utilizado

para la localización en los escenarios. Los resultados obtenidos muestran el buen funcionamiento del algoritmo de localización frente al método del k -vecinos original. La mayor precisión en el escenario de la ETSE puede ser debida a un mayor número de balizas, lo que implica un mayor número de medidas, con el correspondiente aumento de tiempo y coste en la construcción de la base de datos. La mejor disposición de dichas balizas, que cubren la zona a medir de manera más amplia, también influye en una mayor precisión en el sistema.

Capítulo 5

Técnicas de reducción de medidas

5.1. Introducción

Los métodos de localización analíticos basados en la intensidad de señal recibida (RSSI) utilizan técnicas de *fingerprinting* para mejorar la precisión de la localización. Ello implica una fase inicial de entrenamiento para tomar medidas de RSSI en algunas localizaciones seleccionadas en el área considerada para crear una base de datos de calibración. Estas muestras de RSSI se utilizan en la fase de localización para calcular la posición real del nodo. Para este propósito, se utilizan diversas técnicas para comparar las medidas tomadas durante la fase de localización con los valores almacenados en la base de datos durante la fase de calibración.

Sin embargo, los métodos de *fingerprinting* tienen algunos inconvenientes debido a que la construcción inicial de la base de datos necesita una cantidad considerable de tiempo, y en caso de modificaciones, es necesario reconstruir la misma. Además, durante la fase de localización, los algoritmos involucrados necesitan una considerable cantidad de datos, grandes cantidades de memoria y recursos de computación para llevar a cabo la estimación de la localización en tiempo real. Hay algunos algoritmos que modifican el método de *fingerprinting* utilizando técnicas probabilísticas, algoritmos de reconocimiento de patrones, filtros espaciales, la diversidad de potencias de la señal y canales, diferente número de balizas, etc., para mejorar la precisión de la localización.

En este capítulo se realiza un estudio de diferentes maneras de reducir la base de calibración, es decir, el número de medidas tomadas en la fase de entrenamiento, y el efecto que tienen en la precisión de la localización. Para ello, se analizan el número de potencias y/o canales, estudiando aquellas combinaciones de las mismas más significativas y observándose su influencia en la precisión.

5.2. Propuesta de reducción

Uno de los principales inconvenientes de las técnicas de *fingerprinting* es la necesidad de la elaboración de una base de datos. Generalmente, esta base de datos consiste en establecer en el escenario una serie de puntos de localización. Para cada uno de estos puntos se toman varios valores de RSSI para diversas potencias y canales desde una o más balizas. Por ejemplo, en el escenario cerrado de la ETSE con unas dimensiones de 15.65 m x 9 m y con 98 puntos de localización se utilizan seis motas como balizas, empleando seis niveles de potencia y seis canales, y tomando tres medidas por cada baliza, cada potencia, cada canal y cada punto, haciendo un total de 63.504 paquetes que contienen las medidas RSSI.

En general, cuanto más grande sea la base de datos, mayor será la precisión de la localización, debido a que se tiene un mayor número de posibilidades con las que comparar la medida. Pero esta base de datos exige una considerable cantidad de tiempo en ser elaborada y una gran cantidad de memoria para almacenarla, y en caso de que el escenario se vea alterado, es necesario volver a construirla. Asimismo, durante su construcción, el paso de personas o cambios en el mobiliario, puede alterar los valores de las medidas.

Existen diferentes maneras de reducir esta base de datos. La más sencilla sería reducir el número de puntos de localización de la rejilla de *fingerprinting*, ampliando la distancia entre los puntos de la rejilla o tomando medidas sólo en puntos alternados de ésta. Al aumentar esta distancia o al eliminar puntos de la rejilla, dependiendo del escenario elegido, la precisión de la localización puede disminuir de manera apreciable. Se pretende reducir la base de datos perdiendo la menor precisión posible. Para solventar este problema, se pueden usar técnicas de interpolación para “rellenar” los huecos dejados. Este planteamiento se describe en el próximo capítulo.

Otra manera de reducir la base de datos es tomar menos valores de medidas en cada punto. Para ello se ha realizado un estudio de la influencia de las potencias y los canales, observando si existe alguna potencia o combinación de potencias que mantenga la precisión dentro de cierto margen. Igualmente, se estudia el efecto de los canales para ver si existe alguno que proporcione una información más precisa o, al contrario, sólo aporte información superflua.

5.3. Estudio de potencias y canales

Aunque la mayoría de los sistemas de localización que utilizan técnicas de *fingerprinting* por lo general sólo hacen uso de una frecuencia y de una o unas pocas potencias (tanto para la fase de calibración como para la fase de localización), los dispositivos ZigBee permiten una variada selección en cuanto a niveles de potencia y canales, lo que permite ampliar de una manera considerable el número de valores de RSSI para cada punto de medida del escenario, y así conseguir una mayor precisión en la localización.

Partiendo de la precisión lograda con todos los niveles de potencia y todos los canales, se puede realizar un estudio de las distintas potencias y canales, para intentar encontrar si hay alguna potencia, o combinación de potencias, o algún canal, o combinación de canales, que proporcione una mayor precisión que las demás.

5.3.1. Una potencia y un canal

5.3.1.1. Escenario de la ETSE

Como se expuso en la sección cap4:section:Resultados, para el escenario de la ETSE se obtuvo un error promedio de localización utilizando todas las potencias y todos los canales de 0.99 metros.

Se analiza en esta apartado los errores promedio obtenidos para cada potencia y canal, los cuales se muestran en la Tabla 5.1 y su versión gráfica en la Figura 5.1. La notación P10 indica la potencia 10 y la notación Ch6

indica el canal 6, y así sucesivamente. El error promedio viene dado en metros. Los valores de los niveles de potencia y frecuencia pueden verse en las Tablas 4.1 y 4.2.

	Ch6	Ch7	Ch15	Ch16	Ch24	Ch25
P10	7.69	7.55	7.02	5.48	5.56	3.55
P13	4.7	5.17	3.88	3.28	3.89	2.5
P20	2.94	2.44	2.63	2.77	2.8	2.64
P23	3.42	2.97	2.72	2.72	3.24	3.07
P30	2.75	2.62	2.31	2.78	3.07	2.92
P33	2.63	2.52	2.48	2.83	2.87	3.02

Tabla 5.1: Error promedio en metros para cada potencia y canal para el escenario de la ETSE.

El menor error promedio se obtiene para la combinación de la potencia 30 y el canal 15, siendo éste de 2.31 metros. La elección de una sola potencia y un solo canal reduce la base de calibración de manera considerable, pero a costa de un incremento en el error de la precisión de la localización. Se puede observar que para las potencias más bajas (P10 y P13) el error promedio es más alto para cualquier canal y también es más alta la desviación del error promedio entre canales para dichas potencias. A partir de la potencia 20 la diferencia del error promedio entre canales se mantiene dentro de un rango menor.

Inicialmente, ello indica que, para el escenario de la ETSE, las potencias medias y altas presentan un mejor comportamiento que las potencias bajas. Este mejor comportamiento puede ser debido a la existencia de paredes que separan las diversas estancias del escenario de la ETSE, que provocan que las señales de las potencias bajas no alcancen su destino.

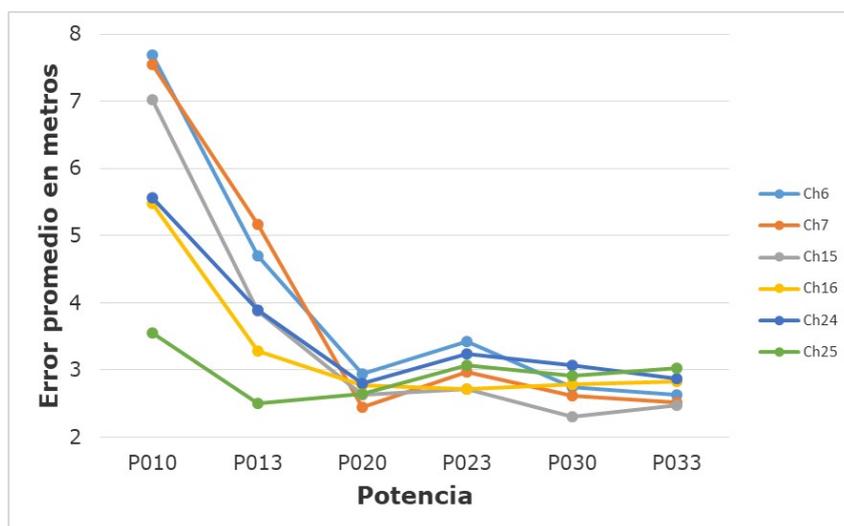


Figura 5.1: Error promedio en metros para cada potencia y canal para el escenario de la ETSE.

De igual modo, la Figura 5.1 muestra que, para las potencias medias y altas, la elección del canal mantiene la precisión de la localización dentro de cierto rango, con lo que la elección del canal no influye de manera tan destacada en la precisión de la localización.

5.3.1.2. Escenario de la UJI

En este escenario se obtiene un error promedio de la localización con todas las potencias y canales de 2.02 metros utilizando el algoritmo expuesto en la sección cap4:section:Algoritmo de localización. Partiendo de esta precisión, se estudia cada potencia y canal por separado, obteniéndose la Tabla 5.2 y la Figura 5.2, para observar si existe alguna que proporcione una mayor precisión que las demás. Se mantiene la misma notación para indicar las potencias y canales que para el escenario de la ETSE. Los valores de los niveles de potencia y frecuencia pueden verse en las Tablas 4.3 y 4.4.

Como se puede observar en la Figura 5.2, el menor error promedio se obtiene para la combinación de la potencia 255 y el canal 13, siendo éste de 2.98 metros. La potencia 95 y el canal 11 también proporcionan un error prácticamente igual (3.07 metros).

	Ch11	Ch13	Ch16	Ch19	Ch22	Ch26
P3	3.16	3.57	3.29	3.82	3.45	4.74
P19	3.16	3.63	3.19	3.63	3.65	3.65
P95	3.07	3.71	3.54	3.49	3.53	3.47
P255	3.32	2.98	3.38	3.69	3.69	4.14

Tabla 5.2: Error promedio en metros para cada potencia y canal para el escenario de la UJI.

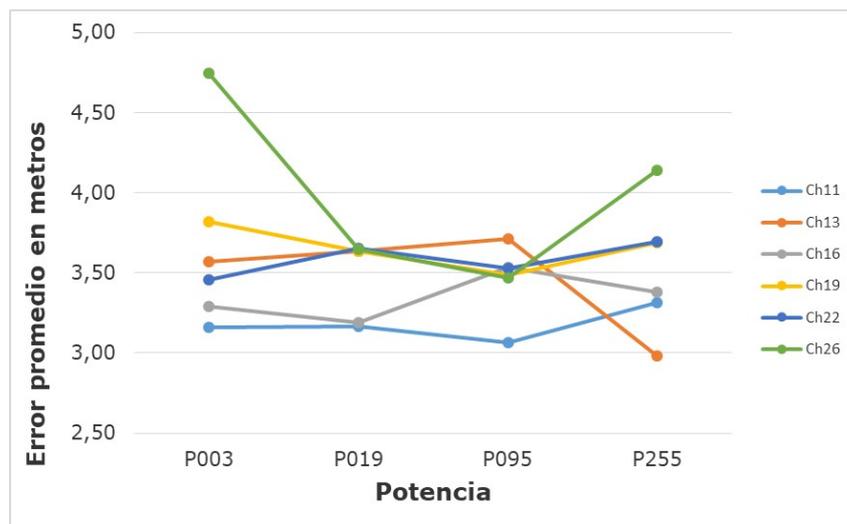


Figura 5.2: Error promedio en metros para cada potencia y canal para el escenario de la UJI.

Se observa que en el escenario de la UJI existe bastante desviación de unos canales a otros pero en casi todos los casos el canal más bajo, el Ch11, proporciona un error promedio menor.

5.3.2. Estudio del efecto del número de canales

5.3.2.1. Escenario de la ETSE

Ahora, partiendo de cada potencia, se van añadiendo canales de uno en uno, obteniéndose la Tabla 5.3 y la Figura 5.3. Igual que antes, la notación P10 indica la potencia 10 y Ch6 indica el canal 6, mientras que la notación Ch6-7 indica que se toman los canales 6 y 7, y así sucesivamente. El error promedio viene dado en metros.

	Ch6	Ch6-7	Ch6-7-15	Ch6-7-15-16	Ch6-7-15-16-24	Ch6-7-15-16-24-25
P010	7.69	7.96	7.73	7.22	5.85	3.48
P013	4.7	4.47	3.82	2.41	2.11	1.87
P020	2.94	2.45	1.95	1.83	1.72	1.62
P023	3.42	2.81	2.28	2.14	1.85	1.93
P030	2.75	2.37	2.05	1.65	1.88	1.71
P033	2.63	2.5	2.11	2	1.85	1.71

Tabla 5.3: Error promedio en metros para cada potencia a medida que se añaden canales para el escenarios de la ETSE.

Como se puede observar en la Figura 5.3, el menor error promedio se obtiene para la combinación de la potencia 20 y los canales 6-7-15-16-24-25, siendo éste de 1.62 metros. Sin embargo, para la combinación de la potencia 30 y los canales 6-7-15-16 el error promedio es de 1.65 metros, lo que indica que con dos canales menos se puede obtener prácticamente la misma precisión.

Destaca de manera especial la potencia más baja (P10), que proporciona un error mayor en comparación con las demás para cualquier número de canales.

Se observa en este caso que las potencias medias y altas vuelven a proporcionar una mayor precisión y que la adición de canales supone una mejora en la precisión de la localización, aunque a partir de 4 canales dicha mejora no es tan notable.

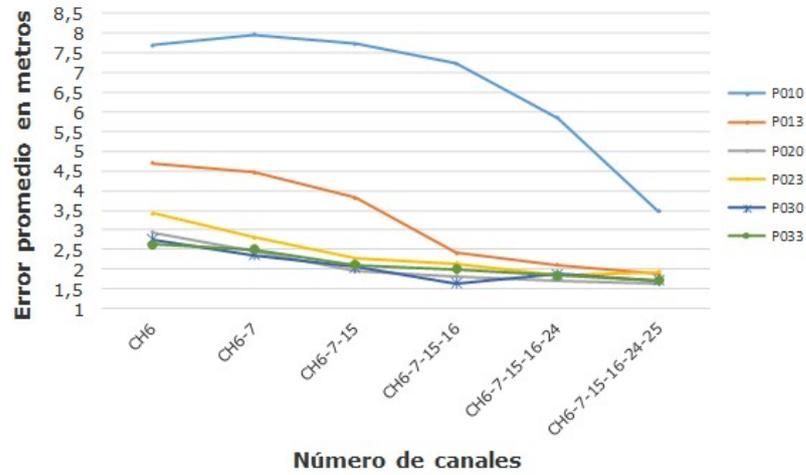


Figura 5.3: Error promedio en metros para cada potencia a medida que se añaden canales para el escenario de la ETSE.

5.3.2.2. Escenario de la UJI

Partiendo de cada una de las potencias, se van añadiendo canales de uno en uno, obteniéndose la Tabla 5.4 y la Figura 5.4. Se mantiene la misma notación que en la sección anterior. El error promedio viene dado en metros.

	Ch11	Ch11-13	Ch11-13-16	Ch11-13-16-19	Ch11-13-16-19-22	Ch11-13-16-19-22-26
P3	3.16	2.75	2.71	2.58	2.41	2.08
P19	3.17	2.96	2.61	2.62	2.49	2.21
P95	3.07	2.58	2.63	2.27	2.19	2.09
P255	3.32	2.60	2.47	2.18	2.31	2.19

Tabla 5.4: Error promedio en metros para cada potencia a medida que se añaden canales para el escenario de la UJI.

Como se puede observar en la Figura 5.4, el menor error promedio se obtiene para la combinación de la potencia 3 y los canales 11-13-16-19-22-26, siendo éste de 2.08 metros. Aunque La potencia 95 y los canales 11-13-16-19-22-26 también proporcionan un error prácticamente igual (2.09 metros).

Se observa que al ir añadiendo canales el error promedio disminuye de forma constante y se aproxima al error con todas las potencias y canales.

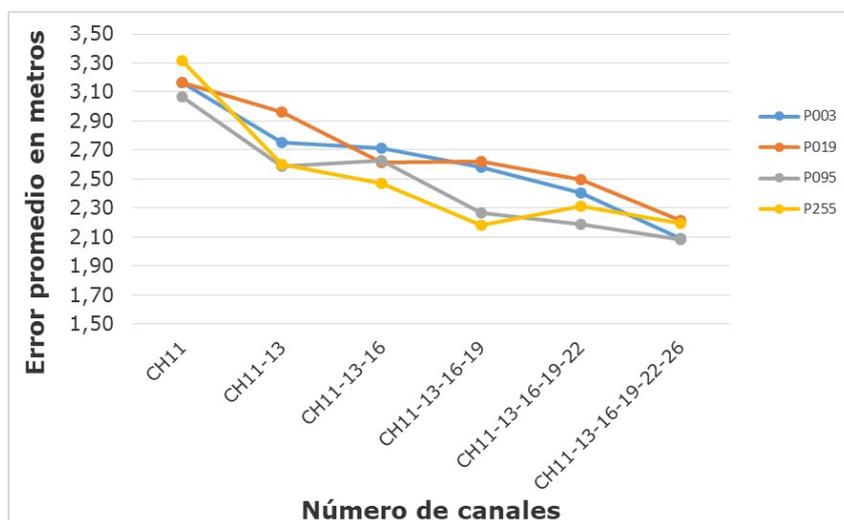


Figura 5.4: Error promedio en metros para cada potencia a medida que se añaden canales para el escenario de la UJI

Esto puede indicar que en este escenario de la UJI la adición de canales sí que ayuda a mejorar la precisión de la localización.

También se observa que con la combinación de una sola potencia y todos los canales se obtiene un error promedio igual, o incluso ligeramente menor, a la precisión inicial con todas las potencias y todos los canales.

5.3.3. Estudio del efecto del número de potencias

5.3.3.1. Escenario de la ETSE

Si en el apartado anterior observamos la influencia de añadir canales a una potencia dada, en este apartado estudiamos el efecto de añadir potencias a un canal dado. Partimos de las potencias más altas ya que fueron las que proporcionaron un menor error.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.5 y la Figura 5.5. Igual que en los apartados anteriores, la notación Ch6 indica el canal 6, y la notación P33-30 indica que se toman las potencias 33 y 30, y así sucesivamente. El error promedio viene dado en metros.

	Ch6	Ch7	Ch15	Ch16	Ch24	Ch25
P33	2.63	2.52	2.48	2.83	2.87	3.02
P33-30	2.58	2.37	2.4	2.48	2.77	2.63
P33-30-23	2.51	2.43	2.31	2.36	3.02	2.69
P33-30-23-20	2.51	2.43	2.23	2.32	2.70	2.69
P33-30-23-20-13	2.43	2.23	2.17	2.53	2.66	2.48
P33-30-23-20-13-10	2.62	2.11	2.24	2.53	2.59	2.48

Tabla 5.5: Error promedio en metros para cada canal a medida que se añaden potencias para el escenario de la ETSE.

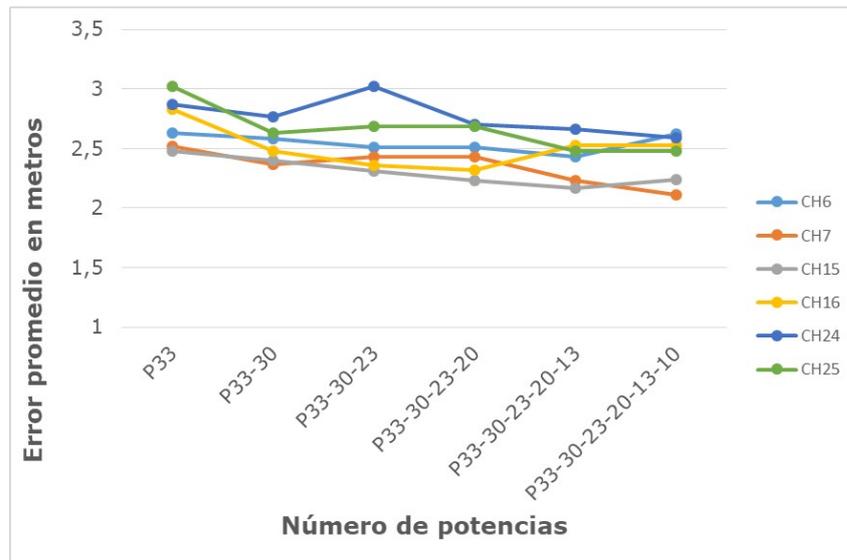


Figura 5.5: Error promedio en metros para cada canal a medida que se añaden potencias para el escenario de la ETSE.

Como se puede observar en la Figura 5.5, el menor error promedio se obtiene para la combinación del canal 7 y las potencias 33-30-23-20-13-10, siendo éste de 2.11 metros. Sin embargo, para la combinación del canal 15 y las potencias 33-30-23-20-13 el error promedio es de 2.17 metros, lo que indica que con una potencia menos se puede obtener prácticamente la misma precisión.

Se puede observar que finalmente añadir potencias a un canal dado disminuye el error por norma general, aunque no de manera tan apreciable y constante como cuando se añaden canales a una potencia dada.

5.3.3.2. Escenario de la UJI

Análogamente, observamos en este apartado el efecto de ir añadiendo potencias a un canal inicial. Igualmente, partimos de las potencias más bajas ya que nos proporcionaron un error menor en la precisión y una dispersión menor en función del canal (Tabla 5.6).

	Ch11	Ch13	Ch16	Ch19	Ch22	Ch26
P3	3.16	3.57	3.29	3.82	3.45	4.74
P3-19	3.23	3.69	3.25	3.83	3.21	4.11
P3-19-95	3.15	3.43	2.98	3.72	3.53	3.60
P3-19-95-255	2.90	3.35	2.87	3.64	3.66	3.27

Tabla 5.6: Error promedio en metros para cada canal a medida que se añaden potencias para el escenario de la UJI.

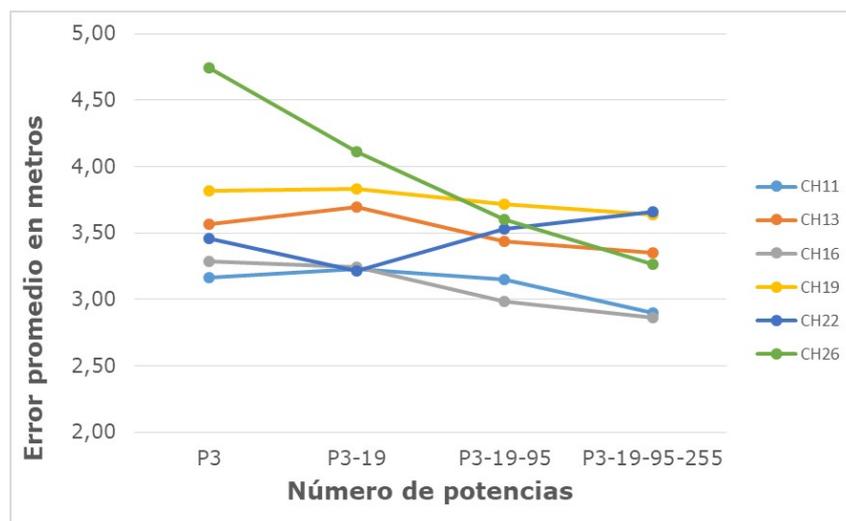


Figura 5.6: Error promedio en metros para cada canal a medida que se añaden potencias para el escenario de la UJI.

Como se puede observar en la Figura 5.6, el menor error promedio se obtiene para la combinación de las potencias 3-19-95-255 y el canal 16, siendo éste de 2.87 metros. Aunque las potencias 3-19-95-255 y el canal 11, también proporcionan un error prácticamente igual (2.90 metros). Salvo para el canal 26, la adición de potencias no mejora de manera destacable el error promedio. Esto junto con la gráfica anterior puede indicar que en este escenario de la UJI el uso de más potencias no ayuda a la precisión de la localización.

5.3.4. Estudio del efecto del número de balizas

Al margen de la reducción de canales y potencias, otra prueba que se realizó fue la reducción del número de balizas. En el escenario de la ETSE se desplegaron 6 balizas que cubrían las diferentes estancias: Una en cada uno de los despachos, una en el pasillo y otras dos en las esquinas del laboratorio. Una de las balizas del laboratorio se colocó en el mismo extremo que la baliza del pasillo en vez de en el extremo opuesto para observar el efecto al eliminar una de esas balizas.

La Tabla 5.7 muestra los errores promedios obtenidos al suprimir una o varias de las seis balizas iniciales.

Nº de balizas		Error promedio (m)
6		0.99
5	Se retira la baliza 2 (despacho central)	1.50
5	Se retira la baliza 6 (pasillo)	1.49
4	Se retiran las balizas 2 y 6	1.56
3	Se retiran las balizas 2, 6 y 5 (laboratorio, la más cercana al pasillo)	2.05

Tabla 5.7: Error promedio en metros según el número de balizas utilizadas para el escenario de la ETSE.

La retirada de una o dos balizas supone un incremento del 50 % en el error promedio. La retirada de una tercera baliza provoca que se duplique el error promedio. Podría esperarse, dado que las balizas 5 y 6 están relativamente

próximas, que al retirar la baliza 6 del pasillo, sus medidas fueran cubiertas por la baliza 5 y el error promedio no aumentase significativamente. Sin embargo, el error promedio aumenta un 50 %, del mismo modo que si retiramos la baliza 2 del despacho.

5.4. Propuestas alternativas

Por último, se realizaron dos últimos experimentos para el escenario de la UJI. Se propone una variación del algoritmo utilizado en la localización con el objetivo de reducir la complejidad de la base de datos y el tiempo de computación disminuyendo el número de niveles de potencia y canales de frecuencia utilizados en la ubicación.

