



Escuela Politécnica

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Escuela Politécnica

Grado en Ingeniería Informática en Ingeniería del Software

Trabajo de Fin de Grado

Sistema inteligente de posicionamiento en interiores

Fernando Díaz González

Junio, 2017



Escuela Politécnica

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Escuela Politécnica

Grado en Ingeniería Informática en Ingeniería del Software

Trabajo de Fin de Grado

Sistema inteligente de posicionamiento en interiores

Autor: Fernando Díaz González

Tutor: Juan Hernández Núñez

Cotutor: Jaime Galán Jiménez

Tribunal Calificador

Presidente: Elena Jurado Málaga

Secretario: Alberto Gómez Mancha

Vocal: José María Conejero Manzano

Resumen

Los sistemas de posicionamiento en interiores han ganado mucha popularidad en los últimos años, y la tecnología y el algoritmo de localización son una pieza fundamental para mejorar la precisión en estos sistemas. Sin embargo, muchas de las aproximaciones tomadas son complejas y tienen un coste elevado, tanto de desarrollo como de despliegue. Los métodos más usados en interiores se basan en la técnica de fingerprinting, difícil de llevar a cabo y que se ve afectada ante cambios en el entorno. En este trabajo proponemos un sistema de fácil desarrollo mediante tecnología Bluetooth y trilateración, y que hace uso del Filtro de Kalman para mejorar la precisión del algoritmo de localización.

Abstract

Indoor positioning systems have gained a lot of popularity in recent years, and the technology and the localization algorithm are a key part to improve the accuracy in these systems. However, many of the approaches taken are complex and have a high cost, both of development and deployment. The most used methods in indoors are based on the fingerprinting technique, which is difficult to accomplish and that is affected by changes in the environment. In this work we propose an easy to develop system using Bluetooth technology and trilateration, and which makes use of the Kalman Filter to improve the accuracy of the localization algorithm.

Índice general

Índice de figuras	7
Índice de tablas	9
1. Introducción	10
1.1. Objetivos	11
1.2. Motivación	11
1.3. Presentación de capítulos	12
2. Estado del arte	13
2.1. Técnicas	13
2.1.1. Multilateración	13
2.1.2. Tiempo de llegada	14
2.1.3. Diferencia en el tiempo de llegada	15
2.1.4. Ángulo de llegada	15
2.1.5. Indicador de fuerza de señal recibida (RSSI)	16
2.1.6. Fingerprinting	17
2.2. Tecnologías ópticas	19
2.2.1. Infrarrojos	19
2.2.2. Comunicación con luz visible	20
2.3. Tecnologías basadas en el sonido	21

4

2.3.1. Ultrasonidos	21
2.3.2. Sonido audible	21
2.4. Tecnologías de radio frecuencia	22
2.4.1. Wi-Fi	22
2.4.2. Bluetooth	23
2.4.3. RFID	24
2.5. Tecnologías pasivas	24
2.5.1. Campo magnético	25
2.5.2. Sensores inerciales	25
2.5.3. Visión por ordenador	26
2.6. Comparación de las tecnologías	27
2.7. Trabajos relacionados	28
2.8. Conclusiones	31
3. Desarrollo con sistemas propietarios	32
3.1. IndoorAtlas	32
3.2. Situm	34
3.2.1. Prueba de funcionamiento	34
3.3. Conclusiones	38
4. Desarrollo con sistemas no propietarios: tecnología	39
4.1. Elección de dispositivos Bluetooth (beacons)	39
4.2. Cálculo de la distancia	41
4.2.1. Modelo de estimación de la distancia	41
4.2.2. Cálculo de la constante de propagación de la señal	42
5. Desarrollo con sistemas no propietarios: técnicas de posicionamiento	48
5.1. Comparación entre multilateración y fingerprinting	48
5.1.1. Multilateración	49
5.1.2. Fingerprinting	57

5.2. Conclusiones	62
6. Desarrollo con sistemas no propietarios: mejora de la precisión	63
6.1. Estudio del ruido en las medidas RSSI	63
6.2. El Filtro de Kalman	67
6.2.1. Modelo del sistema	67
6.2.2. Modelo de medida	68
6.2.3. Estimación del estado	69
6.2.4. Ruido en el proceso y ruido en la medida	70
6.3. Comparación del efecto de varios filtros	70
6.4. Conclusión	75
7. Trabajos futuros	76
7.1. Predecir la posición del usuario mediante el Filtro de Kalman	76
7.2. Utilizar un grafo para restringir la posición	76
7.3. Combinar varias tecnologías	77
7.4. Situar beacons en puntos clave	77
8. Conclusiones	78
8.1. Conclusiones del trabajo	78
8.2. Valoración personal	79
9. Agradecimientos	80
Apéndice A. Datos usados para la multilateración en Wolfram Mathematica	81
Apéndice B. Aplicación utilizada para tomar las mediciones	83
Acrónimos	86
Referencias	87

Índice de figuras

2.1.1 Trilateración	14
2.1.2 Diferencia en el tiempo de llegada (TDoA)	15
2.1.3 Ángulo de llegada (AoA)	16
2.1.4 Mediciones RSSI	17
2.1.5 Fingerprinting	18
2.2.1 Sensores infrarrojos para IPS	19
2.2.2 Sistema de posicionamiento en interiores mediante VLC	20
2.3.1 Sensores de ultrasonidos para IPS	21
2.4.1 Algoritmo de fingerprinting mediante Wi-Fi	22
2.4.2 Diferentes tipos de balizas (beacons) Bluetooth	23
2.4.3 Componentes de un sistema RFID	24
2.5.1 Navegación por estima	26
2.6.1 Tecnologías comparadas por su exactitud y cobertura	28
2.7.1 Aproximaciones para posicionamiento usando RSSI	29
2.7.2 Posicionamiento VLC con múltiples receptores en el terminal	30
3.1.1 Flujo de trabajo en IndoorAtlas para mapear un edificio	33
4.2.1 Control para modificar la potencia de emisión en beacons Kontakt	42
4.2.2 Datos almacenados de una medición obtenida de un beacon	43

4.2.3.Toma de medidas con dispositivo Motorola E2 y beacon Kontakt	43
5.1.8.Flujo de un sistema basado en fingerprinting	58
5.1.9.Pabellón de informática dividido en puntos de referencia	59
6.1.1.Gráfico de caja: 50 medidas tomadas a 2m del beacon	64
6.1.2.Gráfico de caja: 50 medidas tomadas a 4m del beacon	65
6.1.3.Gráfico de caja: 50 medidas tomadas a 6m del beacon	65
6.1.4.Gráfico de cajas: medidas tomadas de 1 a 8 metros	66
6.1.5.Gráfico de líneas: medidas tomadas a 1, 4 y 8 metros	66
6.3.1.Comparación de filtros: ARMA vs media móvil (beacon a 1 metro)	71
6.3.2.Comparación de filtros: Kalman (beacon a 1 metro)	71
6.3.3.Comparación de filtros: ARMA vs Kalman (beacon a 4 y 8 metros)	72
6.3.4.Comparación de filtros: ARMA vs media móvil (desplazamiento de 1 a 3 metros)	73
6.3.5.Comparación de filtros: Kalman (desplazamiento de 1 a 3 metros)	73
6.3.6.Comparación de filtros: ARMA vs Kalman (desplazamiento de 4 a 8 metros)	74

Índice de tablas

2.6.1 Comparación de las principales tecnologías para IPS	27
4.2.1 Medidas a 1m tomadas en el Edificio de Servicios Generales	45
4.2.2 Medidas a 2m tomadas en el Edificio de Servicios Generales	45
4.2.3 Medidas a 1m tomadas en varios lugares	46
4.2.4 Medidas a 1m tomadas en cámara de emisión y cámara reverberante .	46
5.1.1 Tres circunferencias con un punto en común a las tres	51
5.1.2 Tres circunferencias sin ningún punto en común a las tres	54
5.1.3 Cuatro esferas con un punto en común a todas	56
6.1.1 Valores teóricos de RSSI para distancias de 1 a 6 metros	64

Introducción

La localización de dispositivos en interiores se ha convertido en un problema clave para muchas aplicaciones emergentes basadas en la localización (LBA, Location Based Applications) en diferentes campos. Sin embargo, al contrario de lo que ocurre con la tecnología de navegación por satélite, hoy en día no existe una solución general y fácil. A pesar de que un despliegue a gran escala de estos sistemas de localización aún no está disponible, las innovaciones tecnológicas en este tema tendrán un gran impacto en las actividades cotidianas de las personas en los próximos años, en áreas como la salud y la vida independiente, el ocio, la seguridad, etc.