Utilizando el mismo escenario experimental con todos los puntos de medida y con los ocho candidatos dados por el algoritmo solamente para el nivel de potencia más bajo (P3) y partiendo del canal Ch11, que proporcionaba el menor error para dicho nivel de potencia, se utilizan los dos canales siguientes (Ch13 y Ch16), aplicando las siguientes condiciones:

- (a) Si los dos primeros candidatos para el Ch11 están dentro de un radio r_p definido como $r_p = 2d$ donde $d = 1m$ y la diferencia con los primeros candidatos para los canales Ch13 y Ch16 están dentro de una distancia r_g definida como $r_g = 2r_p$, se toma la media entre los dos primeros candidatos.
- (b) Si los tres primeros candidatos para el Ch11 están dentro de un radio r_m definido como $r_g = 1,5r_p$, se toma la media entre los tres primeros candidatos.
- (c) En cualquier otro caso, se toma la media de los ocho candidatos para los tres canales.

Con este nuevo algoritmo se logra un error medio de localización de 2.05 metros, prácticamente igual que el error con todas las potencias y canales.

La segunda comparación se realiza introduciendo un umbral en los valores RSSI guardados en la base de datos siguiendo el método propuesto en el

algoritmo SIB [28]. La prueba se repitió con diferentes umbrales, pero con ninguno de ellos el error de localización promedio cayó por debajo de 2.5 metros. El mal rendimiento obtenido con esta variación del algoritmo de localización y su diferencia con respecto a los resultados presentados en [27] se puede deber a:

- (a) el tamaño diferente de ambos escenarios porque el área cubierta en nuestro caso es menor (19 m x 11 m frente a los 52 m x 48 m en la referencia SIB).
- (b) el número de balizas (4 en este caso en lugar de 37).
- (c) los niveles de potencia (4 en este caso y 29 en la referencia SIB).

Todas estas cuestiones producen una importante pérdida de información en este caso, que degrada el rendimiento general del algoritmo.

5.5. Conclusiones

Como se ha podido comprobar, el efecto de la reducción del número de potencias y/o canales sobre la precisión de la localización es diferente dependiendo de las condiciones del entorno y las características del despliegue de las balizas. Además, el efecto puede ser diferente en función de qué potencias o canales se reduzcan.

Así, en el escenario de la ETSE la reducción de potencias y/o canales provoca un aumento considerable del error de localización. En el mejor de los casos, utilizando sólo la potencia 30 y los cuatro primeros canales se obtiene un error promedio de 1.65 metros, frente a los 0.99 metros con todas las potencias y canales. Se consigue reducir apreciablemente la base de datos pero a costa de un incremento en el error.

En cambio, en el escenario de la UJI sí que se consigue mantener la precisión de la localización a pesar de reducir la base de datos. Con sólo la potencia 3 y todos los canales se mantiene el error en 2.08 metros, prácticamente el mismo que con todas las potencias y canales.

Al ser el escenario de la ETSE más cerrado, con estancias separadas por paredes y con diversos obstáculos en el camino de la trayectoria de la señal, puede provocar que un nivel potencia no proporcione información para ciertos puntos pero puede ser de utilidad para la localización de otros puntos, con lo que la reducción de la base de datos al eliminar todo ese nivel de potencia afecta de manera significativa a la precisión de la localización. Mientras que en el escenario de la UJI, al ser más abierto, los datos aportados por una sola potencia y varios canales pueden ser suficientes para mantener la precisión ya que los datos aportados por los otros niveles de potencias pueden ser redundantes.

Capítulo 6

Técnicas de interpolación

6.1. Introducción

La fase de calibración *fingerprinting* representa el principal inconveniente de los métodos de localización basados en esta técnica. Una base de calibración de gran tamaño permite disponer de una gran cantidad de valores con los que poder comparar y, en principio, asegura proporcionar una mayor precisión en la localización.

En el capítulo anterior se ha estudiado el efecto que produce en la precisión el disminuir el número de medidas reduciendo el número de potencias, canales o balizas que intervienen en el proceso de calibración. De esta manera, se reduce el tamaño de la base de calibración a costa de reducir el número de valores con los que comparar la fase de localización en sí misma. Como se ha descrito anteriormente, la elección del escenario influye notablemente en la precisión de esta técnica.

Otra manera de reducir el número de medidas experimentales requeridas durante el entrenamiento, sin disminuir la cantidad de valores de medida en la base de datos, es estimar una parte de los valores RSSI usando funciones de interpolación. La interpolación es un método matemático que permite obtener nuevos puntos a partir del conocimiento de un conjunto dado de puntos, mediante el uso de una función lineal o diversas funciones polinómicas. De esta forma, se mantiene el tamaño de la base de calibración y se reduce el

coste temporal de la toma de datos, aunque se añade un coste computacional para calcular los valores interpolados.

En este capítulo se evalúa la viabilidad de este método para diferentes distribuciones y densidades de puntos de medida en los dos escenarios antes descritos.

6.2. Métodos de interpolación

La interpolación es una herramienta matemática que puede estimar el valor de una función en cierto punto utilizando otros valores disponibles de esa función en diferentes puntos. Los modelos de interpolación son básicamente deterministas, porque tratan las salidas de funciones como valores fijos. Se pueden aplicar varios modelos matemáticos dependiendo de la precisión y complejidad requeridas. Como primera aproximación, la estimación se puede realizar combinando de alguna manera los valores de función conocidos. Puesto que los puntos conocidos más próximos al nuevo valor de función estimado deberían tener una influencia mayor en la interpolación, los valores conocidos se tienen que combinar usando una función de peso, que debería ser una función decreciente positiva de la distancia. Este tipo de modelos de interpolación son normalmente conocidos como *kernel smoothers* y un ejemplo común es la interpolación de ponderación de distancia inversa (IDW, *Inverse Distance Weighting*) [127], donde la función de peso es una función de potencia inversa simple en \Re expresada como

$$w(x) = x^{-a} \quad (6.1)$$

donde la constante a es un valor positivo. Otro ejemplo de función de peso es la exponencial

$$w(x) = e^{-ax} \quad (6.2)$$

donde una vez más la constante a es un valor positivo.

La expresión final de la función de interpolación usando estos pesos es

$$\hat{y}(x_0) = \frac{\sum_j w(d_j) \cdot y(x_j)}{\sum_j w(d_j)} \quad (6.3)$$

Siendo $y(x_j)$ el conjunto de valores conocidos de la función, y (d_j) la distancia entre los puntos (x_j) y el nuevo punto estimado (x_0) en el eje x.

Otros tipos de modelos de interpolación son los basados en funciones polinomiales. En este caso, se pretende que la curva original se pueda modelar utilizando una función polinómica de cierto orden. El caso más simple implica el uso de una regresión lineal que se puede resolver utilizando el bien conocido procedimiento de mínimos cuadrados para obtener la pendiente y la intersección. La aplicación local de la regresión lineal permite el ajuste de funciones más complejas que definen un diámetro en el que la interpolación lineal es válida. Las funciones de *kernel smoothers* se pueden introducir en el cálculo de mínimos cuadrados para cancelar la contribución de puntos que están fuera de este intervalo local, reduciendo su importancia cuando están más alejados del punto central que se está estimando. Siguiendo el mismo procedimiento en cada punto estimado, se puede conservar la continuidad de la curva de ajuste. Para funciones con cambios abruptos, la interpolación local se puede realizar considerando polinomios de órdenes superiores. Con los modelos anteriores se pueden obtener superficies de interpolación continuas. Sin embargo, a veces, no es suficiente con asegurar la continuidad del modelo, y también se requiere el suavizado en cada punto.

Este requisito se puede cumplir utilizando interpoladores de función de base radial (RBF, *Radial Basis Function*) [127]. Estas funciones de base son radialmente simétricas alrededor del origen y tienden hacia cero cuando nos alejamos. Algunos ejemplos de funciones de base radial calculadas en un punto s en \mathfrak{R}^2 son:

- La función de base lineal de distancia euclidiana

$$f(s) = \|s\| \quad (6.4)$$

- La función multiquadrática

$$f(s) = \sqrt{1 + \|s\|^2} \quad (6.5)$$

- La función *thin plate spline*

$$f(s) = \|s\|^2 \cdot \log(\|s\|) \quad (6.6)$$

- Funciones *polyharmonic spline*

$$f(s) = \begin{cases} \|s\|^n \cdot \log(\|s\|), n \text{ es un entero par} \\ \|s\|^n, \text{cualquier otro caso} \end{cases} \quad (6.7)$$

En el último caso de funciones poliarmónicas, hay algunas combinaciones de funciones y potencias que no son adecuadas (por ejemplo, $\|s\|^2$), porque las ecuaciones de interpolación pueden no tener solución. Utilizando este método de interpolación, el origen de una función base se coloca en cada posición en la que está disponible un valor de función conocido. El modelo se logra utilizando una combinación ponderada de todas las funciones base. El cálculo de los pesos se realiza de tal manera que garantice la igualdad entre los resultados de interpolación y los valores conocidos iniciales en los orígenes de las funciones de base radial. El cálculo de los pesos se puede llevar a cabo resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones lineales

$$y_i(s_i) = \sum_{j=1}^n w_j f_j(s_i), i = 1, \dots, n \quad (6.8)$$

donde $y_i(s_i)$ es el conjunto de valores conocidos utilizados en la interpolación, s_i son los puntos donde se tomaron los valores conocidos, w_j son los pesos y $f_j(s)$ son las funciones base radiales, cada una centrada en un punto diferente. Las principales características que proporciona la combinación de estas funciones base radiales son: a) la suavidad de la superficie interpolada resultante, ya que proviene de la adición de funciones suaves, y b) la precisión contra el modelo subyacente real, debido a que los resultados de interpolación son iguales a los valores de función conocidos en el origen de las funciones base radiales.

6.3. Propuesta de reducción

Estos métodos de interpolación se han aplicado con éxito en la estimación de la densidad de mapas de radiofrecuencia de un número reducido de puntos de medida en el que se toman las medidas de RSSI [128] [29] [129]. Usando estas técnicas, la base de datos de *fingerprinting* se puede construir con menos esfuerzo porque se muestrea un número mucho menor de puntos de medida y se estima el resto del mapa mediante interpolación. Estas técnicas se han aplicado a la construcción de mapas tanto interiores como exteriores para tecnologías como la señal de teléfono móvil GSM y WLAN basada en tecnologías 802.11 [129]. Los resultados mostrados en las referencias [128] [29] demuestran que la precisión de la localización de los algoritmos de *fingerprinting* con bases de datos interpoladas, utilizando muy pocos puntos de medida en redes 802.11, es prácticamente la misma a los casos en los que la base de datos comprende un gran número de puntos de medida.

En las siguientes secciones se aplica este método a las redes IEEE802.15.4 que permiten la selección de canales de frecuencias múltiples y niveles de transmisión de potencia de señales de radio. Por lo tanto, el algoritmo de localización puede combinar la información de múltiples mapas interpolados correspondientes a diferentes canales de frecuencia y niveles de potencia.

6.4. Escenario ETSE

6.4.1. Configuración

La fase de entrenamiento *fingerprinting* representa el principal inconveniente de estos métodos de localización. Para mitigar este esfuerzo inicial se puede disminuir el número de puntos de medida, pero a expensas de disminuir la densidad de información disponible durante el paso de localización. Una manera de reducir el número de medidas experimentales requeridas durante el entrenamiento, sin disminuir el número de puntos de medida en la base de datos, es estimar una parte de los valores RSSI usando funciones de interpolación. Para probar la exactitud de este método, se realiza un experimento que compara los valores RSSI medidos en la base de datos con los valores estimados obtenidos de las funciones de interpolación.

Para ello, se reduce la base de datos inicial, que incluye todos los puntos de prueba mostrados en la sección 3.3.2, eliminando los valores RSSI correspondientes al 50 % de la cantidad total de puntos de medida. Utilizando los valores de RSSI restantes y aplicando las cuatro funciones de interpolación de RBF antes expuestas, se estiman los valores de RSSI para los puntos de medida eliminados.

La Figura 6.1 representa dos posibles distribuciones de los puntos de medida. Las Figuras 6.1a y 6.1b muestran una distribución uniforme en todo el área de localización donde la densidad global de puntos de medida es del 50 %, una distribución complementaria de la otra. Las Figuras 6.1c y 6.1d muestran igualmente distribuciones uniformes complementarias donde la densidad de puntos de medida es del 25 %.

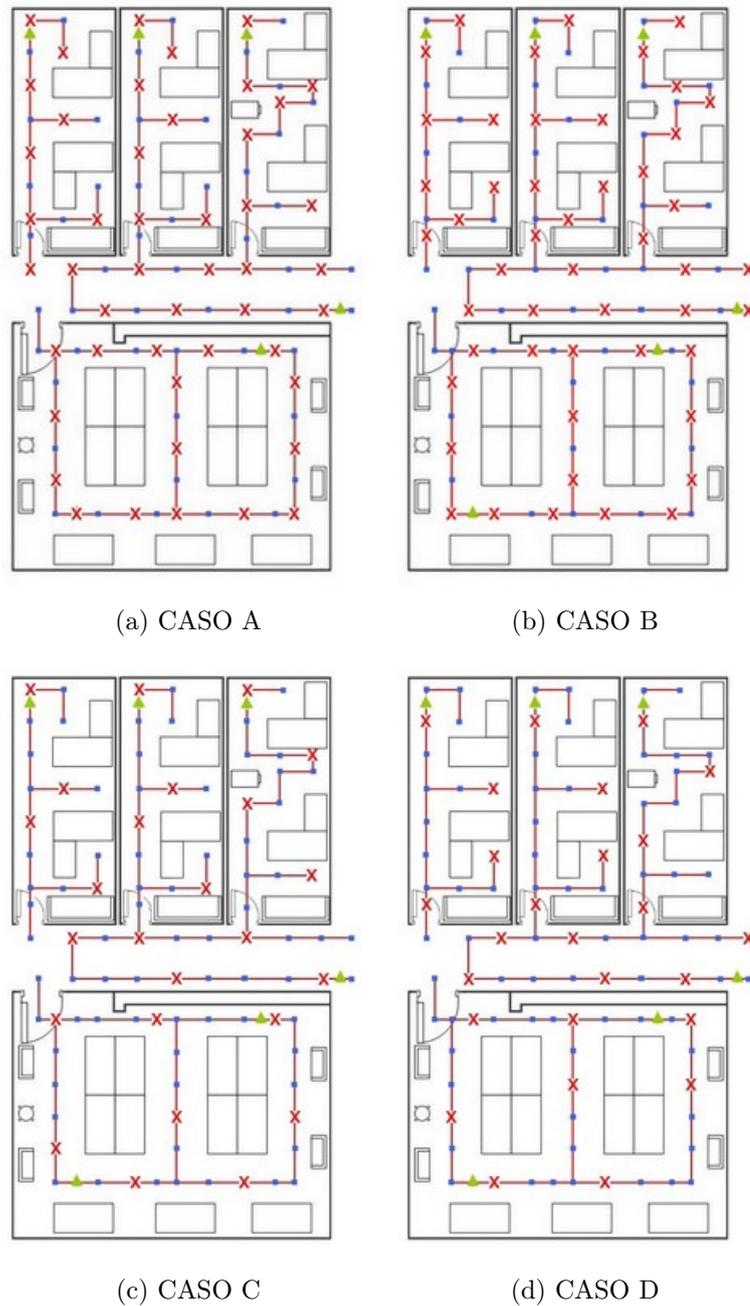


Figura 6.1: Mapa del escenario de prueba con: (arriba) 50% de puntos de medida para dos distribuciones diferentes: (A) Uniforme; (B) Uniforme con los puntos complementarios del caso A; (abajo) Y con el 25% de puntos de medida para otras dos distribuciones: (C) Uniforme; (D) Uniforme con puntos alternativos del caso C. Las X rojas denotan los puntos de medida, mientras que los puntos azules son los puntos interpolados.

6.4.2. Análisis de la base datos de interpolación

El análisis se centra en el caso en el que se interpolan el 50 % de los valores RSSI, tal como se representa en la Figura 6.1a. En esta figura, los puntos marcados con una x roja son los puntos de medida originales y los puntos marcados con un punto azul se interpolan con la función *thin spline*.

Las Figuras 6.2 y 6.3 muestran gráficamente el mapa de valores RSSI, con y sin puntos interpolados. Comparando los dos mapas de valores RSSI, se puede observar que la versión interpolada suaviza la superficie original. La Figura 6.4 presenta la diferencia de los valores RSSI entre estos dos mapas. Se observa que los errores más altos se concentran principalmente en pocos puntos donde el mapa original presenta cambios abruptos.

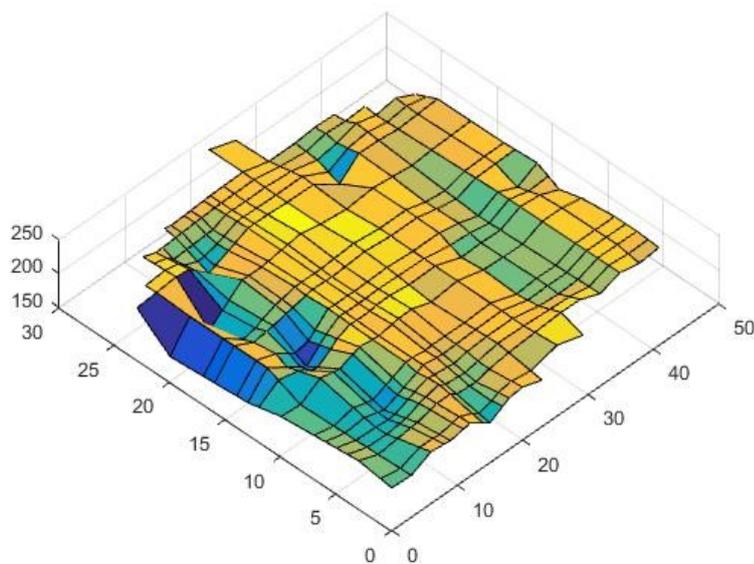


Figura 6.2: Mapa de valores RSSI tomados en cada punto de medida del área de prueba. Cada valor de RSSI es el promedio de tres medidas tomadas en el objeto móvil cuando las seis balizas transmiten utilizando los seis canales y el nivel de potencia P30.

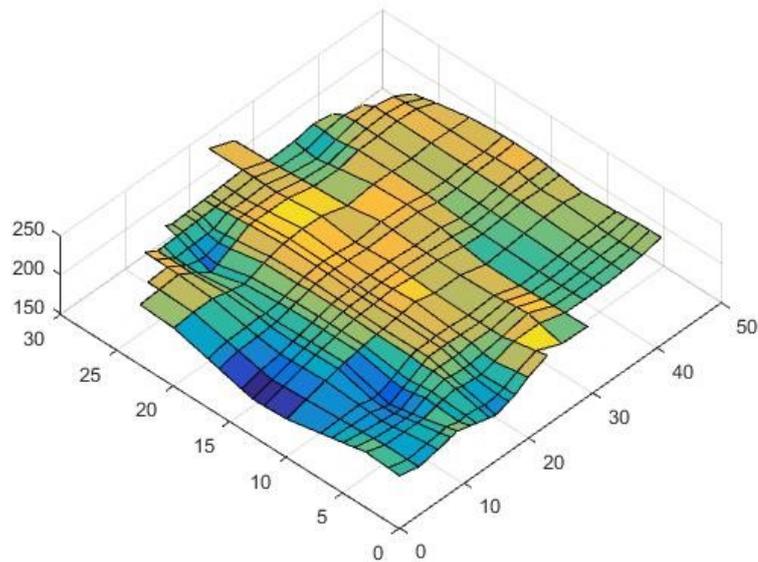


Figura 6.3: Mapa de valores RSSI tomados al 50 % del número total de puntos de medida del área de prueba. El otro 50 % de los puntos se han interpolado con la función *thin spline*. Cada valor de RSSI es el promedio de tres medidas tomadas en el objeto móvil cuando las seis balizas transmiten utilizando los seis canales y el nivel de potencia P30.

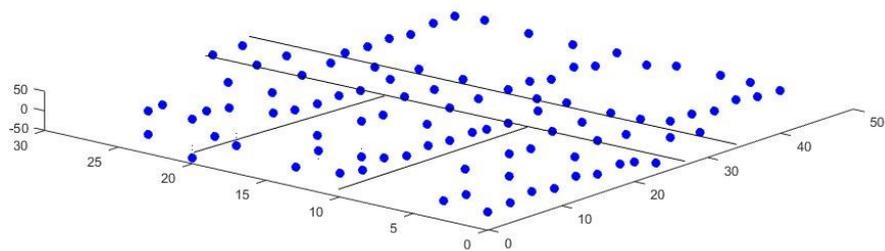


Figura 6.4: Diferencia en el mapa de valores RSSI entre el 50 % del número total de puntos de referencia tomados del área de prueba y el otro 50 % con puntos interpolados mediante la función *thin spline*. Cada valor de RSSI es el promedio de tres medidas tomadas en el objeto móvil cuando las seis balizas transmiten utilizando los seis canales y el nivel de potencia P30.

6.4.3. Análisis del error de localización

Para cuantificar el error total cometido mediante la interpolación, se ha calculado el porcentaje promedio de error entre los valores de RSSI medidos e interpolados considerando todos los puntos de medida del escenario de pruebas, tal como se representa en la Figura 6.1a. La Tabla 6.1 resume los resultados obtenidos con las cuatro diferentes funciones de interpolación. Como conclusión, se puede observar que el menor porcentaje de error promedio se logra para la función de *thin spline* ya que el mapa obtenido tiene la menor diferencia con respecto a la original. Esto se debe al hecho de que la función *thin spline* se aproxima mejor a la forma real del comportamiento del RSSI medido en dB.

	thin	eucl	multiq	polyhar (n=4)
Diferencia en los valores de RSSI (en %)	12.28 %	15.35 %	17.21 %	22.38 %

Tabla 6.1: Porcentaje promedio de error entre el RSSI medido y estimado, cuando el 50 % de los puntos de medida son interpolados.

El algoritmo de localización se ejecuta utilizando un segundo conjunto de datos de valores RSSI experimentales tomados en una segunda ronda de medidas experimentales por el objeto móvil en las mismas posiciones de la rejilla de prueba utilizando todas las potencias y canales disponibles. El análisis incluye la aplicación del algoritmo de localización presentado en la sección 4.5 con tres densidades diferentes de puntos de medida:

- 100 % de los puntos de medida experimentales y sin ningún punto interpolado, este caso produce un error de localización promedio de 0.99 metros con una desviación estándar de 1.16 metros.
- 50 % de los puntos de medida experimentales y el otro 50 % interpolado en dos casos: caso A con una configuración mostrada en el esquema de la Figura 6.1a; Caso B, complementario del caso A (Figura 6.1b).
- 25 % de los puntos de medida experimentales y 75 % interpolados en dos casos: caso C con una configuración mostrada en el esquema de la Figura 6.1c; Caso D, complementario del caso C (Figura 6.1d).

La Tabla 6.2 presenta el error medio de localización y la desviación estándar para densidades con 50 % y 25 % de puntos de medida.

		thin	eucl	multiq	polyhar (n=4)
Caso A (50 %)	error promedio (m)	1.98	2.07	2.11	2.31
	desviación estándar (m)	1.92	2.21	2.31	2.51
Caso B (50 %)	error promedio (m)	2.01	2.10	2.18	2.27
	desviación estándar(m)	2.05	2.22	2.35	2.41
Caso C (25 %)	error promedio (m)	2.48	2.55	2.73	3.10
	desviación estándar(m)	2.58	2.62	2.88	3.56
Caso D (25 %)	error promedio (m)	2.51	2.59	2.77	3.08
	desviación estándar(m)	2.62	2.78	2.91	3.41

Tabla 6.2: Precisión media de la localización con diferentes funciones de interpolación (thin, euclidiana, multiquadrática y poliarmónica con $n = 4$) y porcentaje de puntos de medida: 50 % y 25 %. En ambos casos, se consideran dos selecciones diferentes de los puntos interpolados.

Una primera mirada a la Tabla 6.2 revela que el error del algoritmo aumenta significativamente cuando la base de datos incluye el 50 % de los puntos interpolados. Por lo tanto, la influencia de la interpolación en el rendimiento del algoritmo es importante para este porcentaje de puntos de medida tanto para el caso A como para el caso B. Para ambos casos los resultados son muy similares ya que los puntos elegidos en un caso y otro están próximos entre sí y la variación de los valores no es muy grande. A diferencia del escenario de la UJI que se describe en la siguiente sección, en este caso no existen puntos bloqueados por obstáculos cuya variación pueda ser grande en función de ser interpolados o no. El escenario es más cerrado y tiene paredes que separan los distintos despachos pero cada una de esas zonas está controlada por una baliza que es la que tiene más peso para la localización. Lógicamente, si disminuimos los puntos de medida hasta al 25 % el error aumenta, llegando incluso hasta los 3 metros.

En cuanto a los tipos de interpolación, la *thin spline* es la que presenta una mayor precisión, aunque la euclidiana proporciona prácticamente los mismos valores. Mientras que la poliarmónica arroja los errores más altos.

6.5. Escenario UJI

6.5.1. Configuración

Aplicamos ahora el mismo protocolo de la sección anterior al escenario de la UJI introducido en la sección 3.3.3. Este escenario es más abierto y posee obstáculos (columnas) en el recorrido de la señal y las balizas están agrupadas en torno a una zona más restringida. Ello permite hacer otro tipo de pruebas, como son interpolar o no los puntos bloqueados por esos obstáculos y probar con una distribución no uniforme de puntos estimados. Para ello, análogamente al caso anterior se reduce la base de datos inicial, que incluye todos los puntos de prueba mostrados en la sección anterior, eliminando los valores de RSSI correspondientes al 50 % de la cantidad total de puntos de medida. Usando los valores restantes de RSSI y aplicando las funciones de la interpolación de RBF, se estiman los valores de RSSI para los puntos de medida eliminados. La Figura 6.5a representa dos posibles distribuciones de puntos de medida, donde los puntos de medida originales están marcados por una x , y los interpolados están representados sólo por un punto.

Los casos A y D y los casos B y E muestran una distribución uniforme en todo el área de localización. Sin embargo, los casos C y F muestran una distribución no uniforme por zonas, donde la densidad global de puntos de medida es del 50 %, pero la densidad en cada zona varía de 25 % a 60 %. La idea es que las señales de radiofrecuencia tienen una mejor calidad para ubicaciones cercanas a las balizas y mala calidad para ubicaciones alejadas de ellas. Por lo tanto, para las zonas cercanas al centroide de las balizas se utiliza una baja densidad de puntos de medida (25 %), mientras que para las zonas alejadas del centroide de las balizas la densidad de puntos de medida aumenta (hasta el 60 %).

6.5.2. Análisis de la base datos de interpolación

Análogamente al caso del escenario de la ETSE, para probar la exactitud de este método, se comparan los valores RSSI medidos en la base de datos con los valores estimados obtenidos de las funciones de interpolación. Para ello, se reduce la base de datos inicial, que incluye todos los puntos de prueba

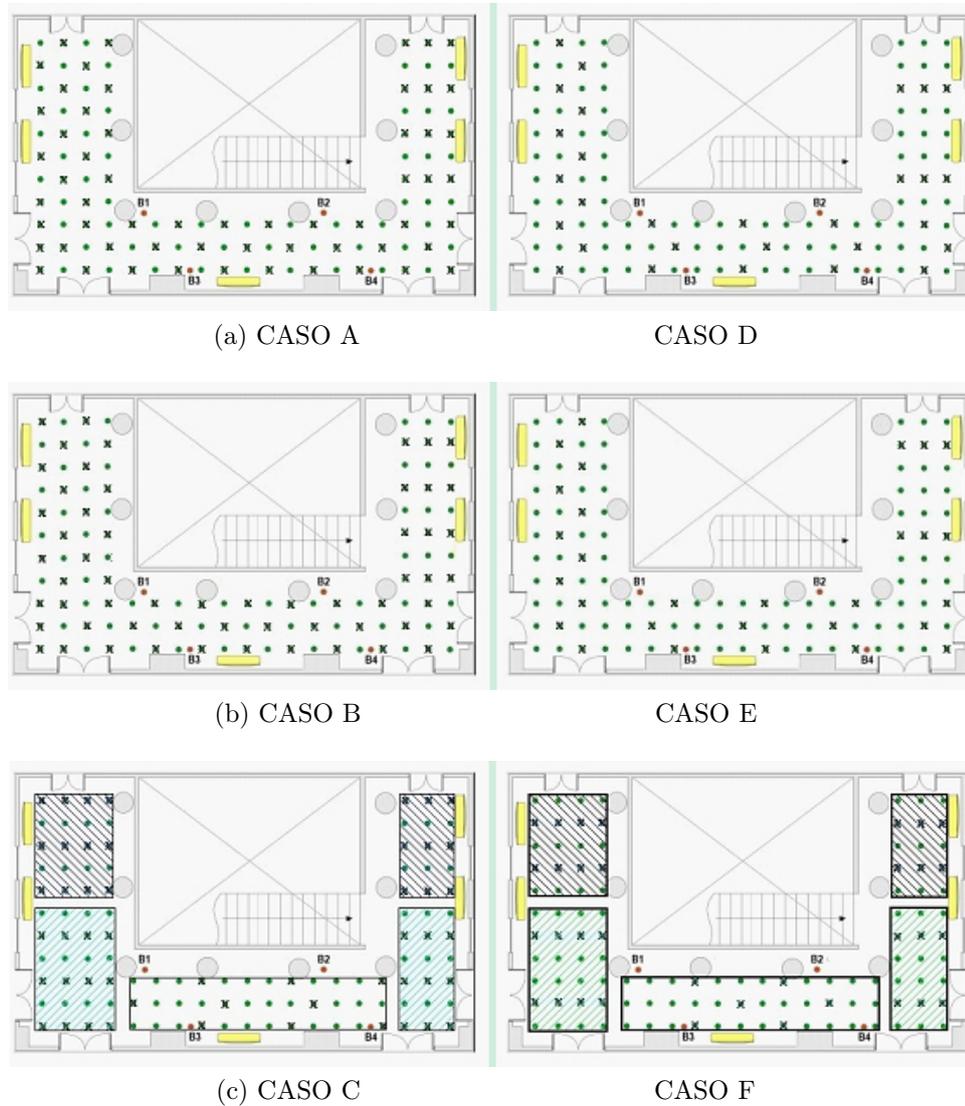


Figura 6.5: Mapa del escenario de prueba con: (columna izquierda) 50 % de puntos de medida para tres distribuciones diferentes: (A) Uniforme; (B) Uniforme con los puntos complementarios del caso A; (C) No uniforme por zona; y (columna derecha) 25 % de puntos de medida para otras dos distribuciones: (D) Uniforme; (E) Uniforme con puntos alternativos del caso D; (F) No uniforme por zonas. Las x denotan los puntos de medida, mientras que los puntos verdes son los interpolados.

mostrados en la sección anterior, eliminando los valores RSSI correspondientes al 50 % de la cantidad total de puntos de medida. Utilizando los valores de RSSI restantes y aplicando las cuatro funciones de interpolación RBF descritas en 6.2, se estiman los valores de RSSI para los puntos de medida eliminados. La Figura 6.5a muestra los puntos de medida originales, que están marcados con una x, y los interpolados, que no están marcados con una x y están representados solamente con un punto. Las Figuras 6.6 y 6.7 muestran gráficamente el mapa de valores RSSI, con y sin puntos interpolados. Comparando los dos mapas de valores RSSI, se puede observar que la versión interpolada suaviza la superficie original y produce resultados precisos para la mayoría de los puntos interpolados, siempre que los cambios en los valores de RSSI entre puntos vecinos no sean abruptos. La Figura 6.8 presenta la diferencia de los valores RSSI entre estos dos mapas. Igualmente, se observa que los errores más altos se concentran en unos pocos puntos donde el mapa original presenta cambios más abruptos.

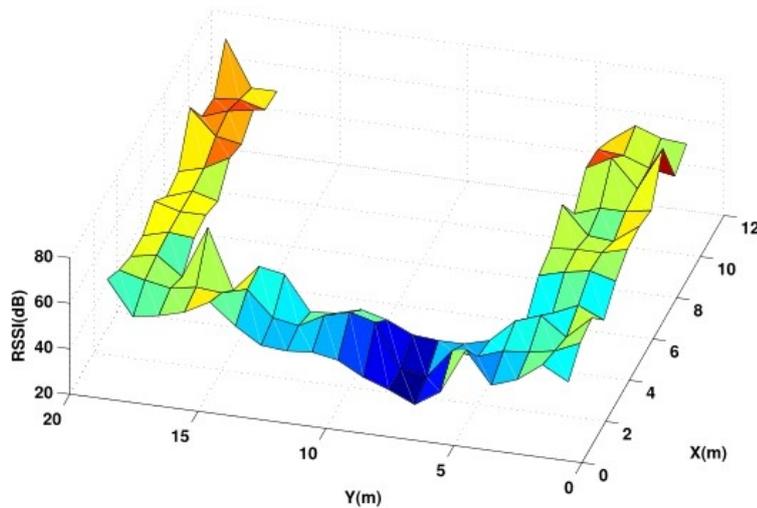


Figura 6.6: Mapa de valores RSSI tomados en cada punto de medida del área de prueba. Cada valor de RSSI es el promedio de 5 cinco medidas tomadas en el objeto móvil cuando la baliza 4 transmite 5 paquetes utilizando el canal Ch11 y el nivel de potencia P3.

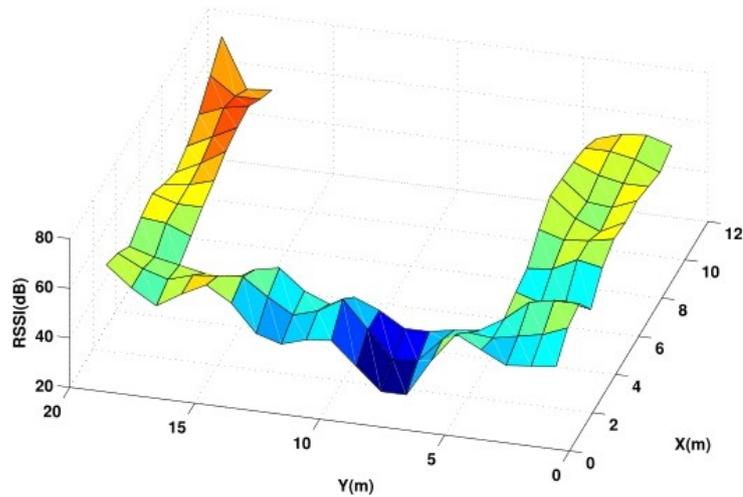


Figura 6.7: Mapa de radio con valores RSSI tomados al 50 % del número total de puntos de medida del área de prueba. El otro 50 % de los puntos se han interpolado con la función de *thin spline*. Cada valor de RSSI es el promedio de 5 cinco medidas tomadas en el objeto móvil cuando la baliza 4 transmite 5 paquetes utilizando el canal Ch11 y el nivel de potencia P3.

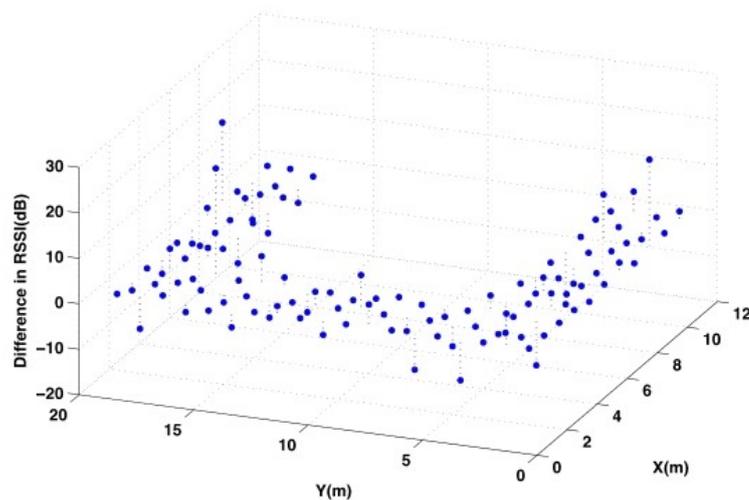


Figura 6.8: Diferencia en el mapa de valores RSSI entre el 50 % del número total de puntos de referencia tomados del área de prueba y el otro 50 % con puntos interpolados mediante la función *thin spline*. Cada valor de RSSI es el promedio de 5 cinco medidas tomadas en el objeto móvil cuando la baliza 4 transmite 5 paquetes utilizando el canal Ch11 y el nivel de potencia P3.

6.5.3. Análisis del error de localización

Para cuantificar el error total cometido mediante la interpolación, se ha calculado el porcentaje promedio de error entre los valores de RSSI medidos e interpolados considerando todos los puntos de medida de la sala de pruebas, tal como se representa en la Figura 6.5a. La Tabla 6.3 resume los resultados obtenidos con las cuatro diferentes funciones de interpolación. Se puede observar que el mejor resultado se vuelve a lograr para la función de *thin spline* ya que el mapa obtenido tiene la menor diferencia con respecto al original. Como en el escenario anterior, ello se debe al hecho de que la función *thin spline* se aproxima mejor a la forma real del comportamiento RSSI medido en dB.

	thin	eucl	multiq	polyhar(n=4)
Diferencia en los valores de RSSI (en %)	6.30 %	7.8 %	7.80 %	9.80 %

Tabla 6.3: Porcentaje promedio de error entre el RSSI medido y estimado, cuando el 50 % de los puntos de medida son interpolados.

En esta sección se presenta un estudio sobre la exactitud de la ubicación obtenida para diferentes grados del tamaño de la base de datos experimental. Esta evaluación permite establecer una relación de compromiso entre el número de puntos de medida experimentales tomados durante la etapa de entrenamiento y la precisión de localización que se puede lograr. El análisis incluye la aplicación del algoritmo de localización presentado en la sección 4.5 con tres densidades diferentes de puntos de medida:

- 100 % de los puntos de medida experimentales y sin ningún punto interpolado, este caso produce un error de localización promedio de 2.02 metros con una desviación estándar de 1.88 metros.
- 50 % de los puntos de medida experimentales y el otro 50 % interpolado en tres casos: caso A con una configuración mostrada en el esquema de la Figura 6.5a columna de la izquierda; caso B, complementario del caso A; y el caso C, eligiendo los puntos de medida por zonas de acuerdo con su distancia a las balizas. La diferencia principal entre las distribuciones A y B es que en el primero la mayor parte de los puntos bloqueados por obstáculos en su línea de visión a las balizas se incluyen como puntos

de medida. Por el contrario, la distribución B no incluye prácticamente ningún punto bloqueado y se insertan en la base de datos como puntos interpolados.

- 25 % de los puntos de medida experimentales y 75 % interpolados en tres casos (Figura 6.5a columna de la derecha): caso D; caso E, complementario del caso D; y caso F, eligiendo los puntos de medida por zonas de acuerdo con su distancia a las balizas.

La Tabla 6.4 presenta el error promedio de localización y la desviación estándar para densidades con 50 % y 25 % de puntos de medida.

		thin	eucl	multiq	polyhar (n=4)
Caso A (50 %)	error promedio (m)	2.02	2.09	2.12	2.22
	desviación estándar (m)	1.90	2.51	2.27	2.42
Caso B (50 %)	error promedio (m)	2.50	2.38	2.52	3.10
	desviación estándar (m)	2.60	2.53	2.66	3.25
Caso C (50 %)	error promedio (m)	2.16	2.28	2.42	2.53
	desviación estándar (m)	2.06	2.18	2.40	2.55
Caso D (25 %)	error promedio (m)	3.04	3.12	3.26	3.34
	desviación estándar (m)	3.18	3.25	3.45	3.59
Caso E (25 %)	error promedio (m)	2.98	3.06	3.22	3.52
	desviación estándar (m)	2.63	3.16	3.21	3.56
Caso F (25 %)	error promedio (m)	3.18	3.33	3.42	3.66
	desviación estándar (m)	3.26	3.42	3.53	3.66

Tabla 6.4: Precisión media de la localización con diferentes funciones de interpolación (thin, euclidiana, multiquadrática y poliarmónica con $n = 4$) y porcentaje de puntos de medida: 50 % y 25 %. En ambos casos, se consideran tres selecciones diferentes de los puntos interpolados.

La Tabla 6.4 revela que la exactitud del algoritmo no disminuye significativamente cuando la base de datos incluye el 50 % de los puntos interpolados. Por lo tanto, la influencia de la interpolación en el rendimiento del algoritmo es prácticamente insignificante para este porcentaje de puntos de medida.

El conjunto de puntos de medida seleccionados influye en el error promedio obtenido. Por lo tanto, para el caso A la exactitud de posición media

es prácticamente igual al caso con el 100 % de los puntos de medida, mientras que para el caso B, utilizando los puntos de medida complementarios, la exactitud de posición media es claramente inferior. Este comportamiento es el mismo para todas las funciones de interpolación, por lo que existe una influencia directa en la calidad de los puntos de medida seleccionados. La diferencia entre los resultados de los casos A y B se puede deber al número de puntos bloqueados por obstáculos tomados en la base de datos como puntos de medida o interpolados. Así, la distribución A incluye la mayoría de los puntos bloqueados como puntos de medida, mientras que en la distribución B se interpolan. Otra cuestión que se puede considerar es la distancia entre los puntos de medida y las balizas. Esta cuestión se evalúa utilizando el caso C, que representa una distribución no uniforme dividida en zonas con diferentes densidades de puntos de medida. En el caso C, la distribución global de los puntos de medida es del 50 %, pero dependiendo de la distancia de la zona a las balizas, la densidad de puntos de medida va del 25 % (cerca de las balizas) al 60 % (lejos de las balizas). La Tabla 6.4 muestra que esta distribución podría ser una buena opción debido a que la precisión media de la ubicación tiene un valor intermedio entre el caso A y B.

Éste es un resultado importante porque significa que con la mitad del número de puntos experimentales se puede lograr la misma precisión de ubicación. Sin embargo, cuando el número de puntos de medida que se interpolan crece demasiado, es decir, el caso D con el 25 % de puntos de medida, la precisión del algoritmo de localización cae, logrando un error promedio de alrededor de 3 metros. El mismo comportamiento se puede observar en las otras dos distribuciones E y F.

Además, en la Figura 6.9 se muestra el porcentaje de puntos de prueba que producen un error de localización que es inferior a un cierto valor. El resultado principal de este gráfico es que el 80 % de los puntos de prueba producen un error inferior a 3 metros y sólo un 10 % de los puntos de prueba se localizan con un error superior a 4 metros. Las diferencias entre las funciones de interpolación no son muy importantes, aunque se puede ver que la función *thin spline* está más cerca del 100 % de los puntos de prueba cuando el error de localización es superior a 4 metros.

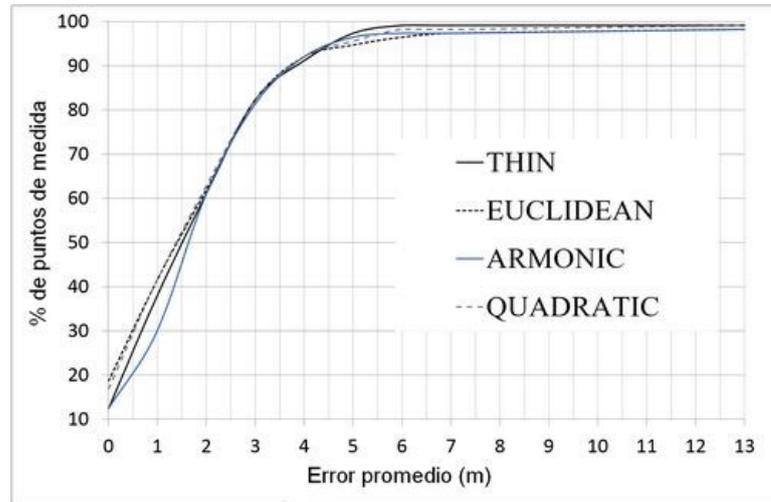


Figura 6.9: Porcentaje de puntos de prueba por error de localización para el caso A de la Tabla 6.4 usando diferentes funciones de interpolación.

Otra cuestión importante que se debe tener en cuenta es la dependencia de la exactitud de la localización en la cantidad total de puntos de medida. Este asunto se ha evaluado tomando ocho porcentajes diferentes de puntos de medida, espaciados en el intervalo del 100 % al 10 % del total de puntos de medida. Para cada porcentaje, se ha aplicado el caso original sin interpolación y el que aplica la interpolación *thin spline*. La Figura 6.10 presenta los resultados obtenidos, que muestran claramente cómo el caso sin interpolación empeora rápidamente cuando el número de puntos de medida disminuye. Por lo tanto, la eliminación de sólo alrededor del 10 % de la cantidad total de puntos de medida hace que este caso pierda más del 10 % de la exactitud de la ubicación.

Por el contrario, el caso con interpolación mantiene una buena precisión incluso con porcentajes de puntos de medida del orden del 50 %. En este intervalo, del 100 % al 50 %, el caso con interpolación produce resultados con una degradación inferior al 10 % de la precisión inicial. Sólo cuando se alcanza el límite del 50 % de puntos de medida, el caso con interpolación comienza a seguir la misma tendencia que el caso sin interpolación. Se puede observar que cuando el gráfico pasa del 60 % de los puntos de medida al 50 %, el error de localización disminuye de 2.16 metros a 2.02 metros. Esta mejora en el error de localización se debe a la selección de los puntos de medida.

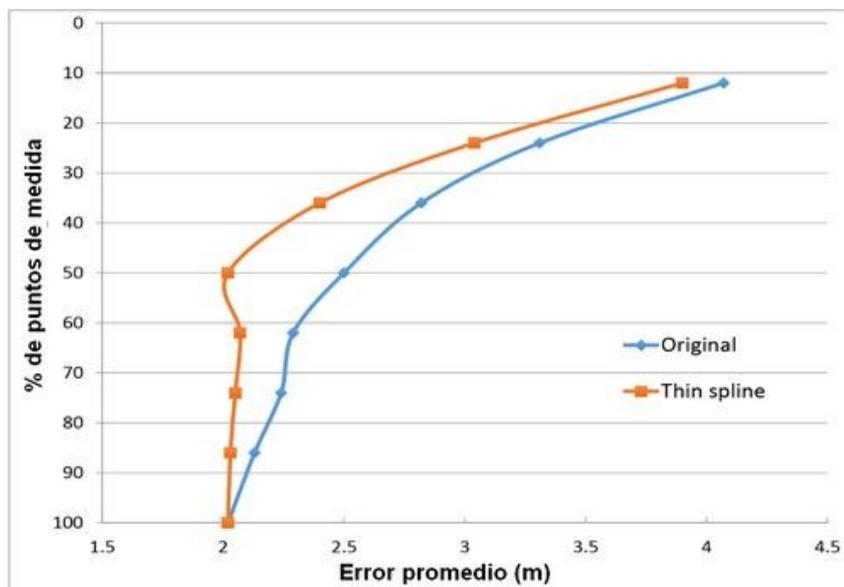


Figura 6.10: Porcentaje de puntos de medida incluidos en la base de datos frente al error de localización para el caso original sin interpolación y utilizando interpolación *thin spline*.

En algunos casos hay distribuciones particulares en las que el cambio en la selección de algunos pocos puntos interpolados puede mejorar ligeramente la estimación de localización. La razón detrás de este hecho es que el algoritmo de localización utiliza un conjunto de puntos candidatos con valores RSSI concentrados en un pequeño intervalo. Así, en algunos casos los puntos interpolados reemplazan algunos puntos originales de medida engañosos y dentro de este pequeño grado de cambio en la base de datos el error promedio puede disminuir ligeramente. En cualquier caso, esta mejora es muy pequeña, inferior al 10% del error de localización para el caso del 60% de puntos de medida. Como conclusión, esta comparación demuestra claramente las ventajas de la interpolación para mantener la precisión de localización cuando se reduce el número de puntos de medida en la base de datos *fingerprinting*.

6.6. Conclusiones

Como ocurría al considerar la reducción de potencias y canales en el capítulo 5, se ha podido evidenciar que la dependencia de los resultados

respecto del escenario y el despliegue elegido es importante. En este caso, hay que destacar la influencia de los obstáculos para la señal RF donde se realiza el despliegue y la densidad inicial de las balizas de las que se parte.

En el escenario de la ETSE las técnicas de interpolación no consiguen mantener la precisión del error de localización, duplicando dicho error promedio en el mejor de los casos con la mitad de los puntos interpolados. La estructura más estrecha de este escenario hace que haya menos vecinos para cada punto que puedan aportar información cuando se calcula la interpolación.

Por el contrario, en el escenario de la UJI, por las características antes descritas de dicho escenario, las técnicas de interpolación sí que se demuestran válidas para mantener la precisión de la localización. En el mejor de los casos, con el cincuenta por ciento de los puntos interpolados se iguala dicha precisión, lo que es un importante ahorro de tiempo y computación en la base de datos *fingerprinting*.

Capítulo 7

Reducción temporal

7.1. Introducción

En los capítulos anteriores se han estudiado dos métodos para reducir la base de datos de calibración. En el primero de ellos, la reducción de potencias y/o canales puede disminuir notablemente el tamaño de la base de calibración y el tiempo que se tarda en construirla. En el segundo de ellos, aunque el tamaño no se reduce, ya que los valores que se eliminan son sustituidos por valores interpolados, el tiempo de toma de datos en sí mismo se reduce drásticamente. Sin embargo, en ambos métodos la precisión de la localización se puede ver afectada y la dependencia respecto al escenario es notable.

En este capítulo se propone un protocolo que se encargue, no de reducir el tamaño de la base de datos de calibración, sino de disminuir el tiempo que cuesta tomar todos esos datos. De este modo, se mantienen todos los valores de RSSI tomados tanto de las balizas como del objeto móvil, con los diferentes niveles de potencia de señal y canales de frecuencia. Ello implica que el número total de paquetes transmitidos en cada nueva posición es considerable. Además, este protocolo está diseñado para que varios objetos móviles puedan estar intentando acceder al canal para intercambiar paquetes con el mismo o con otras balizas al mismo tiempo y en el mismo dominio de *broadcast*.

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) son una tecnología clave en

el desarrollo de sistemas de localización. Las motas WSN son dispositivos sencillos de bajo coste, capaces de realizar comunicaciones inalámbricas. Por lo general, los dispositivos inalámbricos integrados en motas WSN son compatibles con IEEE 802.14.5 [130]. Esta norma fue concebida para apoyar el diseño de lo que se denomina como redes de área personal de baja tasa de transmisión. Sin embargo, la norma presenta graves restricciones en términos de ancho de banda máximo y rendimiento de la red cuando el número de nodos y la tasa de transmisión aumentan.

Se presenta un primer enfoque para implementar la infraestructura subyacente para el sistema de localización que se basa en el bien conocido protocolo de *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), propuesto en el estándar IEEE 802.15.4. Esta primera alternativa se evalúa simulando diferentes números de objetos móviles y tasas de transmisión durante el proceso de muestreo RSSI. Debido al bajo rendimiento que ofrece este primer enfoque, se propone un nuevo protocolo de capa de control de acceso al medio (MAC, *Medium Acces Control*). Este protocolo se adapta a los requisitos del sistema para aumentar el rendimiento de la red y reducir el retraso global que aparece durante el proceso de muestreo RSSI.