Una de las pruebas de la importancia y popularidad de este tema es la *Conferencia Internacional sobre Posicionamiento en Interiores y Navegación en Interiores* (IPIN, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation); una conferencia que desde su primera edición en 2010 celebrada en Zurich, reúne a los mejores investigadores, desarrolladores y proveedores de servicios de posicionamiento y navegación en interiores.

En este TFG se propone un sistema de posicionamiento en interiores de bajo coste y fácil de desarrollar. Mientras que otros sistemas utilizan algoritmos de fingerprinting[1] difíciles de llevar a cabo y que requieren hardware específico en muchos casos (e.g., magnetómetro); aquí se propone un sistema basado en el algoritmo de trilateración[2], que solo hace uso de la antena Bluetooth del dispositivo móvil para estimar la distancia a varios puntos de referencia. Estos puntos de referencia son balizas (beacons) de bajo coste y cuya disposición dentro del edificio puede alterarse de manera sencilla. al contrario de otro tipo de tecnología (e.g., puntos Wi-Fi, luz visible) donde estos puntos emisores suelen quedar fijos.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo de este TFG es conseguir un sistema que, a partir de las mediciones de la intensidad de señal de varios puntos de referencia Bluetooth, localice al usuario. Este sistema se instalará en el dispositivo móvil de un usuario y hará uso de los sensores propios del teléfono para lograr este cometido. Por otro lado, dado que la señal recibida por el dispositivo móvil no es completamente fiel (por el ruido introducido), este sistema debe ser capaz de filtrar la señal recibida para conseguir una estimación de la posición lo más precisa posible. Por ello, otro de los objetivos será analizar cómo afectan las decisiones tomadas, así como las características del entorno a la precisión del sistema; en particular, se analizarán el efecto de los siguientes aspectos:

1. El algoritmo de posicionamiento utilizado (trilateración).
2. El modelo de propagación de la señal utilizado para estimar la distancia a las balizas.
3. Las características inherentes al entorno, que hacen que la señal se refleje de una manera u otra.
4. El algoritmo de filtrado utilizado para eliminar medidas de intensidad de señal ruidosas.

1.2. MOTIVACIÓN

Este trabajo se desarrolla dentro del grupo de investigación Quercus. La idea de este TFG surgió ante un problema que se le había propuesto al grupo. Este era el posicionamiento y monitorización de personas dentro de edificios públicos, sobre todo orientado hacia personas con discapacidad cognitiva que se desorientan con facilidad en este tipo de espacios. De esta manera, el sistema instalado en el dispositivo móvil de estas personas puede servir de ayuda en el guiado en interiores.

Por otro lado, ha supuesto un reto personal enfrentarme a este problema dado que todavía no existe ninguna solución idónea aceptada por la mayor parte de la comunidad. Esto me llevó a trabajar para realizar una aportación en este campo, por pequeña que fuera.

Finalmente, siempre es apasionante embarcarse en un problema en el que uno no tiene experiencia; lo que le permite a uno salir de su zona de confort con el objetivo de expandir esta en un futuro.

1.3. PRESENTACIÓN DE CAPÍTULOS

En el **Capítulo 2** se realiza un extenso análisis de las tecnologías y técnicas de posicionamiento más utilizadas en el desarrollo de sistemas de posicionamiento en interiores.

En el **Capítulo 3** se intenta prototipar un sistema de posicionamiento en interiores mediante el uso de herramientas propietarias de terceros.

En el **Capítulo 4** comienza el desarrollo del sistema propio. Se examina el modelo de propagación de la señal que se va a utilizar para estimar la distancia a las balizas Bluetooth. También se analiza como afectan las características del entorno a la estimación mediante este modelo.

En el **Capítulo 5** se detalla la técnica de trilateración utilizada y se compara la precisión de esta con la lograda por el fingerprinting.

En el **Capítulo 6** se propone el uso del Filtro de Kalman para reducir el ruido en las intensidades de señal recibidas, con el objetivo de mejorar la precisión del sistema de localización.

En el **Capítulo 7** se comentan diversas mejoras que podrían introducirse al sistema para mejorar la precisión y fiabilidad.

En el **Capítulo 8** se expondrán las conclusiones del desarrollo del proyecto.