7.2. Análisis IEEE 802.15.4

7.2.1. Acceso al medio

Teniendo en cuenta la versión no ranurada del estándar IEEE 802.15.4, el algoritmo de acceso al medio sigue el siguiente diagrama de flujo mostrado en la Figura 7.1.

Los parámetros implicados en este algoritmo son:

- a) NB : número de veces que una mota ha intentado acceder al canal.
- b) BE : El exponente de retroceso representa el número de periodos de *backoff* que la mota debe esperar antes de acceder al canal. Los valores mínimo ($macMinBE$) y máximo ($aMaxBE$) incluidos en el estándar son 3 y 5, respectivamente.
- c) $macMaxCSMABackoffs$: Número máximo de intentos de acceso al canal. Este valor es 4 por defecto.

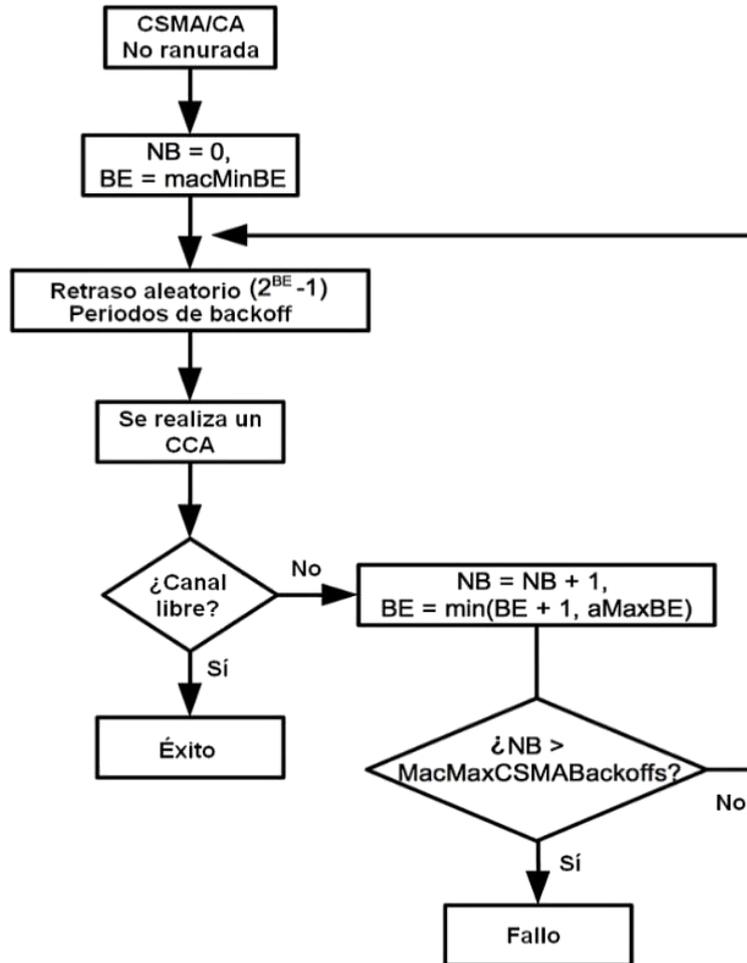


Figura 7.1: Versión no ranurada del protocolo IEEE 802.15.4 CSMA/CA.

El proceso de acceso al medio comienza por determinar el periodo inicial de *backoff* que la mota tiene que esperar antes de comprobar el estado del canal. Este número es un valor aleatorio en el intervalo $(0 \text{ a } 2^{BE} - 1)$. Inicialmente, BE es 3 y el periodo de *backoff* estaría en el rango de 0 a 7. A continuación, la capa física realiza un *Clear Channel Assessment* (CCA). Si el canal está libre, la mota puede iniciar la transmisión de paquetes, de lo contrario el valor NB y BE se incrementan en uno. El nuevo valor BE en este último caso se calcula como $BE = \min(3 + 1, 5)$, ya que no puede ser mayor que 5.

Por otra parte, NB debe ser siempre menor que $macMaxCSMABackoffs$. Si NB excede este límite, la transmisión se cancela y el protocolo informa a las capas superiores de la pila de protocolos acerca de este hecho.

Otro periodo de tiempo importante que se debe tener en cuenta durante una transmisión de paquetes es el espacio entre tramas (IFS, *Interframe Space*). Los valores IFS están relacionados con el tamaño del paquete en el IEEE 802.15.4. Por lo tanto, hay un IFS corto (SIFS), que se aplica si el paquete es corto y su longitud es menor que $aMaxSIFSFrameSize$ (18 bytes). Por el contrario, el IFS se convierte en IFS largo (LIFS) cuando la longitud del paquete es mayor que $aMaxSIFSFrameSize$.

7.2.2. Retraso de transmisión

En el retardo de transmisión de paquetes, se pueden distinguir seis términos diferentes. Cada uno representa una etapa de transmisión diferente durante el proceso global de entrega de paquetes con acuse de recibo. De esta manera, el retardo total se puede dividir en los siguientes términos

$$Delay = T_{Backoff} + T_{CCA} + T_{TA} + T_{packet} + T_{TA} + T_{ACK} + T_{IFS} \quad (7.1)$$

donde estos términos representan

- a) $T_{Backoff}$ es el periodo de *backoff*.
- b) T_{CCA} es el tiempo para realizar la CCA, que usualmente es de 128 μs .
- c) T_{packet} es el tiempo de transmisión del paquete.
- d) T_{TA} es el tiempo de cambio de estado que permite al dispositivo cambiar entre el modo de transmisión y recepción y es normalmente 192 μs para IEEE 802.15.4.
- e) T_{ACK} es el tiempo para la transmisión de un paquete ACK.
- f) T_{IFS} es el retardo final que puede ser igual a los tiempos SIFS o LIFS dependiendo de la longitud del paquete.

En el caso de tener una transmisión que no requiera un acuse de recibo, T_{TA} y T_{ACK} desaparecen en la ecuación 7.1. El término más significativo en la lista anterior de retrasos es $T_{Backoff}$, ya que no se puede conocer a priori debido a su naturaleza aleatoria, y porque suele ser mayor que el resto de los términos. El periodo de *backoff* se puede formular como

$$T_{Backoff} = BO_{slots} \cdot T_{BO_{slots}} \quad (7.2)$$

donde el primer término BO_{slots} es el número aleatorio de periodos de *backoff*, que la mota incluye antes de la transmisión de paquetes, y $T_{BO_{slots}}$ es la duración de una ranura. El número BO_{slots} se selecciona aleatoriamente de manera uniforme en el intervalo (0 a $2^{BE} - 1$) e inicialmente el valor medio de este término es 3.5. Además de todos los retrasos implicados en una transmisión del paquete, hay otra contribución que viene del sistema operativo (OS). Cuando se envía o recibe un paquete, el sistema operativo debe procesar el paquete y reenviar o recibir la información de la aplicación final. Por lo tanto, dos retardos adicionales aparecen al principio y al final del retardo expresado en la ecuación 7.1. Estos retrasos son:

- a) Tiempo de envío en el transmisor requerido para componer el mensaje y dar el orden de transmisión a la capa MAC.
- b) Tiempo de recepción en el receptor para procesar el mensaje y reenviar esta información a la aplicación de destino.

7.2.3. Simulación del rendimiento

Los algoritmos de localización requieren el intercambio de muchos paquetes de datos con las balizas para obtener los valores RSSI necesarios. En este contexto, la evaluación del rendimiento de las redes IEEE 802.15.4 es importante para conocer el ancho de banda máximo y la tasa de intercambio de paquetes que se pueden lograr. En este experimento, el rendimiento máximo de la red se determina usando el simulador Cooja [131] y los componentes TinyOS [132] que se ejecutan en las motas TelosB [133]. La topología de red considerada es de estrella, donde el receptor y todos los transmisores están en el mismo dominio de *broadcast* y la longitud del paquete se fija en 23 bytes. La implementación del protocolo CSMA para el dispositivo CC2420 en

la distribución de TinyOS difiere ligeramente de la versión estándar. En este caso, los periodos de *backoff* se seleccionan utilizando un número aleatorio (*rand*) y se calcula como

$$BO_{slots} = rand \text{ mod}(31 \cdot CC2420_BACKOFF_PERIOD) + CC2420_MIN_BACKOFF \quad (7.3)$$

donde *mod* es la operación módulo y *rand* es un valor aleatorio. Las constantes *CC2420_BACKOFF_PERIOD* y *CC2420_MIN_BACKOFF* son iguales a 10, por defecto. Dado que $T_{BO_{slots}}$ se mide con un temporizador de 32KHz, $T_{Backoff}$ está en el rango de 0.32 a 10 ms. Si el canal está ocupado, el *backoff* cambia y se calcula como

$$BO_{slots} = rand \text{ mod}(7 \cdot CC2420_BACKOFF_PERIOD) + CC2420_MIN_BACKOFF \quad (7.4)$$

con valores que están en el intervalo de 0.3125 a 2.5 ms. En estas condiciones, la transmisión sigue el algoritmo CSMA sin ranurar representado en la Figura 7.1. La evaluación efectuada estima el rendimiento total de la red definido como el porcentaje de tiempo en el que el canal está ocupado con una transmisión satisfactoria de paquetes. La Figura 7.2 muestra los resultados obtenidos con tres valores diferentes de nodos y tasas de transmisión de paquetes. Inicialmente cuando el número de nodos aumenta, también lo hace el rendimiento de la red, especialmente para velocidades de transmisión bajas. Pero debido a las colisiones de paquetes, cuando la velocidad de transmisión aumenta demasiado el rendimiento disminuye, especialmente cuando el número de nodos es alto. En cualquier caso, se debe observar que ninguno de los escenarios simulados supera el 25% del rendimiento de la red. Como resultado, se puede concluir que en aplicaciones que requieren transmisiones en modo ráfaga, el protocolo CSMA básico no es adecuado.

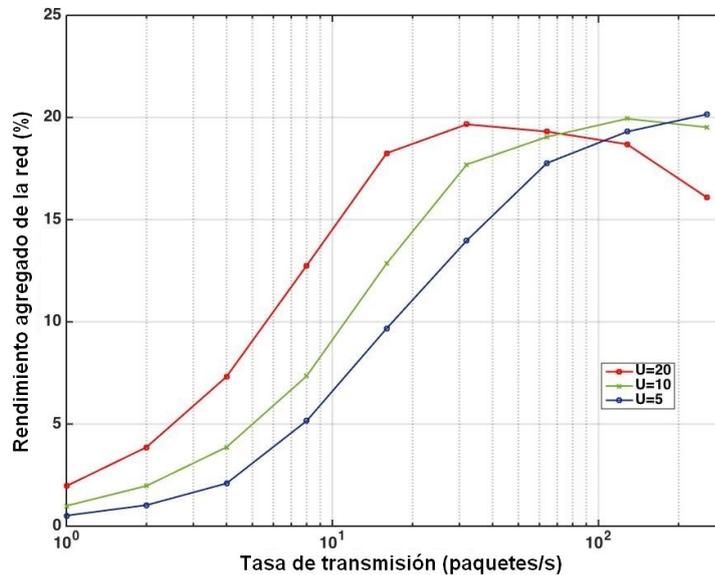


Figura 7.2: Rendimiento total de la red para diferentes velocidades de transmisión y número de objetos móviles (U).

7.3. Nuevo protocolo MAC

7.3.1. Supuestos iniciales

Como se indicó en la sección anterior, el protocolo CSMA estándar no es apropiado en sistemas de localización con muchos objetos móviles y balizas, donde los objetos móviles tienen que adquirir valores RSSI en ambos lados (baliza y objeto móvil), con múltiples niveles de potencia y diferentes canales en transmisiones en modo ráfaga. La propuesta de un nuevo protocolo de acceso que pueda cumplir los requisitos antes mencionados se lleva a cabo siguiendo los siguientes supuestos:

- I Hay un canal, denotado Ch1, que se utiliza para propósitos de señalización.
- II Las balizas anuncian su disponibilidad utilizando paquetes de *broadcast*.

- III Los objetos móviles que reciben estos paquetes pueden reservar la baliza para las transmisiones subsiguientes utilizando el procedimiento de *Request to Send* y *Clear to Send* (RTS/CTS).
- IV La secuencia de transmisiones, incluida la lista de canales y niveles de potencia que se utilizan durante el intercambio de paquetes con una baliza, está predefinida y fijada de antemano y todos los objetos móviles siguen la misma secuencia.
- V El número total de paquetes intercambiados para recoger los valores de RSSI depende de tres factores:
 - a) número de canales de frecuencia probados (designados como K).
 - b) número de niveles de potencia considerados (L).
 - c) retransmisiones para una combinación fija de un canal y un nivel de potencia (N).
- VI Después de recibir un paquete RTS o CTS, otras balizas y objetos móviles dejan de enviar paquetes durante el tiempo que el objeto móvil necesita para intercambiar todos los paquetes en el primer canal.
- VII El objeto móvil y una baliza tienen un periodo fijo para completar el proceso de intercambio de paquetes en cada canal diferente. Cuando este periodo termina, tienen que cambiar del canal actual al siguiente.

El número de canales, niveles de potencia y retransmisiones son fijos, siendo valores configurados durante la inicialización del sistema. Estos valores proporcionan una relación de compromiso entre la precisión de la ubicación, ya que en general con más información se puede lograr una mayor precisión, y el retraso del sistema necesario para recoger las muestras RSSI.

7.3.2. Propuesta de protocolo

El escenario considerado incluye un número específico de objetos móviles y balizas que transmiten periódicamente paquetes que muestran su disponibilidad. El objeto móvil que primero reserva la baliza usando un intercambio de paquetes RTS/CTS gana el acceso al canal durante un periodo de tiempo

que es suficiente para enviar y recibir N paquetes a cada uno de los niveles de potencia L , en el primer canal del grupo de K de canales seleccionados. Este proceso se puede ver en la Figura 7.3.

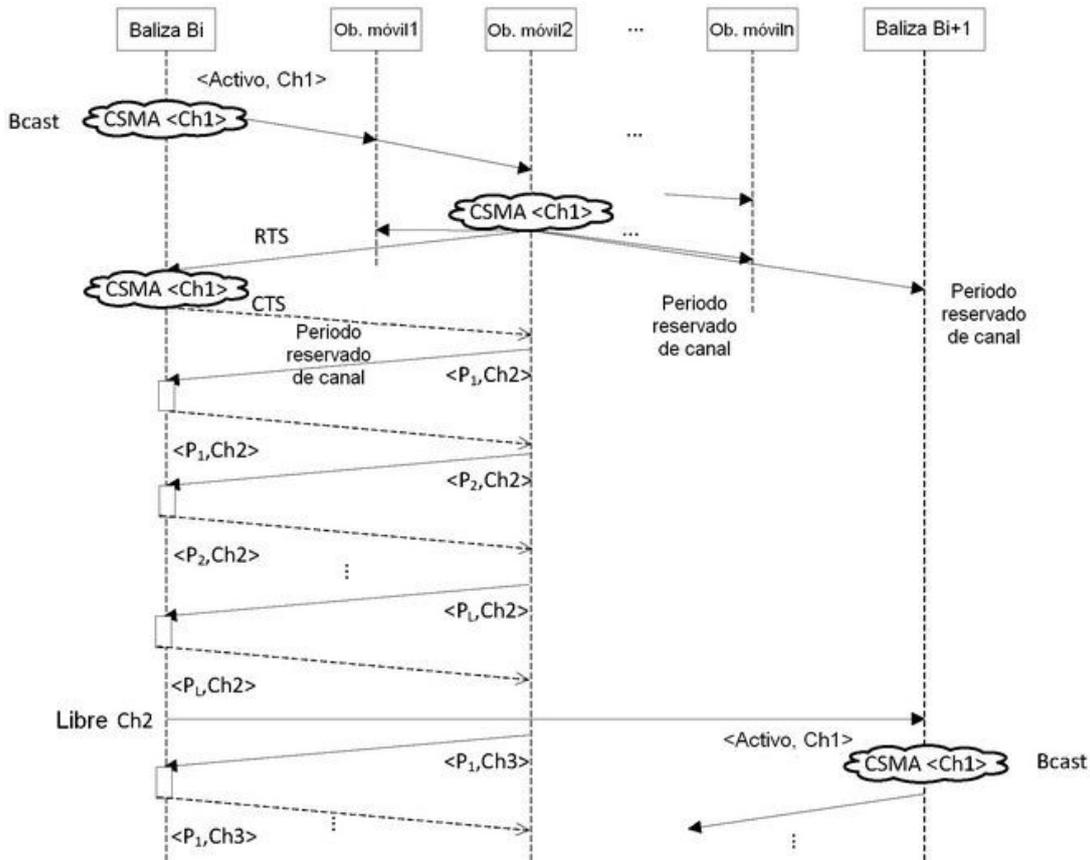


Figura 7.3: Secuencia de selección del objeto móvil y acceso al canal en el protocolo propuesto.

En este caso, la baliza Bi anuncia su disponibilidad transmitiendo paquetes de *broadcast* en el canal Ch1. Esto se representa en la Figura 7.3 con el símbolo (CSMA $\langle \text{Ch1} \rangle$) y el paquete $\langle \text{Activo, Ch1} \rangle$, que indica la transmisión del paquete Activo usando el protocolo CSMA. Después de la recepción de este paquete, el objeto móvil 2 reserva la baliza Bi utilizando el mecanismo RTS/CTS. Este proceso implica la transmisión de dos paquetes RTS

y CTS utilizando el protocolo CSMA. El resto de objetos móviles y balizas que han recibido los paquetes RTS o CTS inician un temporizador con un tiempo de desbordamiento igual al tiempo reservado del canal. Durante este periodo, las balizas detienen las transmisiones de paquetes porque el canal está ocupado.

A continuación, el objeto móvil 2 inicia el proceso de intercambio de paquetes con la baliza B_i utilizando el canal Ch2. La secuencia comienza con un nivel de potencia P_1 ($\langle P_1, \text{Ch2} \rangle$) en la Figura 7.3) y finaliza con un nivel de potencia P_L . Una vez que la baliza B_i y el objeto móvil 2 han intercambiado los paquetes requeridos para todos los niveles de potencia (de P_1 a P_L), pasan al canal Ch3 y comienzan una secuencia similar. En este instante, los temporizadores de canal reservado se disparan y, dado que Ch2 se ha liberado, otras balizas (por ejemplo, B_{i+1} en la Figura 7.3) pueden reanudar el anuncio de su disponibilidad utilizando Ch1.

Durante el proceso de intercambio de paquetes con la baliza B_i en los diferentes canales Ch2, Ch3, ..., Chk, el objeto móvil 2 puede acceder al canal sin tener que implementar el protocolo CSMA, ya que ninguno del resto de usuarios o balizas puede transmitir durante este periodo. Una vez que el objeto móvil 2 finaliza la transmisión en el primer canal Ch2, y el tiempo de reserva del canal ha terminado, el resto de objetos móviles y balizas reinician sus dispositivos de transmisión. Si cualquier otro objeto móvil encuentra una baliza libre que está preparada para intercambiar paquetes (por ejemplo baliza B_{i+1} en la Figura 7.3), después del RTS/CTS *handshake* pueden comenzar la transmisión en el canal Ch2, ya que el primer objeto móvil (objeto móvil 2) ya lo liberó. Por lo tanto, el protocolo aprovecha la capacidad de multiplexación de frecuencia del sistema cuando se deben probar varios canales, lo que permite que diferentes objetos móviles intercambien paquetes de prueba con las correspondientes balizas en paralelo. Pero, para mantener baja la complejidad del protocolo, la secuencia en la que se prueban los canales siempre es la misma.

Las secuencias de acceso a los canales para varios objetos móviles que intercambian paquetes con diferentes balizas se pueden ver en la Figura 7.4. Se debe notar que un objeto móvil y una baliza tienen un periodo fijo para completar el proceso de intercambio de paquetes en cada canal diferente y deben cambiar del canal actual al siguiente cada vez que finaliza este periodo.

En la Figura 7.4, el objeto móvil ID_k intercambia paquetes con la baliza B_1 usando el canal Ch2 para todos los niveles de potencia considerados en el

7.3.3. Análisis del consumo de energía

El consumo de energía es un problema central en el diseño de WSN. Estas redes se despliegan con frecuencia al aire libre, en lugares donde es difícil acceder a la mota para reemplazar las baterías. En estos escenarios, el funcionamiento de la red puede alargarse reduciendo el consumo de energía de la mota, lo que generalmente conduce a la implementación de algún ciclo de trabajo en el funcionamiento de los dispositivos.

El principal inconveniente de esta solución es que normalmente causa un aumento del retardo de transmisión, ya que ambas motas (emisor y receptor) tienen que esperar y coordinar los periodos de funcionamiento de sus dispositivos inalámbricos para realizar la transmisión. Sin embargo, los sistemas de localización presentan algunas diferencias al respecto. Aunque la infraestructura subyacente también se basa en las motas WSN, estos sistemas se despliegan principalmente en ambientes de interior y se puede acceder fácilmente a las motas de la red para reemplazar sus baterías. Además, las balizas del sistema, que forman parte de la infraestructura de red, se colocan en posiciones fijas y se pueden conectar a la red eléctrica. Por otro lado, dado que el objetivo principal del protocolo MAC propuesto es la reducción del retraso en la recopilación RSSI, la inclusión de un ciclo de trabajo en los dispositivos no es aconsejable.

En consecuencia, el protocolo MAC propuesto mantiene permanentemente el dispositivo inalámbrico en estado de recepción. Sólo cuando se transmite un paquete, el protocolo cambia el estado del dispositivo de recepción a transmisión. Con esta configuración de los dispositivos, el consumo de energía será mayor en comparación con cualquier otro protocolo de capa MAC que establezca un ciclo de trabajo en el funcionamiento de los dispositivos, pero mantener constantemente el dispositivo en el estado de escucha disminuye significativamente el retardo de transmisión. Además, el aumento del consumo de energía no es tan crítico en los sistemas de localización de interiores, ya que los usuarios de dispositivos móviles pueden reemplazar las baterías de las motas con facilidad y las balizas estáticas pueden conectarse a la red eléctrica.

El consumo de energía de la mota del objeto móvil se puede determinar considerando los periodos de tiempo en que la mota está en recepción o en transmisión. Se asume que por defecto la mota está en modo de recepción, a menos que la mota esté transmitiendo un paquete. En este último caso, el

consumo de energía cambia de acuerdo con el nivel de potencia configurado en la transmisión de paquetes. Por lo tanto, el consumo de energía de la mota del objeto móvil para recopilar todos los valores de RSSI se puede expresar como

$$E = \sum_B ((T_d - \sum_L T_{txL}) \cdot P_{rx} + \sum_L T_{txL} \cdot P_{txL}) \quad (7.5)$$

donde los términos anteriores representan:

- a) T_d es el retraso en el proceso de recopilación RSSI.
- b) T_{txL} es el tiempo total que transmite paquetes con nivel de potencia L .
- c) P_{rx} es el consumo de energía de la mota en el estado de recepción.
- d) P_{txL} es el consumo de potencia de la mota en el estado de transmisión con nivel de potencia L .
- e) B es el número de balizas que se prueban en el proceso de recopilación de RSSI.

7.4. Resultados

7.4.1. Resultados de la simulación

La primera evaluación considera la estimación del retardo total necesario para recopilar todas las muestras de RSSI. El escenario simulado, implementado en el simulador de Cooja, comprende una baliza y un objeto móvil que intercambian paquetes para adquirir todos los valores RSSI. Ambos elementos se implementaron utilizando motas TelosB y el programa se implementó con TinyOS. En los experimentos, se han considerado diferentes números de canales y niveles de potencia en el proceso de muestreo de RSSI. Por el contrario, el número de retransmisiones se mantuvo fijo ($N = 10$).

Debe observarse que el proceso de intercambio de paquetes siempre implica la transmisión de dos paquetes en direcciones opuestas, es decir, el primer paquete desde la mota del objeto móvil a la baliza y un segundo paquete desde la baliza a la mota del objeto móvil. Por lo tanto, el número total de paquetes que se transmiten en ambas direcciones es:

$$N^{\circ} \text{ total de paquetes} = 2 \cdot N \cdot K \cdot L \cdot B \quad (7.6)$$

donde el factor 2 proviene de los dos paquetes transmitidos en ambas direcciones, N es el número de retransmisiones, K es el número de canales, L es el número de niveles de potencia y B es el número de balizas. Por ejemplo, cuando $N = 10$, $L = 5$, $K = 5$ y $B = 1$, el número total de paquetes es 500. En la aplicación programada con TinyOS, el tiempo de envío, el tiempo recibido, el tiempo del paquete y el tiempo promedio de reducción fueron medidos experimentalmente y sus valores fueron de 2.2, 1.8, 0.9 y 5.1 ms respectivamente.

La suma de estos valores con el resto de los términos en la ecuación 7.1 proporciona el retraso total en la transmisión y recepción de un paquete de aproximadamente 10 ms. Este retraso multiplicado por el número de paquetes proporciona una estimación del retraso total requerido para recopilar todas las muestras de RSSI. Para el ejemplo anterior, el retraso total es del orden de cinco segundos.

Los resultados en la Figura 7.5 comparan dos casos:

- (a) cuando las motas ejecutan el nuevo protocolo MAC propuesto, descrito como “sin CSMA”.
- (b) cuando las motas ejecutan el protocolo MAC estándar, descrito como “con CSMA”.

Como se puede ver en la Figura 7.5, el protocolo propuesto sin CSMA acorta significativamente el retraso total de la recopilación en comparación con el caso con CSMA y reduce el tiempo a la mitad. Esto se debe a la implementación de TinyOS del CSMA que incluye un tiempo de *backoff* promedio que es aproximadamente igual a la suma del resto de retrasos involucrados en la transmisión de un paquete. Por lo tanto, los resultados en la Figura 7.5

demuestran la reducción de retardo total que se puede lograr con el protocolo MAC propuesto.

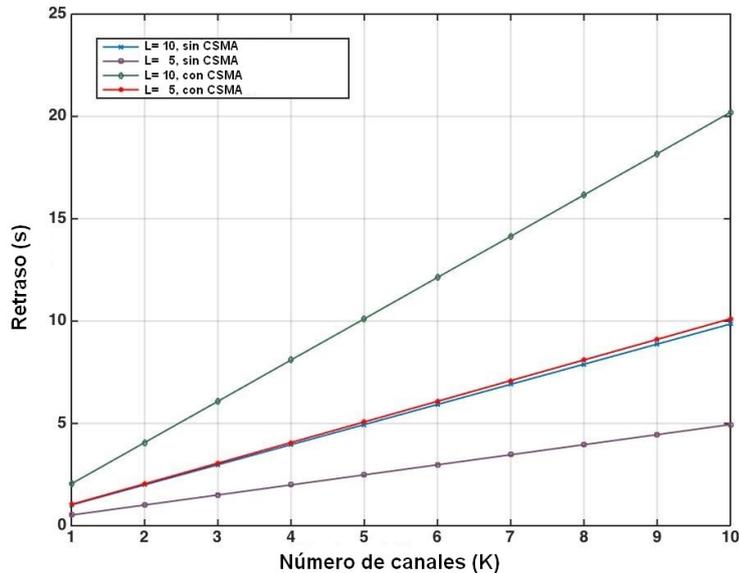


Figura 7.5: Retraso para recopilar los valores de RSSI con diferentes números de canales (K) y niveles de potencia (L). El número de retransmisiones (N) en cada combinación de canal y nivel de potencia es fijo e igual a 10.

La segunda evaluación se basó en el rendimiento total de la red logrado durante el proceso de intercambio de paquetes. Los resultados se obtienen utilizando la misma configuración anterior y simulando el proceso de recopilación utilizando solo un canal ($K = 1$). La Figura 7.6 muestra que la eliminación del CSMA aumenta el rendimiento de la red porque se desperdicia menos tiempo durante el acceso al canal. Por lo tanto, al comparar ambos casos, se puede observar que el rendimiento de la red con el nuevo protocolo duplica el rendimiento obtenido en el caso de CSMA.

Sin embargo, dado que la primera etapa de la reserva de canales (basada en el protocolo de enlace RTS/CTS) todavía utiliza CSMA, el impacto de esta parte se refleja en el resultado global. Aun así, la influencia de esta etapa en el resultado total disminuye cuando se agregan más paquetes y más niveles de potencia a la recopilación de datos RSSI.

Finalmente, la última evaluación presentada se refiere a la energía del

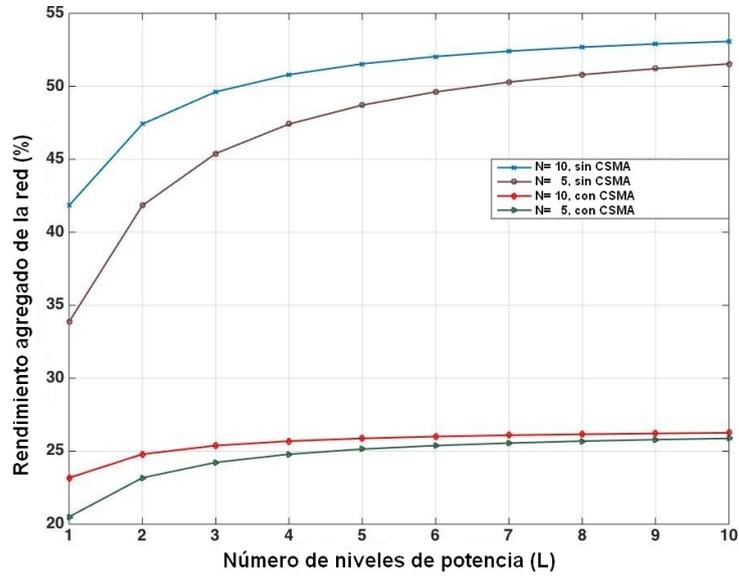


Figura 7.6: Rendimiento total de la red con diferentes niveles de potencia (L) y número de retransmisiones (N).

protocolo MAC propuesto. El escenario considerado es el mismo que en el caso anterior y el análisis de energía tiene en cuenta la corriente del dispositivo inalámbrico CC2420 [86] en cada estado operativo diferente. Estos valores se muestran en la Tabla 7.1.

Modo	Consumo de corriente
Recepción	18.8 mA
Transmisión ($L = -25$ dBm)	8.5 mA
Transmisión ($L = -15$ dBm)	9.9 mA
Transmisión ($L = -10$ dBm)	11.2 mA
Transmisión ($L = -7$ dBm)	12.5 mA
Transmisión ($L = -5$ dBm)	13.9 mA
Transmisión ($L = -3$ dBm)	15.2 mA
Transmisión ($L = -1$ dBm)	16.5 mA
Transmisión ($L = 0$ dBm)	17.4 mA

Tabla 7.1: Corriente del dispositivo inalámbrico CC2420 en los modos de recepción y transmisión con diferentes niveles de potencia. Los valores se toman de la hoja de datos CC2420.

El análisis de la fuente de energía se enfoca en el dispositivo inalámbrico

porque es, por mucho, el componente con el nivel más alto en la mota de TelosB. Suponiendo que el dispositivo inalámbrico tenga una fuente de alimentación de 1.8V y aplique la ecuación 7.5, se puede calcular la energía total para transmitir y recibir todos los valores de RSSI. La Figura 7.7 presenta los resultados obtenidos y se puede observar que el nuevo protocolo MAC sin CSMA supera el caso con CSMA, debido a la reducción de los intervalos de escucha causados por la eliminación de los periodos de contención. También es significativo el aumento de la energía con el número de retransmisiones debido al número total de paquetes y el retraso total en el aumento del proceso de recopilación de RSSI.

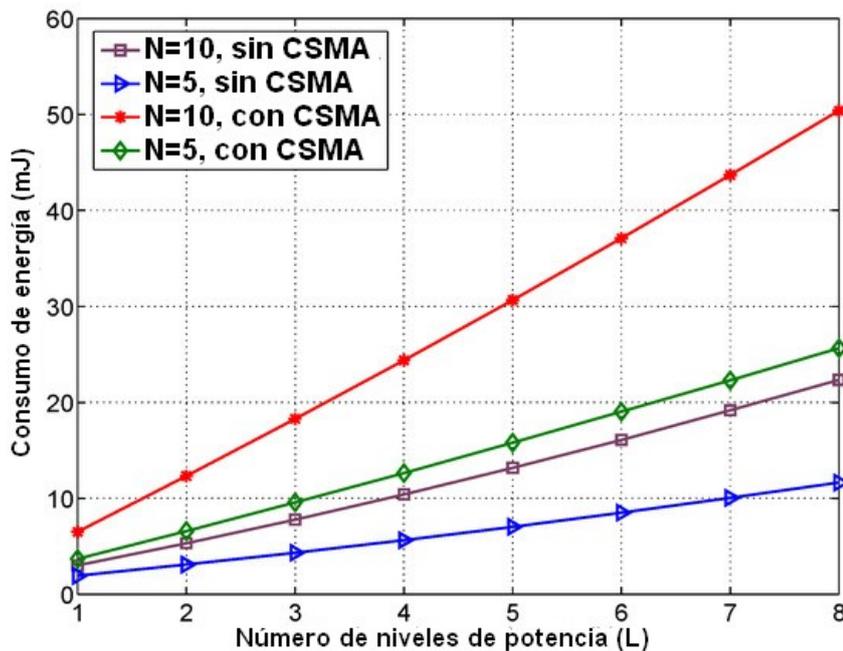


Figura 7.7: Energía para diferentes niveles de potencia (L).

7.4.2. Resultados experimentales

El protocolo propuesto ha sido evaluado experimentalmente en nuestras instalaciones. La configuración experimental viene descrita en la sección 3.3.2.

El proceso de recopilación ha incluido el muestreo de valores RSSI en cada punto de prueba intercambiando paquetes con 6 balizas en ambos lados (dos paquetes fueron enviados en direcciones opuestas para recolectar los valores

RSSI en la baliza y en el objeto móvil). Además, se utilizaron diferentes canales de frecuencia y niveles de potencia durante la recopilación de los valores RSSI en cada punto de prueba. Una vez que se completó la base de datos, una segunda ronda comenzó a recopilar nuevos valores RSSI para localizar a un objeto móvil en el área de configuración. Durante este paso, se tomó una nueva secuencia de valores RSSI en los puntos de prueba. Con estos valores, la posición del usuario se estimó utilizando el algoritmo de localización presentado en 4.5.

La característica principal de este algoritmo es su capacidad para aprovechar la información que se puede extraer cuando se usan múltiples canales y niveles de potencia durante el proceso de muestreo de RSSI. Esta información adicional puede mejorar la precisión de localización a expensas de aumentar el esfuerzo necesario para recopilar los valores de RSSI. Además, el tiempo de localización también se incrementa porque el usuario tiene que transmitir y recibir más paquetes para reunir todos los valores de RSSI en diferentes canales y niveles de potencia. En este contexto, el nuevo protocolo MAC propuesto puede reducir de manera efectiva el tiempo de localización eliminando los periodos de contención cuando se debe recopilar una gran cantidad de valores RSSI tomados en diferentes canales y niveles de potencia.

Como se expuso en la sección 5.3 un aumento en el número de canales mejora la ubicación, independientemente del nivel de potencia. Una conclusión adicional es que en este escenario debido a la diversidad de obstáculos que impiden tener una línea de visión directa entre el usuario y las balizas, los niveles de potencia más altos proporcionan una mejor precisión de ubicación porque con estos niveles se puede cubrir una zona más grande. Igualmente, los resultados presentados en dicha sección muestran que la adición de más valores RSSI recogidos a diferentes niveles de potencia mejora la precisión de localización.

Sin embargo, la mejora en la precisión de la ubicación se logra a expensas del aumento en el número de paquetes intercambiados, lo que provoca demoras más largas en el tiempo de ubicación. Debe notarse que los resultados se obtienen independientemente del protocolo MAC implementado en las motas. Esto se debe a que el protocolo MAC puede cambiar el retraso de recopilación total pero los valores de RSSI adquiridos son los mismos independientemente del protocolo.

Como resultado, el algoritmo de localización estimará la misma posición y ambos protocolos proporcionarán el mismo error de localización. La adi-

ción de más canales y niveles de potencia aunque mejora la precisión de la localización aumenta el retraso en la recopilación de los valores RSSI. En este sentido, la aplicación del protocolo MAC propuesto disminuye este efecto y permite una mayor precisión de localización cuando se establece un retraso máximo en el proceso de recopilación de los valores RSSI.

El último experimento relaciona la precisión de la ubicación con el retraso de la recopilación de los valores RSSI. La configuración es la misma del caso anterior y se realizó en nuestra red real. En este experimento, el número de canales de frecuencia ($K = 6$), retransmisiones ($N = 5$) y número de balizas ($B = 6$) permanecieron fijos. Por el contrario, el número de niveles de potencia varió de 1 a 6 ($L = [1 \text{ a } 6]$). Como se puede ver en la Figura 7.8, los resultados obtenidos establecen un compromiso entre el retraso en el proceso de recopilación de valores RSSI para realizar la localización del objeto móvil, en un punto específico en el escenario considerado, y la precisión de la ubicación que se puede lograr.

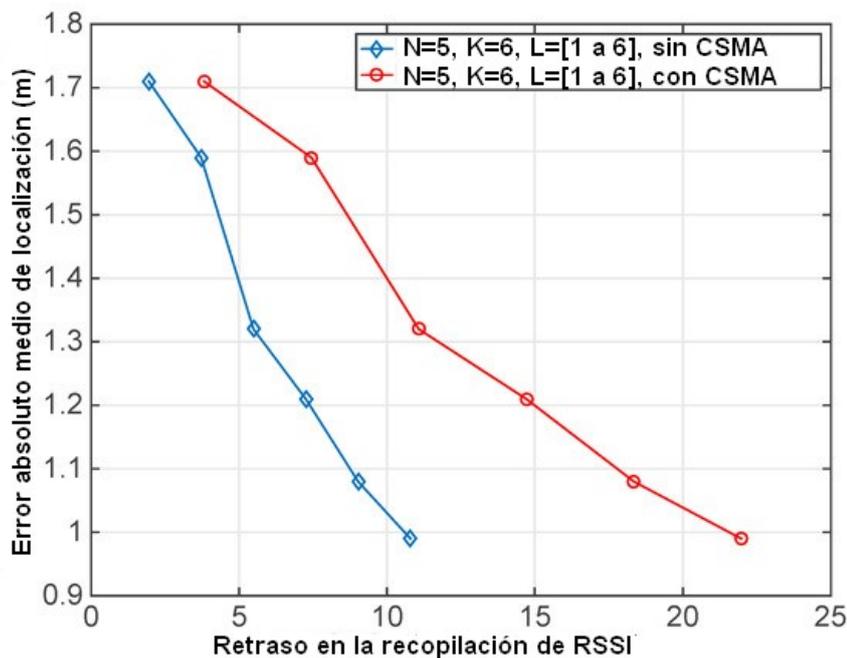


Figura 7.8: Error medio de localización absoluta en el retraso en la recopilación de los valores RSSI.

De esta forma, el nuevo protocolo MAC propuesto permite la reducción del retraso en la recopilación RSSI eliminando los periodos de contención y

permitiendo la transmisión simultánea de varios objetos móviles en diferentes canales de frecuencia. Como se demuestra en la Figura 7.8, el nuevo protocolo MAC supera al protocolo MAC propuesto en el estándar IEEE 802.15.4 y divide por dos el tiempo necesario para recopilar todos los valores RSSI para una combinación específica de K , N , B y L , que establece la precisión de localización. Por lo tanto, se puede concluir que el algoritmo propuesto reduce en dos el retraso de localización para una cierta precisión de localización.

7.5. Conclusiones

Se ha presentado un protocolo MAC adaptado específicamente al proceso de recopilación de los valores RSSI para sistemas de localización en interiores basados en redes IEEE 802.15.4, con múltiples niveles de potencia y canales de frecuencia. Su principal ventaja sobre otros enfoques actuales es que utiliza diferentes canales de frecuencia para evitar los periodos de contención de acceso al medio, sin tener que usar complejos algoritmos de programación o protocolos de sincronización de reloj.

El protocolo propuesto establece un mecanismo inicial de RTS/CTS para reservar una baliza y el acceso al medio. Una vez que un objeto móvil gana el acceso al medio, tiene un periodo de reserva de canal para intercambiar todos los paquetes requeridos en el primer canal sin ninguna interferencia del resto de objetos móviles o balizas. Este hecho permite la eliminación de periodos de contención durante el proceso de intercambio de paquetes subsiguiente. Otros objetos móviles pueden superponer sus procesos de intercambio de paquetes con diferentes balizas utilizando canales que han sido probados y lanzados por objetos móviles anteriores. Los experimentos realizados incluyeron resultados simulados y la localización de un objeto móvil en una implementación real.

Los resultados simulados muestran los beneficios de eliminar los periodos de contención en términos del retraso total de recopilación de los valores RSSI y el rendimiento de la red. Además, el nuevo protocolo propuesto es bastante simple y se puede implementar fácilmente en motas WSN con recursos limitados. Los resultados experimentales obtenidos en un despliegue real con motas TelosB han demostrado la idoneidad del nuevo protocolo MAC para reducir el retraso en la recopilación de RSSI. Además, los resultados reales de implementación proporcionan una compensación entre la precisión de la ubicación y el retraso de la colección de RSSI cuando se agregan múltiples

canales y niveles de potencia.

Capítulo 8

Localización mediante TDOA en UWB

8.1. Introducción

La implementación de los sistemas de localización mediante radiofrecuencia es un gran desafío debido a las propiedades físicas de las señales usadas, que se pueden dividir en ondas continuas (CW) (por ejemplo, WLAN o RFID [134]), y señales de impulso, como la Banda Ultra Ancha (UWB) [102]. Mientras que los sistemas CW sufren de baja precisión o falta de inmunidad contra los efectos multitrayecto, los pulsos UWB cortos son candidatos ideales para aplicaciones de localización en interiores, asegurando la resistencia contra los efectos multitrayecto y proporcionando una resolución temporal superior capaz de medir el tiempo de vuelo de la señal de radiofrecuencia.

Este capítulo se centra en la localización de dispositivos en un escenario cubierto por tres o más balizas ubicadas en posiciones conocidas, empleando TDOA con transmisión de señales UWB. El objeto móvil es un dispositivo simple que sólo tiene que transmitir una secuencia corta de paquetes para iniciar el proceso de localización. El algoritmo de localización no requiere la sincronización entre los relojes de las balizas del sistema y los *offsets* entre los valores de los relojes se estiman conjuntamente con los retrasos necesarios para calcular los tiempos TDOA. Durante la ejecución del algoritmo, también se tiene en cuenta las desviaciones de los relojes, lo que provoca un cambio

continuo de los *offsets* de los relojes a lo largo del tiempo. Este algoritmo es posible gracias a las capacidades de los dispositivos IEEE 802.15.4a UWB [40], que permiten capturar marcas temporales precisas en la transmisión y recepción de cada paquete. Todas las marcas temporales adquiridas en las balizas del sistema se recopilan posteriormente en un ordenador central mediante un enlace de comunicación adicional como WIFI, donde se ejecuta el algoritmo para obtener las coordenadas del objeto móvil. En comparación con los enfoques anteriores recogidos en la bibliografía, el algoritmo propuesto presenta las siguientes ventajas:

- Reduce la complejidad del objeto móvil que requiere transmisiones de paquetes en una sola dirección, del objeto móvil a las balizas.
- Los relojes de las balizas no están sincronizados, lo que evita la transmisión de paquetes de sincronización periódicos.
- Tampoco hay un patrón regular de transmisión de paquetes enviados desde las balizas del sistema. Esta característica ahorra energía y disminuye la cantidad total de tráfico en el canal.
- El algoritmo tiene en cuenta las diferentes desviaciones de los relojes de los osciladores de las balizas para mejorar la estimación de los *offsets* entre ellos.

8.2. Algoritmos TOA y TDOA

Las técnicas de localización TOA y TDOA se han utilizado ampliamente en sistemas de localización al aire libre y, de forma extensa, en aplicaciones acústicas. No obstante, estos métodos no se aplicaron en sistemas de localización en interiores reales hasta el lanzamiento comercial de los dispositivos UWB para redes de sensores. Hoy en día, la disponibilidad de dispositivos comerciales compatibles con el estándar IEEE 802.15.4a ha fomentado la aparición de algoritmos de localización en interiores compatibles con esta tecnología. Un primer enfoque en la implementación de tales sistemas apunta a los algoritmos TOA, que determinan las coordenadas del objeto móvil utilizando los retardos temporales convertidos en distancias desde el objeto móvil a todas las balizas. Por lo tanto, la estimación de la distancia es el primer paso que debe cumplirse y se lleva a cabo utilizando normalmente

el conocido algoritmo TWR (*Two Way Ranging*) entre dispositivos no sincronizados. Sin embargo, TWR se ve afectado por las imperfecciones de los cristales del reloj, ya que los osciladores utilizados en los dispositivos UWB presentan distintas desviaciones respecto de su frecuencia nominal. Estos pequeños errores en la frecuencia de reloj producen diferentes *offsets* para las dos transmisiones de paquetes en el procedimiento TWR. Esta divergencia afecta a la estimación de los retrasos de TOA y se traduce en inexactitudes de alcance significativas debido a que los relojes deben ser, para poder medir el tiempo de transmisión de las señales de RF en distancias cortas, de muy alta frecuencia. Algunos protocolos propuestos en la bibliografía intentan reducir el impacto de tener diferentes desviaciones de reloj en los resultados de la estimación de la distancia.

Algunos ejemplos de estos protocolos son el algoritmo de rango bidireccional doble (D-TWR) [135], el algoritmo de rango bidireccional simétrico (SDS-TWR) [40], el protocolo TWR sesgado [136] y el protocolo de rango bidireccional N-ary [137]. A pesar de estas mejoras, los algoritmos TOA necesitan la implementación de un proceso de transmisión de dos direcciones, baliza a objeto móvil y viceversa, lo que puede complicar el desarrollo del objeto móvil y retrasar la estimación de la localización si la estimación de la distancia se realiza con muchas balizas.

Los métodos TDOA, por el contrario, sólo comprenden transmisiones de paquetes en una dirección. En este grupo de algoritmos, la localización se basa en la diferencia del tiempo de llegada de un paquete transmitido desde el objeto móvil y recibido simultáneamente en todas las balizas [138]. Sin embargo, este esquema de señalización más simple tiene el problema de requerir una sincronización de tiempo precisa entre los relojes de las balizas. En [139], esta sincronización se logra mediante una conexión por cable entre las balizas del sistema, pero esta solución impide implementaciones rápidas y hace que el sistema sea más costoso. También hay artículos que proponen protocolos inalámbricos para realizar la sincronización de tiempo combinada posteriormente con una estimación de la distancia [140] [43–46]. Los principales inconvenientes de estas propuestas son la sobrecarga introducida en el algoritmo y el requisito de transmitir paquetes de sincronización periódicos. Además, la precisión de localización está condicionada por la precisión obtenida en la sincronización de los relojes de las balizas. Los trabajos en las referencias [47] y [141] presentan algoritmos TDOA que se consideran sin sincronización, pero las balizas en estas referencias todavía tienen que transmitir paquetes regularmente siguiendo un patrón predefinido para adquirir las marcas temporales. Finalmente, el trabajo en [48] presenta un método de

localización TDOA sin sincronización de tiempo o transmisiones periódicas de paquetes. El algoritmo comienza cuando el objeto móvil emite una señal de referencia e implementa la retransmisión desde una baliza para determinar los retrasos de TDOA en el resto de las balizas. Sin embargo, el algoritmo fue diseñado para funcionar con señales acústicas y asume que los *offsets* de tiempo entre los relojes de las balizas son constantes durante el proceso de localización. Esta suposición puede ser factible cuando están involucrados relojes de baja frecuencia y señales acústicas. Pero los cristales de alta frecuencia, como los que se usan para medir las diferencias de tiempo en la transmisión de la señal de RF, se ven afectados por diferentes desviaciones de la frecuencia de reloj que producen una variación continua de los tiempos de *offset* entre los relojes de las balizas. Por lo tanto, el algoritmo debe considerar estas diferencias para predecir los valores correctos de *offsets* entre estos relojes.

Así pues, para poder aplicar el algoritmo TDOA es necesario sincronizar los relojes de las balizas o conocer los *offsets* entre sus relojes. En nuestro algoritmo, el problema de la estimación de los *offsets* entre los relojes de las balizas se resuelve suponiendo que los relojes de las balizas tienen un comportamiento lineal a nivel local, es decir, dentro de breves períodos de tiempo, y aplicando una regresión lineal para predecir los valores de *offsets* futuros.

8.3. Nuevo algoritmo TDOA

8.3.1. Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema de localización comprende m balizas, donde m debe ser igual o mayor que 4, cuyas posiciones son conocidas. El objeto móvil es el objetivo que se debe localizar y es el dispositivo que inicia el proceso. Por lo tanto, las balizas durante los periodos de inactividad permanecen escuchando el canal, a la espera de una transmisión de paquetes inicial desde el objeto móvil. El sistema incluye un ordenador central donde todas las marcas temporales recopiladas son centralizadas y procesadas. El procedimiento de localización es iniciado por el objeto móvil, sin embargo, la estimación de los diferentes desviaciones de reloj de los osciladores de las balizas requieren la transmisión de más de un paquete desde el objeto móvil.

Usando una secuencia de tres o más transmisiones, se puede recopilar una adquisición constante de las marcas temporales igualmente espaciadas en cada baliza, lo que permite el cálculo de la regresión lineal correspondiente. Una vez que la secuencia de transmisiones desde el objeto móvil termina, cada baliza transmite en un orden prefijado un paquete que se recibe en el resto de balizas que capturan marcas temporales adicionales. Estas últimas marcas se utilizan para determinar los *offsets* de reloj entre los osciladores de las balizas en ese momento. El sistema requiere al menos cuatro balizas porque hay una de ellas que sólo sirve para determinar los *offsets* de tiempo entre el resto, y en la aplicación del algoritmo TDOA se necesitan diferencias de tiempo de un mínimo de tres balizas. La baliza seleccionada con el fin de estimar los *offsets* de tiempo es la más cercana al objeto móvil. Esto no se conoce de antemano y debe determinarse utilizando las marcas temporales capturadas y transferidas al ordenador central. En la Figura 8.1 se muestra un ejemplo de la secuencia de paquetes transmitidos durante todo el proceso de localización con cuatro balizas.

El resto de esta sección describe el proceso llevado a cabo para determinar los retrasos de TDOA en las balizas. Para estos cálculos, se han considerado los *offsets* y las desviaciones del reloj, lo que permite una estimación más precisa de los retardos temporales TDOA sin la necesidad de repetir la transmisión de paquetes de sincronización.

8.3.2. Algoritmo

El objeto móvil inicia el proceso de localización transmitiendo una secuencia de paquetes. Una vez completada esta secuencia, cada baliza transmite un paquete siguiendo un orden prefijado, como se representa en la Figura 8.1. Todas las marcas temporales capturadas en las balizas se recopilan en un ordenador central donde se ejecutan los algoritmos de localización. El algoritmo propuesto se divide en dos etapas, la primera etapa implica la determinación de la baliza más cercana al objeto móvil, mientras que la segunda calcula la posición del objeto móvil.