Por otro lado, se han incluido dos anexos. En el **apéndice A** se incluyen los datos utilizados para varias de las gráficas que se presentan en la **subsección 5.1.1**. Por otro lado, en el **apéndice B** se presenta la aplicación que se ha utilizado para tomar los datos que se analizan en este TFG.

Capítulo 2

Estado del arte

A continuación se revisan las principales tecnologías y técnicas utilizadas en sistemas de posicionamiento en interiores (IPS en adelante). Se hace una diferenciación entre *tecnologías* y *técnicas* ya que el primer concepto se refiere a las diferentes maneras de utilizar señales físicas obtenidas mediante sensores, como señales Bluetooth o campos magnéticos, a fin de lograr los objetivos de un IPS; mientras que el segundo a herramientas abstractas que en principio pueden ser utilizadas con diferentes tecnologías.

Todas las tecnologías y técnicas que se analizarán en este capítulo se han obtenido de diferentes artículos publicados en la última edición de la IPIN, así como del estudio realizado por Ramon F. Brena *et al.*[3].

2.1. TÉCNICAS

2.1.1. MULTILATERACIÓN

Utiliza la geometría para combinar las estimaciones de distancia de diferentes dispositivos de referencia. Estas estimaciones pueden provenir de diferentes medidas como la intensidad de la señal recibida (RSSI, Received Signal Strength Indicator), tiempo de llegada (ToA, Time of Arrival), diferencia en el tiempo de llegada (TDoA, Time Difference of Arrival) y ángulo de llegada (AoA, Angle of Arrival). Si se utilizan tres dispositivos de referencia al combinar las estimaciones, entonces se denomina trilateración (más tarde, en la [sección 5.1](#), se verá de manera más detallada como se realiza el cálculo).

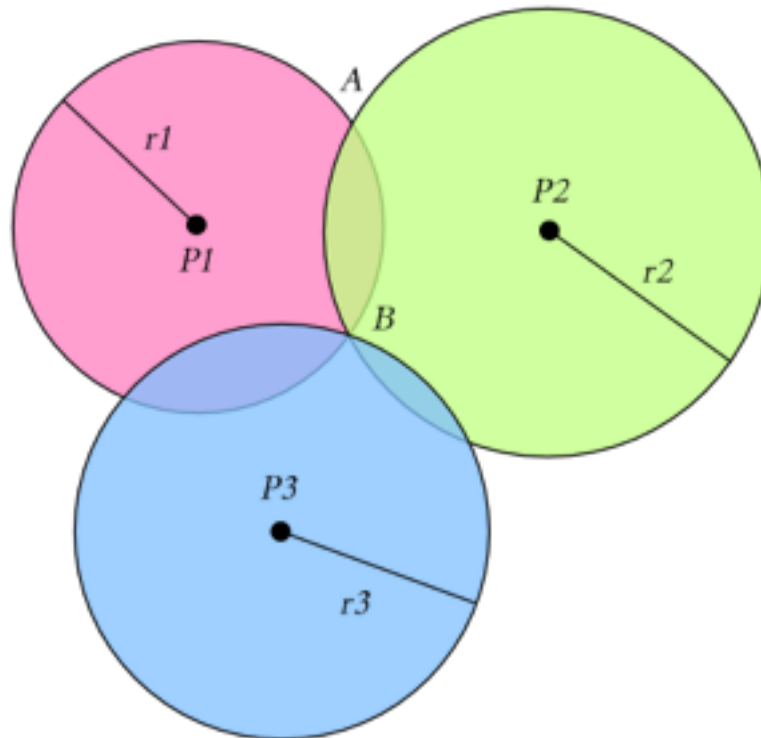


Figura 2.1.1: Trilateración

Fuente: citrusbyte - Indoor positioning with beacons and mobile devices

2.1.2. TIEMPO DE LLEGADA

A veces denominado *tiempo de vuelo* (ToF), es el tiempo que tarda la señal en llegar del emisor al receptor. Si el receptor obtiene este ToA, entonces puede estimar la distancia mediante el uso de la velocidad de la luz (en el caso de señales electromagnéticas).

A menudo esta técnica suele usarse junto a la anterior. Es decir, se estima la distancia a tres o más puntos de referencia mediante ToA y a continuación, usando estas distancias, se aplica un algoritmo de multilateración para obtener la posición del usuario. Por ejemplo, en la [figura 2.1.1](#), los radios $r1$, $r2$ y $r3$ de las circunferencias se obtendrían mediante ToA y luego se aplicaría el algoritmo de trilateración con las circunferencias resultantes.