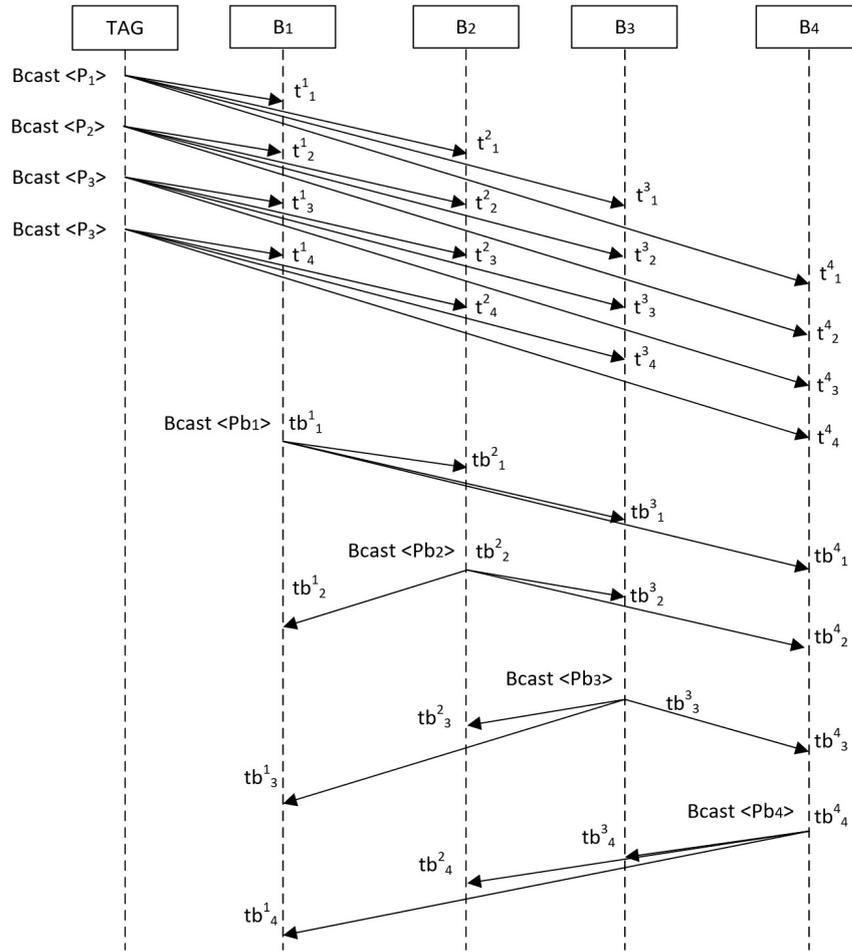


Figura 8.1: Secuencia de paquetes para obtener las marcas temporales para 4 balizas.

8.3.2.1. Obtención de la baliza más cercana

En primer lugar, el sistema debe determinar cuál es la baliza más cercana al objeto móvil. Este paso facilita la estimación de las diferentes desviaciones de relojes porque las diferencias de tiempo tomadas de esta manera presentan valores similares para el objeto móvil y la baliza más cercana. Para este fin, toda la secuencia de paquetes (Bcast<P_k>), representado en la Figura 8.1, se transmite. Luego, se procesan las marcas temporales t_k^j adquiridas en cada baliza, con $j = 1, \dots, m$ y siendo k el índice que identifica el paquete en la secuencia $k = 1, \dots, n$. En la Figura 8.1, n se ha seleccionado como 4. La determinación de la baliza más cercana se realiza comparando las marcas

temporales capturadas en cada baliza después de la recepción del paquete desde el objeto móvil con el índice $k = n$. Sin embargo, dado que los relojes de las balizas no están sincronizados, esta comparación sólo se puede hacer después de calcular y cancelar las diferencias de tiempo y de desviación de reloj entre los osciladores de las balizas. Para este fin, hay una selección inicial de una baliza que actúa como un reloj de referencia y el resto se traducen a su escala calculando los *offsets* de tiempo correspondientes. La baliza seleccionada es la que satisface

$$t_n^i = \min\{t_n^j\}, \quad (8.1)$$

donde t_n^j representa la marca temporal de la baliza B_j para el paquete en la secuencia inicial con índice n .

Los *offsets* de tiempo entre la baliza de referencia B_i y el resto se calculan utilizando las marcas temporales adquiridas con los paquetes intercambiados por las balizas, véase la Figura 8.1. De esta manera, los tiempos de *offset* entre las balizas B_i y B_j se calcula de la siguiente manera

$$of f_{i,j} = \frac{(tb_i^i - tb_i^j) + (tb_j^i - tb_j^j)}{2}, \quad (8.2)$$

donde i es la baliza de referencia y j es una del resto de balizas.

En la determinación del *offset*, se debe considerar la diferencia de las desviaciones de reloj presentes en ambas balizas. En esta etapa, esto se calcula aproximadamente tomando las diferencias de tiempo (td) en ambos relojes durante la medición del mismo intervalo de tiempo

$$td_{i,j} = (t_n^i - t_1^i) - (t_n^j - t_1^j), \quad (8.3)$$

donde $td_{i,j}$ mide las diferencias de tiempo de ambos relojes para contar el intervalo que va desde la primera hasta la última transmisión de paquetes desde el objeto móvil. En la ecuación anterior, i representa la baliza de referencia B_i y j es una de las restantes B_j . Además, el índice 1 indica el primer y n el último paquete transmitido por el objeto móvil respectivamente.

Luego, utilizando la ecuación 8.2, se puede cuantificar el efecto de las diferentes desviaciones de reloj en el intervalo utilizado para calcular las compensaciones de tiempo, proporcionando los siguientes términos de compensación de tiempo (tc)

$$tc_{i,j} = \frac{td_{i,j}}{(t_n^i - t_i^i)}(tb_j^i - tb_i^i), \quad (8.4)$$

donde i indica que la baliza de referencia B_i y j está relacionada con la baliza B_j , para $i \neq j$.

Una vez que se calculan los tiempos de *offset* y los términos de compensación de tiempo, se puede obtener el tiempo de llegada a cada baliza. Debe notarse que estos tiempos pueden compararse porque todos se expresan en la base de tiempos de la baliza de referencia después de cancelar los tiempos de *offset* entre ellos y los términos de compensación de desviación de frecuencia entre los relojes.

- $TOA_i = t_n^i$, que corresponde a la baliza de referencia inicial tomada.
- $TOA_j = t_n^j + off_{i,j} - tc_{i,j}$, para $i \neq j$, que son el tiempo de llegada al resto de balizas.

Luego, el tiempo mínimo de llegada se elige como el mínimo entre los dos valores anteriores $TOA_{min} = \min(TOA_i, TOA_j)$ e identifica la baliza B_{min} que está más cerca del objeto móvil.

8.3.2.2. El TDOA entre balizas

El segundo paso del algoritmo es la estimación de los valores de TDOA entre todas las balizas, con la excepción de la baliza con el tiempo mínimo de llegada B_{min} .

Para dos balizas B_p y B_q , una primera aproximación para calcular el TDOA entre ellas es obtener la diferencia de las marcas temporales capturadas a la llegada de un paquete en la secuencia $k = 1, \dots, n$ de paquetes enviados por el objeto móvil. Por lo tanto, para $k = n$ este TDOA es

$$y_{p-q}^n = t_n^p - t_n^q. \quad (8.5)$$

Sin embargo, la resta directa de estos valores no puede proporcionar el TDOA debido a que el *offset* entre los dos relojes de las balizas en ese instante debe cancelarse.

El cálculo de los *offsets* entre los relojes de balizas se puede realizar utilizando la diferencia del tiempo de llegada a las balizas (TDOAB) del paquete transmitido por B_{min} . Los valores experimentales de la TDOAB entre un par de balizas se calculan utilizando las marcas temporales muestreadas a la llegada de la transmisión de B_{min} .

Por otro lado, el valor teórico del TDOAB se puede calcular utilizando la distancia entre las balizas y la velocidad de la señal de RF. La resta de estos dos valores TDOAB, el experimental y el teórico, proporciona el *offset* entre los dos relojes de las balizas. A pesar de haber calculado el *offset*, todavía hay un problema importante que impide la aplicación de este *offset* en el cálculo de TDOA a partir de los valores de la ecuación 8.5. El problema es la variación del valor del *offset* en el tiempo debido a las diferentes desviaciones de los relojes. Esto es algo que se puede observar en los valores experimentales de las marcas temporales de dos balizas que se muestran en la Figura 8.2. Este gráfico incluye el y_{p-q}^k para $k = 1, \dots, 4$ en los instantes de tiempo t_k^q .

Como puede verse, la secuencia y_{p-q}^k de valores no es constante, pero puede modelarse con una función lineal. Este comportamiento se da en pequeños intervalos temporales, aunque en periodos más grandes el modelo deja de ser lineal. Por lo tanto, una regresión lineal permite la predicción de valores futuros de la secuencia y_{p-q}^k , por ejemplo, en el tiempo tb_i^q donde se recibe el paquete de la baliza de referencia, la cual es $B_i = B_{min}$.

Así pues, el algoritmo realiza una regresión lineal con todos los valores obtenidos en la secuencia de paquetes enviados desde el objeto móvil ($y_{p-q}^k = t_k^p - t_k^q, k = 1, \dots, n$). Este procedimiento se repite para valores de $m - 2$ pares de balizas, ya que quedan $m - 1$ balizas una vez que se selecciona B_{min} , y los retrasos TDOA deben determinarse para al menos $m - 2$ pares de estas balizas.

La regresión lineal proporciona una predicción de la diferencia de tiempo futura, para los paquetes enviados por el objeto móvil, en las balizas B_p y

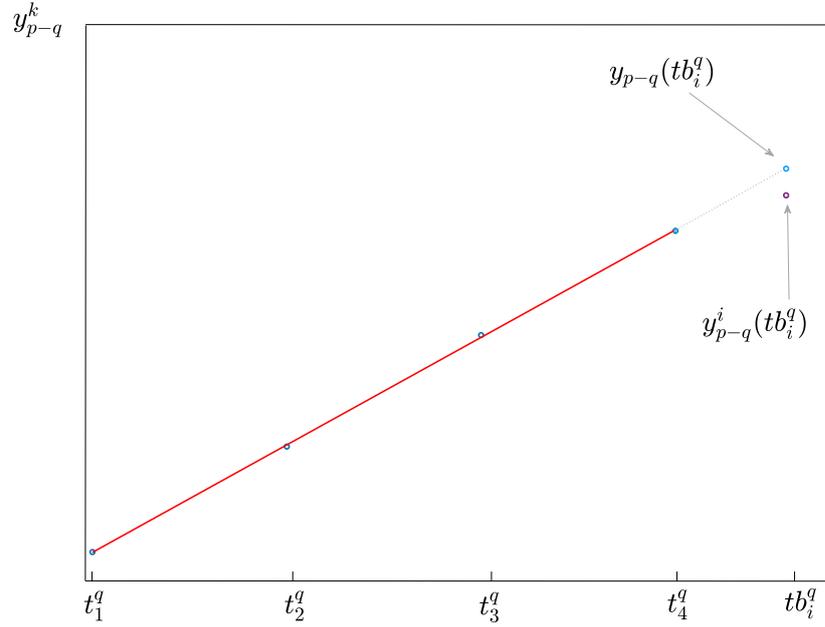


Figura 8.2: Ejemplo de regresión lineal para estimar el valor de y_{p-q}^n en el tiempo tb_i^q .

B_q , es decir $y_{p-q}(tb_i^q)$, en el momento tb_i^q en que se recibe el paquete de la baliza $B_i = B_{min}$. Estos valores se pueden expresar como

$$y_{p-q}(tb_i^q) = \text{off}_{p,q}(tb_i^q) + TDOA_{p-q}, \quad (8.6)$$

donde $\text{off}_{p,q}(tb_i^q)$ es el *offset* entre B_p y B_q en el tiempo tb_i^q y $TDOA_{p-q}$ es la diferencia de tiempo de llegada para el paquete enviado por el dispositivo móvil en las balizas B_p y B_q . Por otra parte, para el mismo tiempo de referencia tb_i^q , la diferencia entre el tiempo de llegada a las balizas B_p y B_q del paquete enviado por la baliza $B_i = B_{min}$ se puede medir experimentalmente como

$$\hat{y}_{p-q}^i(tb_i^q) = tb_i^p - tb_i^q, \quad (8.7)$$

que se puede expresar como

$$\hat{y}_{p-q}^i(tb_i^q) = \text{off}_{p,q}(tb_i^q) + TDOAB_{p-q}, \quad (8.8)$$

donde $TDOAB_{p-q}$ es la diferencia temporal de llegada para el paquete enviado por B_i entre B_p y B_q , que es un valor conocido. Así, combinando las ecuaciones anteriores 8.6 y 8.8, y siendo $\text{off}_{p,q}(tb_i^q)$ la misma en ambos casos, resulta la siguiente expresión

$$TDOA_{p-q} = y_{p-q}(tb_i^q) - \hat{y}_{p-q}^i(tb_i^q) + TDOAB_{p-q}, \quad (8.9)$$

donde $y_{p-q}(tb_i^q)$ se calcula utilizando la regresión lineal, $\hat{y}_{p-q}^i(tb_i^q)$, se obtiene experimentalmente con las marcas temporales recopiladas, como se expresa en la ecuación 8.7, y $TDOAB_{p-q}$ es conocido de antemano.

Esta expresión se puede refinar teniendo en cuenta los cambios en los relojes ocurridos durante la adquisición de los valores TDOA. Por lo tanto, la diferencia en tiempo real de llegada $TDOAB_{p-q}$ que transcurre durante la transmisión de paquetes de la baliza B_i no es la esperada teóricamente debido a las diferentes desviaciones de los relojes. El $TDOAB_{p-q}$ real puede expresarse en términos teóricos, renombrados como ${}^rTDOAB_{p-q}$, siguiendo la ecuación

$$TDOAB_{p-q} = {}^rTDOAB_{p-q} + \frac{td_{p,q}}{(t_n^q - t_i^q)} TDOAB_{p-q} \quad (8.10)$$

es decir,

$$TDOAB_{p-q} = \frac{{}^rTDOAB_{p-q}}{\left(1 - \frac{td_{p,q}}{(t_n^q - t_i^q)}\right)}. \quad (8.11)$$

Por lo tanto, $TDOAB_{p-q}$ incluido en la ecuación 8.9 se puede recalculer utilizando el valor teórico ${}^rTDOAB_{p-q}$, que se calcula utilizando las posiciones de las balizas y la velocidad de la señal, y aplicando la ecuación anterior.

El mismo procedimiento también se puede aplicar en el caso de $TDOA_{p-q}$ porque el valor resultante en la expresión 8.9 es el tiempo real medido, pero

no el teórico, denotado como ${}^rTDOA_{p-q}$, que debe obtenerse considerando las distancias reales y las marcas temporales medidas con relojes perfectos. De esta manera, el valor teórico que se puede derivar del valor $TDOA_{p-q}$ es

$${}^rTDOA_{p-q} = TDOA_{p-q} \left(1 - \frac{td_{p,q}}{(t_n^q - t_i^q)}\right). \quad (8.12)$$

Finalmente, una vez que el algoritmo ha completado el cálculo de los valores ${}^rTDOA_{p-q}$ para $m - 2$ pares de balizas, estas medidas de tiempo se pueden convertir en las coordenadas del objeto móvil aplicando las ecuaciones de la referencia [138].

8.4. Experimentos realizados

En la evaluación del algoritmo se realizaron dos experimentos que comprenden dos implementaciones diferentes. Estas implementaciones se llevaron a cabo utilizando nodos reales construidos combinando una plataforma Raspberry-Pi y dispositivos DWM1000 UWB fabricado por Decawave [142]. La programación de la aplicación se basó en la biblioteca Python DWM1000 [143], que permite a las balizas capturar las marcas temporales correspondientes cada vez que se envía o recibe un paquete. Una vez que la red de balizas recopila todas las marcas temporales requeridas por el algoritmo de localización, sus valores se envían a un ordenador central utilizando una red WIFI separada, donde se realiza el algoritmo de localización y la estimación de la posición. La principal diferencia entre los dos escenarios es el área cubierta y la presencia de obstáculos y paredes.

Por lo tanto, la primera implementación abarca un área relativamente pequeña en un despacho de la ETSE y está destinada a establecer una primera evaluación del algoritmo TDOA en un escenario simple, mientras que el segundo se centra en la evaluación del rendimiento del algoritmo en un área interior más grande con múltiples obstáculos y diferentes salas.

En ambos casos, el objetivo de los experimentos es la localización de un objeto móvil en un plano bidimensional, siendo la altura de la posición del objeto móvil la misma que la de las balizas. La altura a la que se colocan las balizas es de un metro y medio sobre el nivel del suelo.

8.4.1. Primer despliegue

El primer despliegue consistió en 4 balizas que cubrían un área relativamente pequeña dentro de un despacho de la ETSE. En este caso, las balizas se colocaron dentro de una sala rectangular de 6 m x 3 m y se distribuyeron formando una topología rectangular de 2 m x 3 m centrada en el centro de la sala. La precisión alcanzada por el algoritmo propuesto se probó colocando el objeto móvil en dos posiciones diferentes. Además, hay dos parámetros que se modificaron para evaluar su influencia en la precisión del algoritmo. El primer parámetro es el número de paquetes enviados por el objeto móvil y las marcas temporales correspondientes capturadas en cada baliza cuando se reciben estos paquetes. Este valor se denota como n en la definición de las marcas temporales ($y_{p-q}^k = t_k^p - t_k^q, k = 1, \dots, n$) establecidas en la sección anterior. Por lo tanto, la regresión lineal utilizada para estimar el valor $y_{p-q}(tb_i^q)$ puede tener diferentes tamaños de ventana y este parámetro puede afectar al algoritmo general.

Por otro lado, la estimación de la posición del objeto móvil se puede basar en una ejecución única del algoritmo de localización o en el promedio de varias estimaciones de localización tomadas secuencialmente. Estas repeticiones mitigan el efecto de los errores aleatorios que pueden ocurrir en la adquisición de las marcas temporales debidos a la variabilidad del canal inalámbrico. Por lo tanto, el número de repeticiones en la estimación de la posición es el segundo parámetro que se probó durante el proceso de evaluación. Debe notarse que cada repetición implica la retransmisión de todos los paquetes del objeto móvil y las balizas, y el recálculo de la regresión lineal con las nuevas marcas temporales. Por lo tanto, en aplicaciones donde el tiempo de estimación de localización es crítico, se debe establecer un compromiso entre el número de repeticiones y la precisión requerida. Con cada repetición se obtiene un nuevo valor de $rTDOA_{p-q}$. Estos valores se promedian para obtener una estimación más precisa y posteriormente se calcula la posición del objeto móvil aplicando las ecuaciones dadas en la referencia [138].

La evaluación del algoritmo en este escenario se llevó a cabo utilizando dos configuraciones diferentes que se muestran en la Figura 8.3. En la primera configuración, el objeto móvil se colocó fuera del área cuadrada formada por las cuatro balizas, mientras que en la segunda el objeto móvil es situado dentro de esta zona.

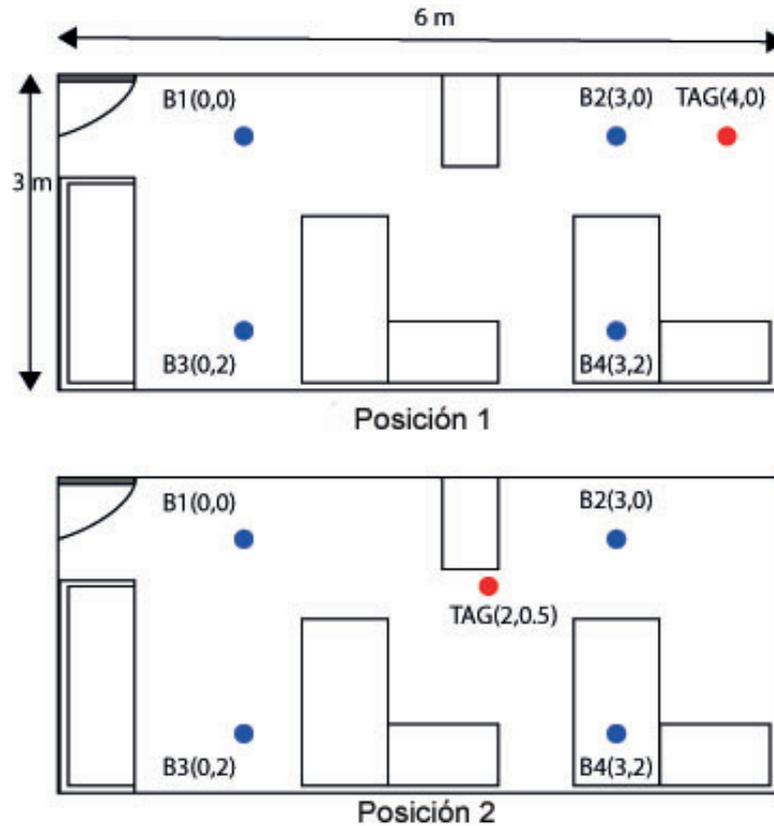


Figura 8.3: Representación de las configuraciones experimentales para la primera implementación.

Las Figuras 8.4 y 8.7 presentan los resultados obtenidos de la precisión de la localización para diferentes valores del tamaño de la ventana de regresión lineal y el número de repeticiones del algoritmo de estimación de las diferencias temporales. Como puede verse, el error de localización absoluto promedio depende de los dos parámetros considerados. El número de repeticiones indica el número de veces que se ha ejecutado el algoritmo de estimación para calcular los valores ${}^rTDOA_{p-q}$. Para comprobar la precisión con la que se consigue estimar los valores ${}^rTDOA_{p-q}$ se muestran las figuras 8.5, 8.6, 8.8 y 8.9. Así, para el despliegue con la primera posición (Figura 8.3, posición 2) se representan los valores medios de ${}^rTDOA_{3-1}$ y ${}^rTDOA_{3-4}$ en las figuras 8.5 y 8.6 respectivamente, para diversos números de repeticiones del algoritmo de estimación. También se indica el intervalo de valores dados por la desviación estándar de las diferencias de tiempos obtenidas. Los valores medios de ${}^rTDOA_{3-4}$ son significativamente mayores que los de ${}^rTDOA_{3-1}$ ya que la diferencia del tiempo de llegada es mayor para la primera pareja

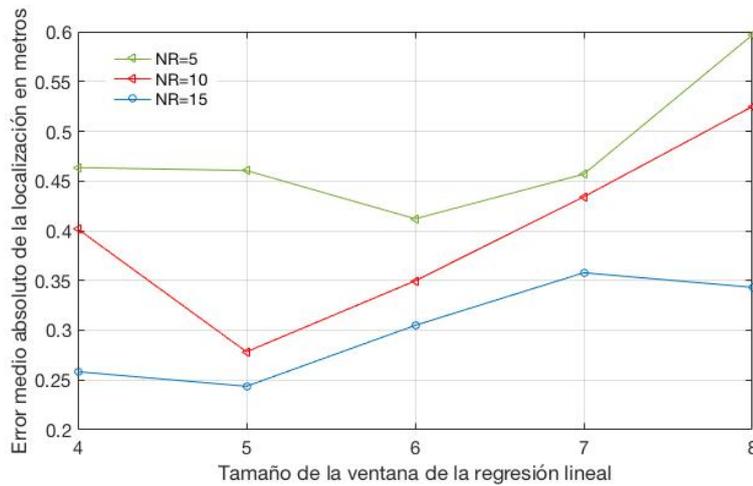


Figura 8.4: Resultados para el primer despliegue y la primera posición del objeto móvil. El algoritmo de estimación de los $rTDOA_{p-q}$ se ejecuta repetidamente NR veces. El tamaño de la ventana es el número de paquetes enviados por el objeto móvil y las marcas temporales utilizadas en la regresión lineal. Los resultados muestran el error de la localización del nodo móvil en función de NR y la ventana de la regresión.

de balizas. De las gráficas se desprende que la desviación estándar está en el orden de $1\ ns$, valor que traducido a distancias nos daría un rango de unos $30\ cm$, que está entorno a la máxima precisión que se alcanza en la localización del objeto móvil. De forma análoga se presentan en las figuras 8.8 y 8.9 los valores correspondientes a la segunda posición del objeto móvil (Figura 8.3, posición 2). En este caso los valores medios de las diferencias temporales cambian debido a la distinta posición del objeto móvil, pero la desviación estándar sigue siendo similar.

A partir de las gráficas anteriores se desprende que inicialmente, un aumento en el número de repeticiones mejora significativamente la precisión del algoritmo, ya que el promedio de varias estimaciones de los valores $rTDOA_{p-q}$ suaviza los errores aleatorios causados por las fluctuaciones del canal inalámbrico. Pero con estas repeticiones, todo el algoritmo debe ejecutarse varias veces, extendiendo el tiempo necesario para completar todo el proceso de estimación de los $rTDOA_{p-q}$. En las Figuras 8.4 y 8.7, el error de localización mínimo se alcanza cuando el número de repeticiones es 15, que es el valor máximo representado en el gráfico. Si el número de repeticiones excede este valor, aunque la precisión de la ubicación aún mejora ligeramente, no compensa el mayor tiempo de localización.

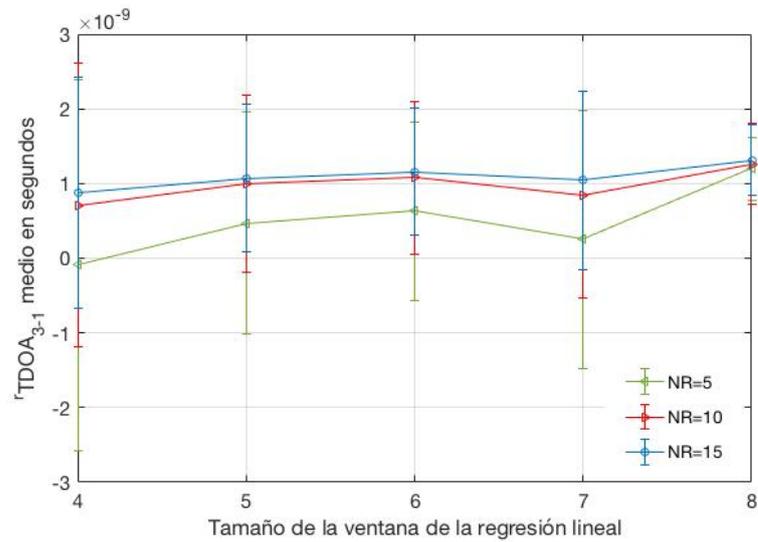


Figura 8.5: Valor medio de $rTDOA_{3-1}$ calculado después de repetir NR veces el algoritmo de estimación para diversos tamaños de la ventana de la regresión lineal, en el primer despliegue y la primera posición del objeto móvil.

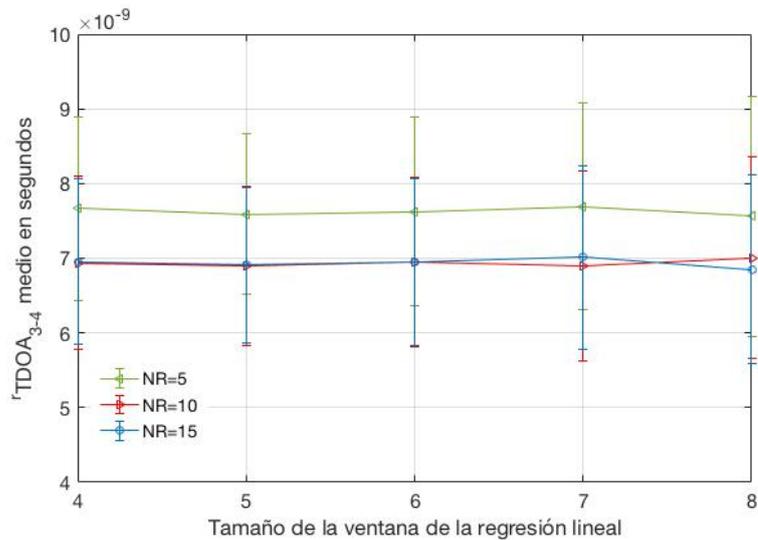


Figura 8.6: Valor medio de $rTDOA_{3-4}$ calculado después de repetir NR veces el algoritmo de estimación para diversos tamaños de la ventana de la regresión lineal, en el primer despliegue y la primera posición del objeto móvil.

Por lo tanto, se puede concluir que una cantidad de repeticiones en el rango de 5 a 15 beneficia a la precisión de la localización, que es del orden

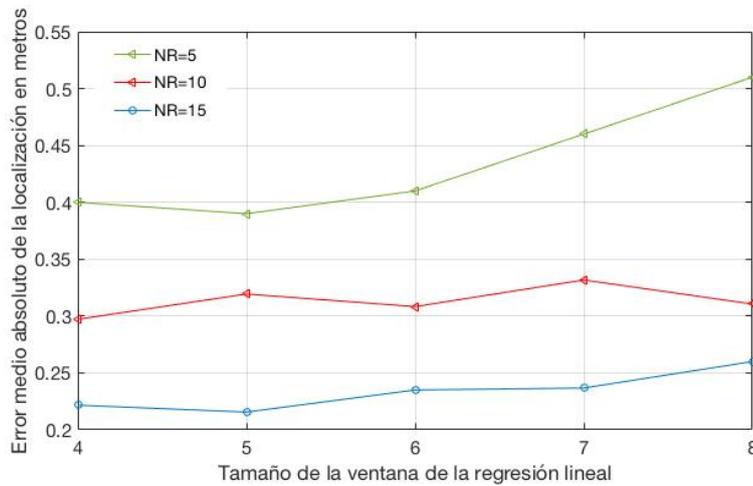


Figura 8.7: Resultados para el primer despliegue y la segunda posición del objeto móvil. El algoritmo de estimación de los $rTDOA_{p-q}$ se ejecuta repetidamente NR veces. El tamaño de la ventana es el número de paquetes enviados por el objeto móvil y las marcas temporales utilizadas en la regresión lineal. Los resultados muestran el error de la localización del nodo móvil en función de NR y la ventana de la regresión.

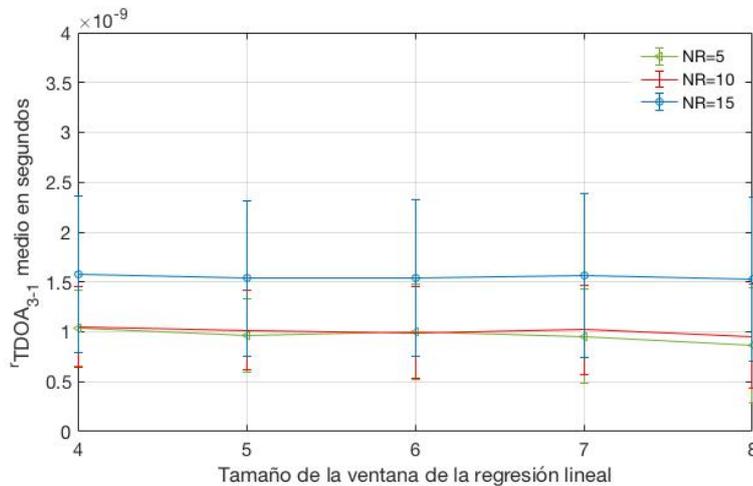


Figura 8.8: Valor medio de $rTDOA_{3-1}$ calculado después de repetir NR veces el algoritmo de estimación para diversos tamaños de la ventana de la regresión lineal, en el primer despliegue y la segunda posición del objeto móvil.

de 20 a 40 cm, pero los valores más grandes de este parámetro retrasan excesivamente la estimación, sin una ganancia de precisión significativa.

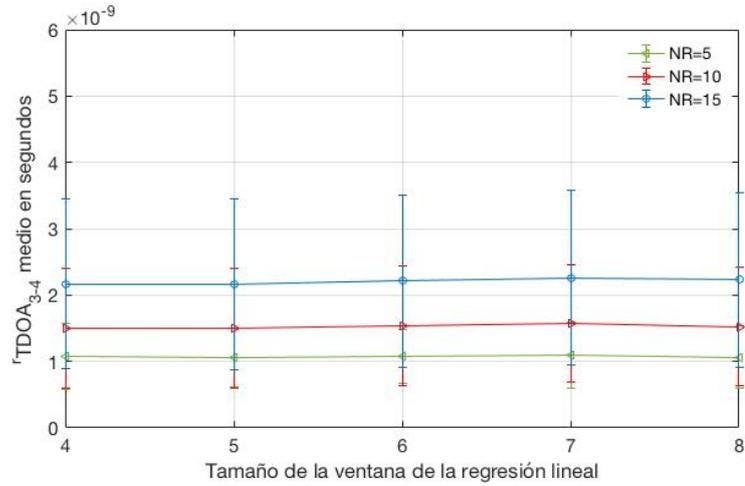


Figura 8.9: Valor medio de $rTDOA_{3-4}$ calculado después de repetir NR veces el algoritmo de estimación para diversos tamaños de la ventana de la regresión lineal, en el primer despliegue y la segunda posición del objeto móvil.

El tamaño de la ventana de regresión lineal también tiene un efecto importante en la precisión del algoritmo. Esto se debe al comportamiento de los relojes de los dispositivos que, por lo general, presentan desviaciones lineales a nivel local en pequeños períodos de tiempo [144]. De esta manera, la regresión lineal puede predecir valores de compensación futuros entre los relojes de dos balizas, pero sólo en cortos períodos de tiempo, porque el modelo lineal ya no es válido para instantes más distantes. En el caso del algoritmo propuesto, como se puede ver en las Figuras 8.4 y 8.7, los tamaños de ventana superiores a 6 no son recomendables porque la precisión de la localización comienza a disminuir. De hecho, la precisión máxima se logra con $n = 5$, siendo este valor adecuado no sólo para minimizar el error de localización, sino también para mantener bajo el número de transmisiones de paquetes de los dispositivos móviles a localizar.

8.4.2. Segundo despliegue

En este caso, la configuración experimental incluye un área que comprende tres oficinas, un laboratorio y el pasillo del edificio principal de la ETSE, el mismo que se utilizó en la sección 3.2.1. Las dimensiones del escenario son 9 m x 16 m y dentro de esta área había una gran diversidad de obstáculos, como paredes, puertas y muebles. Nuevamente, se utilizaron 4 balizas y se

distribuyeron entre el laboratorio, el pasillo y un despacho. La topología de esta configuración se representa en la Figura 8.10 y las imágenes de estas habitaciones se muestran en la Figura 8.11, los puntos azules indican la posición específica de cada baliza y los puntos rojos marcan las posiciones donde se colocó el objeto móvil durante la prueba. Por lo tanto, el experimento incluyó 58 puntos de prueba donde se colocó el objeto móvil y se localizó con las marcas temporales capturadas. En esta evaluación, el tamaño de la ventana de regresión lineal y el número de repeticiones también se modificaron para cubrir un rango diferente de valores para estos parámetros.

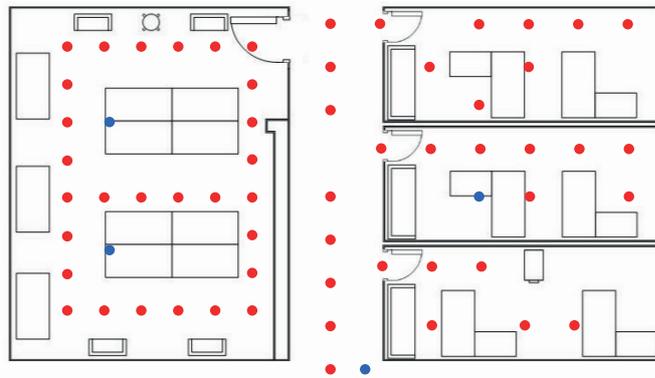


Figura 8.10: Representación de la configuración experimental para el segundo despliegue.



Figura 8.11: Fotos del laboratorio y pasillo del segundo despliegue.

El error medio obtenido para todos los puntos de prueba se presenta

en la Figura 8.12, este error medio se calcula considerando dos promedios diferentes.

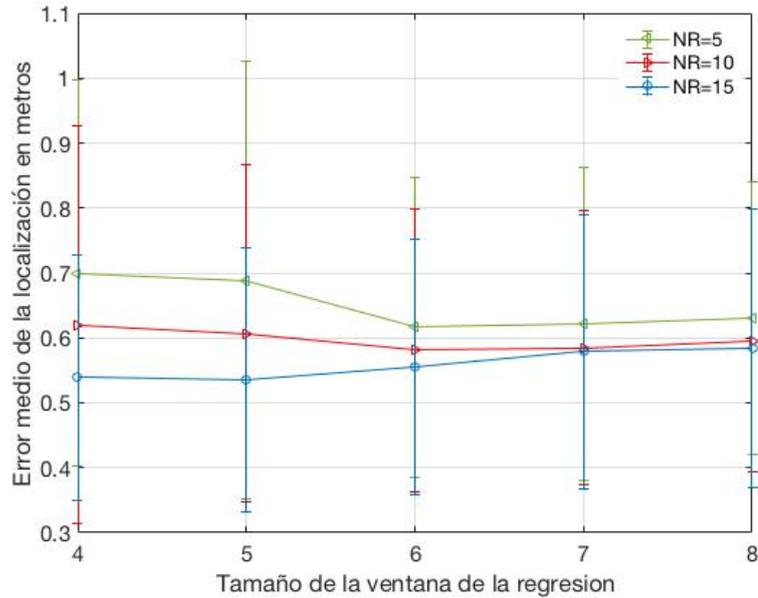


Figura 8.12: Resultados para el segundo despliegue. El algoritmo de localización se ejecuta repetidamente NR veces. El tamaño de la ventana es el número de paquetes enviados por el objeto móvil y las marcas de tiempo utilizadas en la regresión lineal. Los resultados muestran el promedio de los valores de NR en cada punto de prueba y todo el promedio de los valores provenientes de todos los puntos de prueba.

El primer promedio involucra todas las repeticiones NR hechas en un solo punto de prueba, mientras que el segundo combina todos los errores de localización resultantes de cada punto de prueba. En la figura 8.12 el intervalo de valores representa la desviación estándar tomada a partir del error obtenido en los 58 puntos de prueba para cada combinación de NR y tamaño de la ventana de la regresión. El resultado de este segundo experimento es un poco peor que el primero, principalmente porque el escenario es más complejo e incluye obstáculos y paredes. Aun así, el error medio en este caso está en el intervalo de 55 a 65 cm.

8.5. Conclusiones

Se ha presentado el diseño de un algoritmo TDOA para posicionar dispositivos utilizando señales UWB con balizas no sincronizadas. El enfoque considerado realiza la localización utilizando las marcas temporales recopiladas sólo por las balizas, utilizando dispositivos simples, que sólo tienen que transmitir, pero no tienen que recibir paquetes.

El algoritmo ha sido concebido para facilitar la implementación de aplicaciones de baja potencia, evitando la transmisión regular de paquetes de sincronización. El algoritmo utiliza la regresión lineal para predecir los valores de la diferencia de tiempo de llegada futura para los paquetes transmitidos por el objeto móvil, en el instante en que se recibe el paquete de la baliza de referencia y se pueden determinar los *offsets* de tiempo entre los relojes de las balizas.

Además, el algoritmo considera la diferencia de las desviaciones de la frecuencia de los relojes y refina la estimación TDOA en consecuencia. La evaluación se ha llevado a cabo en dos implementaciones reales con dispositivos UWB DWM1000. Los resultados muestran la precisión de localización alcanzada, que es del orden de decenas de centímetros, superando a otras técnicas de localización como las basadas en RSSI y *fingerprint*.

Por último, la evaluación también refleja la influencia en la precisión de la localización del tamaño de la ventana de regresión lineal y el número de repeticiones en la estimación de los TDOA, estableciendo un compromiso entre la precisión en la localización y el retraso para obtener el resultado del algoritmo.

Capítulo 9

Conclusiones

9.1. Introducción

Tras haber estudiado y analizado las diversas técnicas de localización en interiores y la problemática asociada a cada una de ellas, se han propuesto diferentes mejoras para la técnica de *fingerprinting* y se han realizado diversos experimentos para evaluar sus prestaciones. Los resultados de estos experimentos han mostrado que se han alcanzado los objetivos propuestos al inicio de la investigación. En este capítulo, se describen los pasos realizados a lo largo de este camino y las conclusiones finales obtenidas.

La siguiente sección se centra en detallar las principales aportaciones realizadas en la investigación y las conclusiones derivadas de los experimentos realizados. La tercera sección introduce las posibles líneas de trabajo futuro que serán continuación de esta tesis. Por último, se indican las contribuciones científicas fruto de esta investigación que han permitido su difusión en el ámbito internacional.

9.2. Aportaciones y resultados

La localización en interiores mediante señales de radiofrecuencia es un campo de investigación en el que se han presentado a lo largo de estos años

una gran variedad de soluciones, con diferentes grados de precisión y coste. Desde sistemas que utilizan tecnologías UWB o RFID, que pueden proporcionar una precisión del orden de centímetros a un coste medio/alto, hasta tecnologías WLAN o ZigBee que pueden proporcionar una precisión del orden de metros a un bajo coste de inversión. Cada uno de ellos posee una serie de ventajas e inconvenientes que determinan su elección para cada caso estudiado.

La mayoría de los métodos de localización utilizan alguna característica de la señal transmitida, siendo las más extensamente utilizadas el tiempo de propagación o la intensidad de la señal. Los métodos que utilizan la intensidad de la señal encuentran en la inferencia su mayor problema. Uno de las técnicas más implementadas para solventar dicho problema es la llamada técnica de *fingerprinting*. Esta técnica, a su vez, conlleva el problema principal de crear una base de datos de medidas de referencia con la que comparar las medidas de los puntos a localizar. A mayor número de puntos de referencia y mayor número de medidas para cada punto de referencia, la precisión de la localización se ve mejorada. Evidentemente, ello provoca un incremento de la base de datos que se ve reflejado en un mayor consumo de recursos tanto temporales, los dedicados a la recopilación de medidas, como computacionales, a la hora de calcular la localización.

Para reducir dicho consumo de recursos, desde el punto de vista del tiempo empleado en la construcción de la base de datos de referencia, se ha realizado en esta tesis un estudio de la influencia de utilizar diversos niveles de potencia y varios canales de frecuencia. Cuanto mayor sea el número de potencias y canales, mayor es el número de medidas y mayor será el tamaño de la base de datos, lo que a priori debería mejorar la precisión de la localización.

La reducción del número de potencias y canales medidos provoca una disminución del tamaño de la base de datos y un ahorro de tiempo empleado en su construcción. Partiendo de varios niveles de potencia y diversos canales de frecuencia se ha analizado la influencia en la precisión de la localización de la reducción del número de niveles de potencia. De esta forma, se realizaron combinaciones de potencias, observando si algunas potencias aportaban información, eran redundantes o, simplemente, introducían ruido en la estimación. De manera análoga, se ha realizado el estudio de la influencia de los canales de frecuencia.

Los resultados recabados en los capítulos cuatro y cinco han sido obtenidos de forma experimental sobre dos escenarios de características diferentes.

Mientras que el escenario de la ETSE consiste en una serie de despachos separados por paredes y pasillos y con diverso mobiliario en su interior, el escenario de la UJI es un espacio abierto con algunas columnas alrededor. Esto permite realizar una comparativa entre escenarios dispares.

En el caso del escenario de la ETSE, los resultados indican que mediante la elección sólo de unas determinadas potencias y canales se reduce considerablemente la base de datos, pero a costa de un cierto incremento en el error promedio de la localización. Sin embargo, en el escenario de la UJI, esta reducción del tamaño de la base de datos y el tiempo empleado en su construcción, mediante la elección de ciertas potencias y canales, no provoca un decremento significativo en la precisión de la localización.

La existencia de diversos obstáculos en la trayectoria de la señal en el escenario de la ETSE implica que la información aportada por ciertas potencias y canales es de utilidad a la hora de localizar ciertos puntos donde la información de otras potencias y canales no es de utilidad. En el escenario con menos obstáculos de la UJI, la información aportada por una sola potencia y todos los canales puede ser suficiente para mantener la precisión de la localización.

Otra manera de reducir el tiempo empleado en la construcción de la base de datos consiste en utilizar técnicas de interpolación. La interpolación es una herramienta matemática que permite estimar el valor de una función en un punto utilizando los valores disponibles de esa función en otros puntos cercanos. De esta manera, se reduce el número de puntos de referencia tomados realmente y se sustituyen por puntos obtenidos a posteriori mediante interpolación, con lo que el tamaño de la base de datos de las medidas se mantiene.

Para obtener superficies de interpolación continuas y con un suavizado en cada punto, se han implementado y evaluado cuatro interpoladores de función de base radial (RBF) diferentes para comparar su influencia en la precisión de la localización. Las técnicas de interpolación también se muestran válidas para la reducción de la base de datos en el caso de escenarios más abiertos en los que el número de vecinos para cada punto es lo suficientemente alto como para aplicar de manera efectiva dichas técnicas. En el escenario de la UJI, se logra mantener la precisión de la localización obteniendo el 50% de los puntos mediante funciones de interpolación RBF.

En este caso, la elección de los puntos que van a ser interpolados influye de manera significativa en la precisión de la localización. Aquellos puntos que disponen de un número menor de vecinos o aquellos puntos que no se encuentren en una línea directa de visión entre el transmisor y el emisor, pueden introducir distorsiones en la interpolación que afectan al error promedio.

En el escenario de la ETSE, la disposición lineal de los puntos de referencia implica pocos vecinos con los que calcular la interpolación y, además, existe un mayor número de obstáculos en la trayectoria de la señal. Esto influye de manera decisiva en el incremento del error de la localización cuando se reduce el número de puntos de referencia reales a la mitad.

Respecto a las comunicaciones inalámbricas entre el dispositivo a localizar y las balizas de referencia desplegadas, se ha propuesto un protocolo MAC que mejora el proceso de recopilación de medidas RSSI para redes IEEE 802.15.4. De este modo, se consigue acelerar el almacenamiento de todas las medidas proporcionadas por los diversos niveles de potencia y canales de frecuencia. Con ello, el tamaño de la base de datos se mantiene, pero se reduce el tiempo que se tarda en su construcción y también se agiliza la localización de los objetos móviles.

Para ello, se utilizan diferentes canales de frecuencia para evitar los periodos de contención de acceso al medio, sin tener que usar complejos algoritmos de planificación de acceso al medio o protocolos de sincronización de reloj ajustados. El protocolo está diseñado para que varios objetos móviles puedan acceder al canal para intercambiar paquetes con diversas balizas al mismo tiempo.

Los resultados alcanzados por el protocolo MAC propuesto en el capítulo 7, tanto en los datos simulados como en los realizados de forma experimental, han demostrado las ventajas de suprimir los periodos de contención de acceso al medio para un sistema adaptado a las necesidades de la localización.

Se ha logrado reducir el tiempo empleado en la recopilación de muestras RSSI y con ello el tiempo empleado tanto en la construcción de la base de datos, como posteriormente en el proceso de localización para una determinada precisión. Igualmente, se ha conseguido una mejora en el rendimiento de la red y en el consumo energético de los dispositivos TelosB utilizados.

Por último, se ha propuesto un nuevo algoritmo TDOA para posicionar dispositivos utilizando señales UWB. En estos sistemas, las balizas desplegadas no están sincronizadas y el objeto móvil sólo necesitan transmitir paquetes y no recibirlos. Estas características reducen la complejidad de los dispositivos, ahorran consumo de potencia y disminuyen el tráfico de paquetes en el medio.

Para evitar la transmisión de paquetes de sincronización, el algoritmo utiliza una regresión lineal para predecir los valores de la diferencia de tiempo de llegada futura de los paquetes transmitidos por el objeto móvil en el instante en que se recibe el paquete de la baliza de referencia. Con ello, se permite determinar los retrasos temporales entre los relojes de las diferentes balizas. El algoritmo tiene en cuenta las diferentes desviaciones de reloj de los osciladores de las balizas para mejorar la estimación de los *offsets* entre los relojes y la localización. Se ha comprobado que en un escenario y con un despliegue similar al utilizado con la técnica *fingerprinting*, los resultados muestran que la precisión de la localización es mejor que con esta técnica y del orden de sesenta centímetros.

Por tanto, en esta tesis se han realizado contribuciones de mejora en diferentes líneas dentro del campo de investigación de la localización en interiores mediante señales de radio frecuencia. Éstas han supuesto, en el caso de la técnica *fingerprinting*, mejoras en cuanto a la cantidad de datos utilizados en la localización, su recogida y almacenamiento en las bases de datos necesarias y la forma en que se accede a dicha información mediante las redes inalámbricas. Además, se han realizado nuevas propuestas para mejorar las técnicas de localización y las comunicaciones para las técnicas de TDOA basadas en señales UWB.

9.3. Trabajo futuro

Durante la realización de esta tesis se han tomado algunas decisiones que han provocado que ciertas cuestiones no se hayan tenido en cuenta. Se indican a continuación algunas de las líneas que no han sido exploradas y por las que se podría ampliar esta investigación.

Un trabajo previo que se podría haber realizado habría sido un estudio de la propagación de la señal en el escenario elegido. Con ello se puede crear

un modelo de propagación que nos dé información sobre el efecto de los diferentes obstáculos en el camino de la señal, así como de la validez de ciertos niveles de potencia y la interferencia que sufren los diversos canales. Aunque esto conlleva un coste temporal y computacional, se podría aplicar a otros escenarios similares y servir de base para reducir la fase de calibración.

Aunque en los escenarios de interior debido a los obstáculos y paredes es difícil que haya visión directa entre el objeto móvil y las balizas. Otro posible trabajo futuro consistiría en considerar incluir algún tipo de dispositivo, como los infrarrojos, para delimitar la zona y así determinar en qué habitación se encuentra el objeto móvil para dar más peso a las balizas que estén en esa habitación. De este modo, se puede reducir la influencia de dichos obstáculos en la precisión de la localización.

En esta tesis se han utilizado diversas funciones de interpolación de base radial que han proporcionado buenos resultados a la hora de reducir la base de calibración. Sin embargo, existen otros métodos de interpolación, como el método Kringing, que merecen la pena ser probados y comparados con los métodos ya propuestos.

Debido a que los algoritmos clásicos de localización en interiores basados en las medidas de los valores RSSI dependen en gran medida de los entornos y pueden generar errores en la precisión de la localización. Un punto de trabajo futuro sería un enfoque basado en algoritmos de inteligencia artificial para un posicionamiento más preciso y una toma de decisiones mediante la adaptación y el aprendizaje que abordaran los cambios no lineales en las señales de radiofrecuencia.

Los dispositivos ZigBee, debido a su sencillez electrónica y a su bajo consumo energético y bajo coste económico, y los dispositivos WLAN, debido a su implantación general en la mayoría de edificios de uso público, son las opciones más utilizadas en la actualidad para la localización en interiores mediante señales RF. Sin embargo, el abaratamiento de los dispositivos de UWB, cuya precisión es del orden de centímetros y utiliza mediciones del tiempo de propagación de la señal para la localización, está permitiendo la instalación de nuevos sistemas basados en esta tecnología. En esta tesis se ha implementado un sistema basado en la tecnología UWB con un nuevo algoritmo TDOA que ha proporcionado buenos resultados en un escenario real. Estos dispositivos UWB también pueden transmitir los valores de RSSI, con lo que un último punto del trabajo futuro sería utilizar estos valores para crear un mapa de *fingerprinting* que nos proporcionara información adicional

para refinar la precisión de la localización.