Esto mismo ocurre con varias de las técnicas que se explicarán a continuación (e.g., TDoA, RSSI). Que son necesarias unirlos a la trilateración para obtener la posición precisa del usuario.

2.1.3. DIFERENCIA EN EL TIEMPO DE LLEGADA

En esta técnica, se calcula el tiempo de llegada de una señal específica a diferentes receptores que están sincronizados entre sí. La diferencia de tiempo entre los diferentes receptores se utiliza para estimar la distancia.

Aunque TDoA y ToA son similares, existen algunas diferencias. ToA difiere en el hecho de que utiliza el tiempo absoluto de vuelo a un único receptor, en vez de la diferencia de tiempos a varios receptores. Por otro lado, en ToA se conoce el momento en que se envió la señal (emisor y receptor están sincronizados), mientras que en TDoA el momento en el que se envió la señal es desconocido (están sincronizados los receptores únicamente).

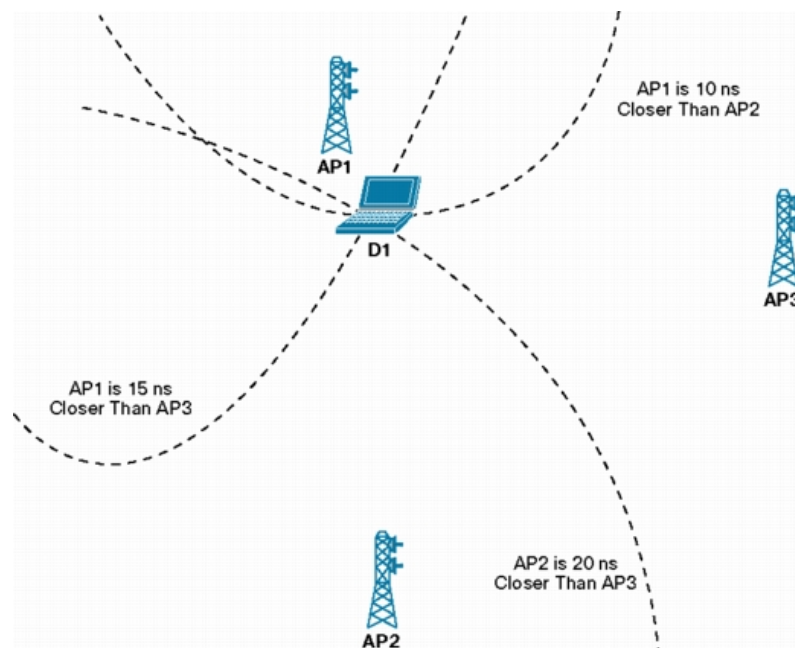


Figura 2.1.2: Diferencia en el tiempo de llegada (TDoA)

Fuente: cisco - [The Technologies behind a Context-Aware Mobility Solution](#)

2.1.4. ÁNGULO DE LLEGADA

Este método estima la posición del objetivo determinando el ángulo de incidencia en el cual las señales llegan al receptor. El dispositivo emisor define una línea que parte del mismo y que incide en el receptor (objetivo) con un ángulo dado. La combinación de varias líneas de varios dispositivos emisores permiten situar al receptor. Al menos son necesarios dos emisores y dos ángulos.

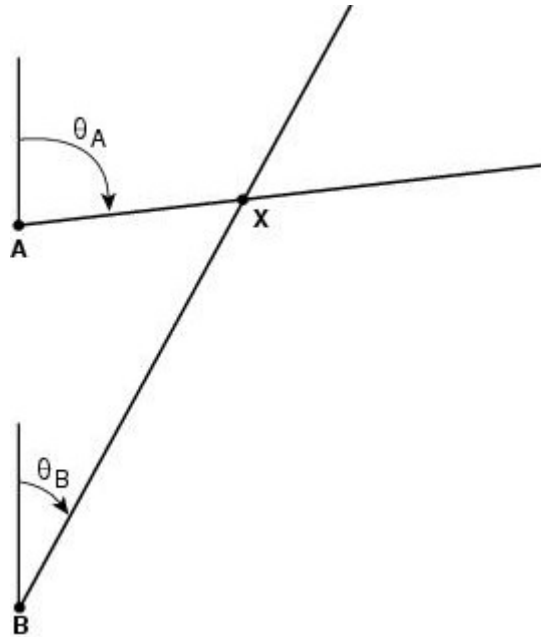


Figura 2.1.3: Ángulo de llegada (AoA)