9.4. Publicaciones

Las propuestas descritas en esta tesis han llevado a la publicación de varios artículos en revistas. A continuación, se enumeran dichas publicaciones con una breve descripción de las principales contribuciones.

Congreso WICON14 y capítulo de libro

En este trabajo, se evalúa la influencia en la precisión de la localización, obtenida mediante el uso de una base de datos *fingerprinting* con información proveniente de redes IEEE 802.15.4, al utilizar diferentes niveles de potencia y número de canales de frecuencia.

Título	Analysis of RF-based Indoor Localization with Multiple Channels and Signal Strengths
Autores	Jose M. Claver, Santiago Ezpeleta y Juan J. Perez-Solano
Congreso	The 8th International Wireless Internet Conference Symposium on Wireless and Vehicular Communication
Lugar	Lisboa
Fecha	Septiembre de 2014
Libro	Wireless Internet: 8th International Conference, WICON 2014
Fecha	Enero de 2015

Artículo Sensors

Este artículo explora el uso de diferentes funciones de interpolación para completar la base de datos *fingerprinting* necesaria para lograr la precisión buscada, reduciendo así el esfuerzo en la fase de calibración. Se han evaluado diferentes distribuciones de puntos de referencia, mostrando la validez de la propuesta.

Título	RF-Based Location Using Interpolation Functions to Reduce Fingerprint Mapping
Autores	Santiago Ezpeleta, Jose M. Claver, Juan J. Perez-Solano y Jose V. Marti
Revista	Sensors, vol.15, issue 15
Fecha	Octubre de 2015

Artículo Sensors

La principal contribución de este artículo es la propuesta de un nuevo protocolo MAC que reduce los períodos de contención de acceso al medio y disminuye el número colisiones de los paquetes para acelerar el proceso de recogida de los valores RSSI. Por otra parte, el protocolo aumenta el rendimiento general de la red, aprovechando la diversidad de canales de frecuencia.

Título	Optimizing the MAC Protocol in Localization Systems Based on IEEE 802.15.4 Networks
Autores	Juan J. Perez-Solano, Jose M. Claver y Santiago Ezpeleta
Revista	Sensors, vol.17, issue 7
Fecha	Julio de 2017

Bibliografía

- [1] J. Evans, *The History and Practice of Ancient Astronomy*. Oxford University Press, 1998.
- [2] A. Gurney, *Compass: A Story of Exploration and Innovation*. Norton, 2004.
- [3] M. Ainslie, *Principles of Sonar Performance Modelling*. Springer, Jan 2010.
- [4] J. Eaves and E. Reedy, *Principles of Modern Radar*. Springer, 1987.
- [5] R. J. Dippy, “Gee: a radio navigational aid,” *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIIA: Radiolocation*, vol. 93, no. 2, pp. 468–480, 1946.
- [6] J. H. Halford, D. Davidson, and J. A. Waldschmitt, *History of LORAN: Long Range Navigation*, pp. 19–51. McGraw Hill, 1948.
- [7] S. M. Yionoulis, “The transit satellite geodesy program,” *John Hopkins APL Technical Digest*, no. 1, 1998.
- [8] I. Getting, “Perspective/navigation-the global positioning system,” *Spectrum, IEEE*, vol. 30, pp. 36 – 38, 01 1994.
- [9] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, “A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks,” *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 11, pp. 13 – 32, 01 2009.
- [10] D. Zhang, F. Xia, Z. Yang, L. Yao, and W. Zhao, “Localization technologies for indoor human tracking,” in *2010 5th International Conference on Future Information Technology*, pp. 1–6, May 2010.

-
- [11] J. Yiming, *Location-Based Services Handbook: Indoor Location Determination*. CRC Press, 2010.
 - [12] J. Hightower, G. Borriello, and R. Want, “SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength,” tech. rep., Feb 2000.
 - [13] L. Ni, Y. Liu, Y. Cho Lau, and A. Patil, “Landmarc: Indoor location sensing using active RFID,” vol. 10, pp. 407–415, Apr 2003.
 - [14] K. Pahlavan, X. Li, and J. Makela, “Indoor geolocation science and technology,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 40, pp. 112 – 118, Mar 2002.
 - [15] M. Youssef, A. Agrawala, and A. Shankar, “WLAN location determination via clustering and probability distributions,” pp. 143–150, Apr 2003.
 - [16] M. Brunato and R. Battiti, “Statistical learning theory for location fingerprinting in wireless LANs,” *Computer Networks*, vol. 47, pp. 825–845, Apr 2005.
 - [17] C. Alippi, A. Mottarella, and G. Vanini, “A RF map-based localization algorithm for indoor environments,” in *2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 652–655 Vol. 1, May 2005.
 - [18] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, “RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system,” vol. 2, pp. 775 – 784 vol.2, Feb 2000.
 - [19] K. Lorincz and M. Welsh, “Motetrack: A robust, decentralized approach to RF-based location tracking,” vol. 3479, pp. 63–82, May 2005.
 - [20] Q. Yao, F.-Y. Wang, H. Gao, K. Wang, and H. Zhao, “Location estimation in zigbee network based on fingerprinting,” pp. 1–6, Jan 2008.
 - [21] G. Tzagkarakis, D. Miliaris, M. Papadopouli A. Papakonstantinou, and P. Tsakalides, “Low-dimensional signal-strength fingerprint-based positioning in wireless LANs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 12, Jan 2012.
 - [22] B. Dawes and K.-W. Chin, “A comparison of deterministic and probabilistic methods for indoor localization,” *Journal of Systems and Software*, vol. 84, pp. 442–451, Mar 2011.

- [23] S. Gansemer, S. Pueschel, R. Frackowiak, S. Hakobyan, and U. Grossmann, “Improved RSSI-based euclidean distance positioning algorithm for large and dynamic WLAN environments,” *Computing*, vol. 9, pp. 37–44, Jan 2010.
- [24] S. Hossain, S. H. S. Ariffin, N. Faisal, C. K. Neng, and L. A. Hassan, N. S. A. Latiff, “Accuracy enhancement of fingerprint indoor positioning system,” in *2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation*, pp. 600–605, Feb 2012.
- [25] A. Rozyyev, H. Hasbullah, and F. Subhan, “Combined k-nearest neighbors and fuzzy logic indoor localization technique for wireless sensor network,” *Research Journal of Information Technology*, vol. 4, pp. 155–165, Apr 2012.
- [26] H. Shin and H. Cha, “Wi-fi fingerprint-based topological map building for indoor user tracking,” in *2010 IEEE 16th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications*, pp. 105–113, Aug 2010.
- [27] J. Marti, J. Sales, R. Marín Prades, and E. Jiménez-Ruiz, “Localization of mobile sensors and actuators for intervention in low-visibility conditions: The zigbee fingerprinting approach,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2012, Aug 2012.
- [28] P. Crane, Z. Huang, and H. Zhang, “SIB: Noise reduction in fingerprint-based indoor localisation using multiple transmission powers,” *Proceedings of the 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, vol. 2014, pp. 208–211, Nov 2014.
- [29] J. Krumm and J. Platt, “Minimizing calibration effort for an indoor 802.11 device location measurement system,” *Technical Report, Microsoft Research MSRTR-2003-82*, Nov 2003.
- [30] M. Angelichinoski, V. Atanasovski, and L. Gavrilovska, “Comparative analysis of spatial interpolation methods for creating radio environment maps,” *2011 19th Telecommunications Forum, TELFOR 2011 - Proceedings of Papers*, Nov 2011.
- [31] “Characteristics of ultra-wideband technology.” <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1755-0-200605-I/en>, 2006. Accedido 01-04-2019.

- [32] C. Drane, M. Macnaughtan, and C. Scott, "Positioning GSM telephones," *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, pp. 46–54, April 1998.
- [33] K. Finkenzeller, *RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards and identification*. Wiley, 8 2010.
- [34] "RFID tags." <https://www.ravirajtech.com/rfid-tags.html>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [35] R. Berkvens, F. Smolders, B. Bellekens, M. Aernouts, and M. Weyn, "Comparing 433 and 868 MHz active RFID for indoor localization using multi-wall model," vol. 2018 8th International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), pp. 1–6, Jun 2018.
- [36] "Dash Alliance." <http://www.dash7-alliance.org/>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [37] "ITU." <https://www.itu.int>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [38] F. COMMUNICATION COMMISSION, *Revision of Part 15 of the Commissions Rules Regarding Ultra-Wide-Band Transmission System*, vol. 0248. 02 2002.
- [39] M. Bocquet, C. Loyez, and A. Benlarbi-Delai, "Millimeter ultra wide band positioning system," *Wireless Technology, 7th European Conference*, vol. 1, pp. 117–120, 11 2004.
- [40] "IEEE standard for information technology - telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks - specific requirement part 15.4: Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (wpans)." <https://ieeexplore.ieee.org/document/4299496>, 2007. Accedido 01-04-2019.
- [41] "Sources of error in DW1000 based two-way ranging (TWR) schemes," *Application Note APS011*.
- [42] S. Gezici, "A survey on wireless position estimation," *Wireless Personal Communications*, vol. 44, no. 3, pp. 263–282, 2008.
- [43] R. Zandian and U. Witkowski, "Implementation challenges of synchronisation of UWB nodes in TDOA structures," pp. 1–8, Sep 2018.

- [44] V. Djaja-Josko and J. Kolakowski, "A new transmission scheme for wireless synchronization and clock errors reduction in UWB positioning system," in *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1–6, Oct 2016.
- [45] M. M. Saad, C. J. Bleakley, M. Walsh, and T. Ye, "High accuracy location estimation for a mobile tag using one-way UWB signaling," in *2012 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS)*, pp. 1–8, Oct 2012.
- [46] B. Choi, K. La, and S. Lee, "UWB TDOA/TOA measurement system with wireless time synchronization and simultaneous tag and anchor positioning," pp. 1–6, Jun 2018.
- [47] T. Jankowski and M. Nikodem, "Synchronization-free TDOA localization method for large scale wireless networks," in *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1–6, Sep 2017.
- [48] B. Xu, G. Sun, R. Yu, and Z. Yang, "High-accuracy TDOA-based localization without time synchronization," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 24, pp. 1567–1576, Aug 2013.
- [49] "Ubisense." <https://www.ubisense.net>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [50] A. Schwaighofer, M. Grigoraş, V. Tresp, and C. Hoffmann, "GPPS: A gaussian process positioning system for cellular networks," in *Proceedings of the 16th International Conference on Neural Information Processing Systems, NIPS'03*, (Cambridge, MA, USA), pp. 579–586, MIT Press, 2003.
- [51] Y. Oussar, I. Ahriz, B. Denby, and G. Dreyfus, "Indoor localization based on cellular telephony RSSI fingerprints containing very large numbers of carriers," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2011, Aug 2011.
- [52] D. P. Brutzman, M. Zyda, and S. R. Bible, "Using spread spectrum ranging techniques for position tracking in a virtual environment," 1995.
- [53] J. Caffery and G. L. Stuber, "Subscriber location in CDMA cellular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, pp. 406–416, May 1998.

- [54] M. A. Youssef, A. Agrawala, and A. Udaya Shankar, “WLAN location determination via clustering and probability distributions,” in *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2003. (PerCom 2003).*, pp. 143–150, March 2003.
- [55] M. Youssef and A. Agrawala, “Handling samples correlation in the Horus system,” in *IEEE INFOCOM 2004*, vol. 2, pp. 1023–1031 vol.2, March 2004.
- [56] R. Battiti, N. Thang Le, and A. Villani, “Location-aware computing: A neural network model for determining location in wireless LANs,” *Int. Semicond. Conf.*, vol. 4, 11 2002.
- [57] “Ekahau positioning engine 2.0.” <https://www.ekahau.com>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [58] A. M. Ladd, K. E. Bekris, A. P. Rudys, D. S. Wallach, and L. E. Kavradi, “On the feasibility of using wireless ethernet for indoor localization,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 20, pp. 555–559, June 2004.
- [59] P. Prasithsangaree, P. Krishnamurthy, and P. Chrysanthis, “On indoor position location with wireless LANs,” in *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 2, pp. 720–724 vol.2, Sep. 2002.
- [60] A. Mu, S. Hur, and Y. Park, “Locali: Calibration-free systematic localization approach for indoor positioning,” 2017.
- [61] Y. Gwon and R. Jain, “Error characteristics and calibration-free techniques for wireless LAN-based location estimation,” pp. 2–9, 01 2004.
- [62] M. Srivastava, R. Muntz, and M. Potkonjak, “Smart kindergarten: Sensor-based wireless networks for smart developmental problem-solving environments,” *MobiCom 2001*, Nov 2001.
- [63] D. J. Malan, M. Welsh, and M. D. Smith, “A public-key infrastructure for key distribution in TinyOS based on elliptic curve cryptography,” in *2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004.*, pp. 71–80, Oct 2004.

- [64] T. Gao, D. Greenspan, and M. Welsh, "Improving patient monitoring and tracking in emergency response," *Proceedings of the International Conference on Information Communication Technologies in Health*, July 2005.
- [65] A. G., S. Chessa, F. Conforti, A. Macerata, and C. Marchesi, "Health-care monitoring of mobile patients," *Ercimnews*, vol. 60, 2005.
- [66] M. Welsh, S. Moulton, T. Fulford-Jones, and D. Malan, "Codeblue: An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care," *MobiSys 2004 Workshop on Applications of Mobile Embedded Systems (WAMES 2004)*, Jan 2004.
- [67] S. D.C., A. Baptista, D. McNamee, C. Pu, and J. Walpole, "Research challenges in environmental observation and forecasting systems," *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking*, p. 292299, Aug 2000.
- [68] R. Szewczyk, A. Mainwaring, J. Polastre, J. Anderson, and D. Culler, "An analysis of a large scale habitat monitoring application," *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, p. 214226, Nov 2004.
- [69] Hanbiao Wang, J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Target classification and localization in habitat monitoring," in *2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03).*, vol. 4, pp. IV-844, April 2003.
- [70] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao, "Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology," *Computer Communication Review*, vol. 31, Feb 2001.
- [71] M. Lin, A. Kumar, X. Qing, S. J. Beard, S. S. Russell, J. L. Walker, and T. K. Delay, "Monitoring the integrity of filament wound structures using built-in sensor networks," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 5054, p. 9, Aug 2003.
- [72] X. Wang, S. Yuan, R. Laur, and W. Lang, "Dynamic localization based on spatial reasoning with RSSI in wireless sensor networks for transport logistics," *Sensors and Actuators A-physical - SENSOR ACTUATOR A-PHYS*, vol. 171, pp. 421-428, 11 2011.
- [73] "WhereNet." <https://www.zebra.com/gb/en/products/location-technologies/wherenet.html>, 2019. Accedido 01-04-2019.

- [74] J. Werb and C. Lanzl, “Designing a positioning system for finding things and people indoors,” *IEEE Spectrum*, vol. 35, pp. 71–78, Sep. 1998.
- [75] “Mps.” <https://www.mesh4g.com>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [76] “Eiris.” <https://www.centrak.com/products/real-time-location-services>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [77] C. Marc, M. E. Israel, and B. A. Francisco, *Location in wireless local area networks*. CRC Press, 2010.
- [78] “Topaz local positioning solution.” <https://www.ekahau.com>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [79] T. Cover and P. Hart, “Nearest neighbor pattern classification,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 13, pp. 21–27, January 1967.
- [80] B. Silverman and M. C. Jones, “E. fix and j.l. hodges (1951): An important contribution to nonparametric discriminant analysis and density estimation: Commentary on fix and hodges (1951),” *International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique*, vol. 57, 12 1989.
- [81] S. Kullback and R. A. Leibler, “On information and sufficiency,” *Ann. Math. Statist.*, vol. 22, pp. 79–86, Mar 1951.
- [82] O. Abdullah and I. Abdel-Qader, *Machine Learning Algorithm for Wireless Indoor Localization*, pp. 168–225. IntechOpen, Sep 2018.
- [83] O. A. Abdullah, I. Abdel-Qader, and B. Bazuin, “Convex optimization via jensen-bregman divergence for WLAN indoor positioning system,” *Int. J. Handheld Comput. Res.*, vol. 8, pp. 29–41, Jan 2017.
- [84] P. Mirowski, P. Whiting, H. Steck, R. Palaniappan, W. Macdonald, D. Hartmann, and T. Ho, “Probability kernel regression for wifi localisation,” *Journal of Location Based Services*, vol. 6, pp. 1–20, Jun 2012.
- [85] C. Feng, W. S. A. Au, S. Valaee, and Z. Tan, “Received-signal-strength-based indoor positioning using compressive sensing,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, pp. 1983–1993, Dec 2012.
- [86] “2.4 GHz IEEE 802.15.4 / zigbee-ready RF transceiver.” <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>. Accedido 01-04-2019.

- [87] “Guardians eu project.” <https://cordis.europa.eu/project/rcn/80210/factsheet/en>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [88] J. V. M. Aviles and R. M. Prades, “Ariel: Advanced radiofrequency indoor environment localization: Smoke conditions positioning,” in *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*, pp. 1–8, June 2011.
- [89] A. Narzullaev and Y. Park, “A fast and accurate calibration algorithm for real-time locating systems based on the received signal strength indication,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 65, pp. 305–311, 04 2011.
- [90] M. A. Panjwani, A. L. Abbott, and T. S. Rappaport, “Interactive computation of coverage regions for wireless communication in multi-floored indoor environments,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 420–430, Apr 1996.
- [91] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, Dec 2001.
- [92] A. Borrelli, C. Monti, M. Vari, and F. Mazzenga, “Channel models for IEEE 802.11b indoor system design,” in *2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No.04CH37577)*, vol. 6, pp. 3701–3705 Vol.6, Jun 2004.
- [93] K.-W. Cheung, J.-M. Sau, and R. Murch, “A new empirical model for indoor propagation prediction,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, pp. 996–1001, Aug 1998.
- [94] Q. Li, H. Qu, Z. Liu, N. Zhou, W. Sun, and J. Li, “Af-dcgan: Amplitude feature deep convolutional gan for fingerprint construction in indoor localization system,” *CoRR*, vol. abs/1804.05347, 2018.
- [95] J. Xiao, K. Wu, Y. Yi, and L. M. Ni, “Fifs: Fine-grained indoor fingerprinting system,” vol. 2012 21st International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), pp. 1–7, Jul 2012.
- [96] X. Wang, L. Gao, S. Mao, and S. Pandey, “Deepfi: Deep learning for indoor fingerprinting using channel state information,” vol. 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 1666–1671, Mar 2015.

- [97] Y. Cho, J. Kim, M. Ji, Y. Lee, and S. Park, “Gpr based wi-fi radio map construction from real/virtual indoor dynamic surveying data,” vol. 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013), pp. 712–714, Oct 2013.
- [98] A. M. Ladd, K. E. Bekris, G. Marceau, A. Rudys, D. S. Wallach, and L. E. Kavraki, “Using wireless ethernet for localization,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp. 402–408 vol.1, Sep. 2002.
- [99] S. H. Cha, “Comprehensive survey on distance/similarity measures between probability density functions,” *Int. J. Math. Model. Meth. Appl. Sci.*, vol. 1, 01 2007.
- [100] G. Retscher and J. Joksch, “Comparison of different vector distance measure calculation variants for indoor location fingerprinting,” in *Proceedings of the 13th international conference on location-based services, ICA*, pp. 53–76, Nov 2016.
- [101] “Eduroam.” <https://www.eduroam.org>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [102] P. M. T. A. Chehri, P. Fortier, “UWB-based sensor networks for localization in mining environments,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 5, p. 987 – 1000, 2009.
- [103] B. Rashid and M. H. Rehmani, “Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 60, Dec 2015.
- [104] “Crossbow.” http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/telosb_datasheet.pdf, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [105] S. Roy, R. Sen, S. Kulkarni, P. Kulkarni, B. Raman, and L. K. Singh, “Wireless across road: RF based road traffic congestion detection,” in *2011 Third International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2011)*, pp. 1–6, Jan 2011.
- [106] M. Murad, Y. Khawaja, and G. M. Hassan, “Web based poultry farm monitoring system using wireless sensor network,” p. 7, Jan 2009.
- [107] S. Mandava and A. Gudipalli, “Analysis of home energy management system using iot,” *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 118, pp. 3957–3968, May 2018.

- [108] D. Delaney, A. Ruzzelli, and G. O'Hare, "Evaluation of energy-efficiency in lighting systems using sensor networks," pp. 61–66, Nov 2009.
- [109] X. Sun, Z. Lu, X. Zhang, M. Salathé, and G. Cao, "Infectious disease containment based on a wireless sensor system," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1558–1569, 2016.
- [110] G. Lo, L. Stocco, S. González-Valenzuela, and V. C. M. Leung, "A wireless sensor system for motion analysis of parkinson's disease patients," in *2011 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, pp. 372–375, Mar 2011.
- [111] "Lego." <https://www.lego.com/es-es/mindstorms>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [112] "Vex." <https://www.vexrobotics.com>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [113] "Kits de robótica." <https://www.ro-botica.com/Producto/LEGO-MINDSTORMS-EV3-31313/>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [114] "Braigo." <https://www.braigolabs.com>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [115] "Cubestormer." <https://www.arm.com>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [116] "Bookreader." <http://makezine.com/projects/lego-bookreader-digitize-books-with-mindstorms-and-raspberry-pi/>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [117] "Raspberry." <https://www.raspberrypi.org>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [118] A. Deepak, M. Sriramprasath, R. Lokesh, and M. Sarath Kumar, "Automotive collision avoidance system," *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 4, pp. 106–109, Oct 2014.
- [119] J. T. Shraddha and A. Salunke, "Multi functional smart display using raspberry-pi," *International Journal of Advance Foundation and Research in Computer*, vol. 2 Special Issue, Jan 2015.
- [120] D. H. Biedermann, F. Dietrich, O. Handel, P. M. Kielar, and M. J. Seitz, "Using raspberry pi for scientific video observation of pedestrians during a music festival," *CoRR*, vol. abs/1511.00217, Jun 2015.
- [121] A. A. Dharmapurikar and R. Waghmare, "An effective wireless solution for industrial automation by using raspberry pi," *International Journal Of Engineering, Education And Technology*, vol. 3, Apr 2015.

- [122] J. Bermúdez Ortega, E. Besada Portas, D. López Orozco, B. S. J.A., and J. de la Cruz *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 29, pp. 158–163, 2015.
- [123] S. G. Nikhade, “Wireless sensor network system using raspberry pi and zigbee for environmental monitoring applications,” in *2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM)*, pp. 376–381, May 2015.
- [124] “Dexter.” <https://www.dexterindustries.com/brickpi>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [125] “Universidad de berkeley.” <https://www.berkeley.edu>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [126] J. Martí, “Tesis doctoral: Localización multisensor en interiores en condiciones de baja visibilidad,” 6 2012.
- [127] J. Curtis, “Geospatial analysis: A comprehensive guide to principles, techniques, and software tools, second edition - by michael j. de smith, michael f. goodchild, and paul a. longley,” *Transactions in Gis - T. GIS*, vol. 12, pp. 645–647, 10 2008.
- [128] B. Li, Y. Wang, H. K. Lee, A. Dempster, and C. Rizos, “Method for yielding a database of location fingerprints in WLAN,” *IEE Proceedings - Communications*, vol. 152, pp. 580–586, Oct 2005.
- [129] M. Azpurua and K. Teixeira, “A comparison of spatial interpolation methods for estimation of average electromagnetic field magnitude,” *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 14, pp. 135–145, 01 2010.
- [130] “IEEE std 802.15.4-2003.” <https://ieeexplore.ieee.org/document/1237559>, 2019. Accedido 01-04-2019.
- [131] F. Osterlind, A. Dunkels, J. Eriksson, N. Finne, and T. Voigt, “Cross-level sensor network simulation with cooja,” in *Proceedings. 2006 31st IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp. 641–648, Nov 2006.
- [132] P. Levis and D. Gay, *TinyOS Programming*. Cambridge University Press, 01 2009.
- [133] J. Polastre, R. Szewczyk, and D. Culler, “Telos: enabling ultra-low power wireless research,” in *IPSN 2005. Fourth International Symposium*

- on Information Processing in Sensor Networks, 2005.*, pp. 364–369, April 2005.
- [134] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, “Survey of wireless indoor positioning techniques and systems,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, pp. 1067–1080, Nov 2007.
- [135] J. C. M. Kwak, “A new double two-way ranging algorithm for ranging system,” *2010 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*, p. 470–473, 2010.
- [136] F. Despau, K. Jaffrès-Runser, A. van den Bossche, and T. Val, “Accurate and platform-agnostic time-of-flight estimation in ultra-wide band,” in *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–7, Sep 2016.
- [137] F. Despau, A. van den Bossche, K. Jaffrès-Runser, and T. Val, “N-TWR: An accurate time-of-flight-based N-ary ranging protocol for ultra-wide band,” *Ad Hoc Networks*, vol. 79, May 2018.
- [138] A. H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, “Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, pp. 24–40, Jul 2005.
- [139] V. Djaja-Josko, J. Kolakowski, and J. Modelski, “TDOA estimation using a pair of synchronized DW1000 based anchor nodes,” in *2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, pp. 57–60, May 2018.
- [140] V. Djaja-Josko and J. Kolakowski, “A new method for wireless synchronization and TDOA error reduction in UWB positioning system,” in *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, pp. 1–4, May 2016.
- [141] J. X. Lee, Z. W. Lin, P. S. Chin, and C. L. Law, “Non-synchronised time difference of arrival localisation scheme with time drift compensation capability,” *IET Communications*, vol. 5, pp. 693–699, Mar 2011.
- [142] “Decawave, DWM1000 datasheet, rev. 2.09,” 2015.
- [143] “Python library for the DWM1000 ultra wide band module,” 2017.

- [144] J. Perez-Solano and S. Felici-Castell, “Adaptive time window linear regression algorithm for accurate time synchronization in wireless sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 24, 08 2014.