Fuente: [cisco - Location Tracking Approaches](#)

La ventaja de este sistema es que no requiere ningún tipo de sincronización entre los dispositivos. No obstante, aunque funciona muy bien cuando la línea de visión es clara, la precisión se reduce cuando la señal se refleja, por lo que no funciona nada bien en interiores. Además, requiere de hardware complejo para determinar los ángulos de incidencia.

2.1.5. INDICADOR DE FUERZA DE SEÑAL RECIBIDA (RSSI)

Definimos RSSI como la intensidad de campo de una señal en el punto de recepción. La distancia puede estimarse utilizando un modelo de propagación conocido. Por ejemplo, dada la siguiente figura:

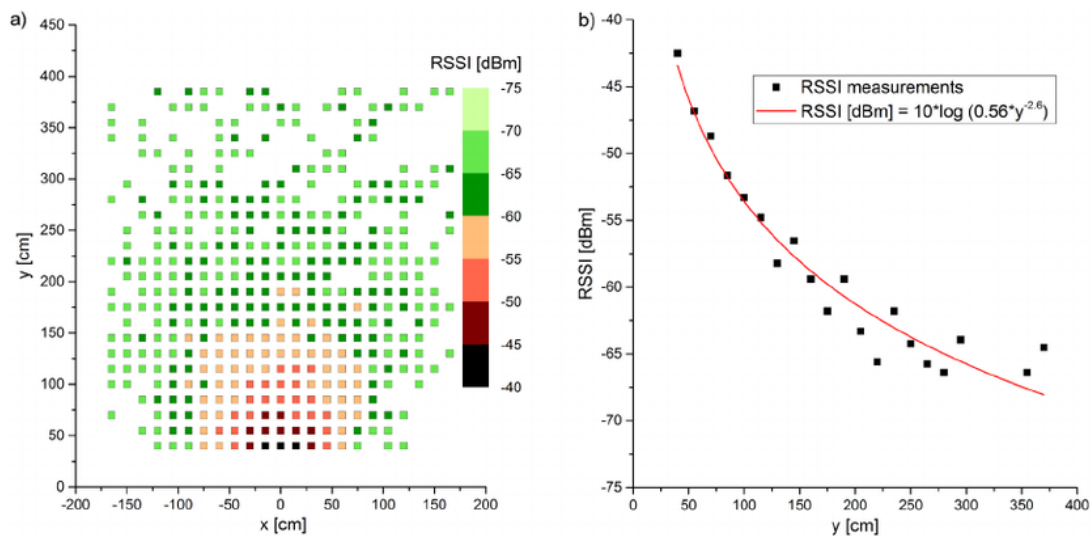


Figura 2.1.4: Mediciones RSSI

Fuente: Development, function and test of a static test bench for UHF-RFID ear tags [4]

La gráfica de la izquierda indica la variación de la intensidad de señal en un plano de dos dimensiones. Podemos apreciar que a medida que nos alejamos de la fuente (0,0) la RSSI se reduce.

Por otro lado, en la gráfica de la derecha, se muestran los resultados para una posición en el eje x fija ($x=0$). De nuevo, a medida que nos alejamos de la fuente la RSSI disminuye; no obstante, no lo hace de manera lineal, sino que sigue un modelo logarítmico. Este modelo puede utilizarse posteriormente para estimar la distancia a partir de la intensidad de señal.

2.1.6. FINGERPRINTING

Esta técnica obtiene la localización aproximada a partir de mediciones de distintas señales: Wi-Fi, Bluetooth, campo magnético, etc. Se divide en dos fases: entrenamiento y estimación de la posición.

En la fase de entrenamiento, se obtiene un mapa con las intensidades de señal recibidas en distintos puntos. A continuación, para estimar la posición, las intensidades de señal observadas en el dispositivo del usuario se comparan con el mapa construido anteriormente utilizando algoritmos de proximidad, como el de k-vecinos más cercanos¹, con el objetivo de estimar la posición del usuario.

¹https://es.wikipedia.org/wiki/K_vecinos_más_próximos

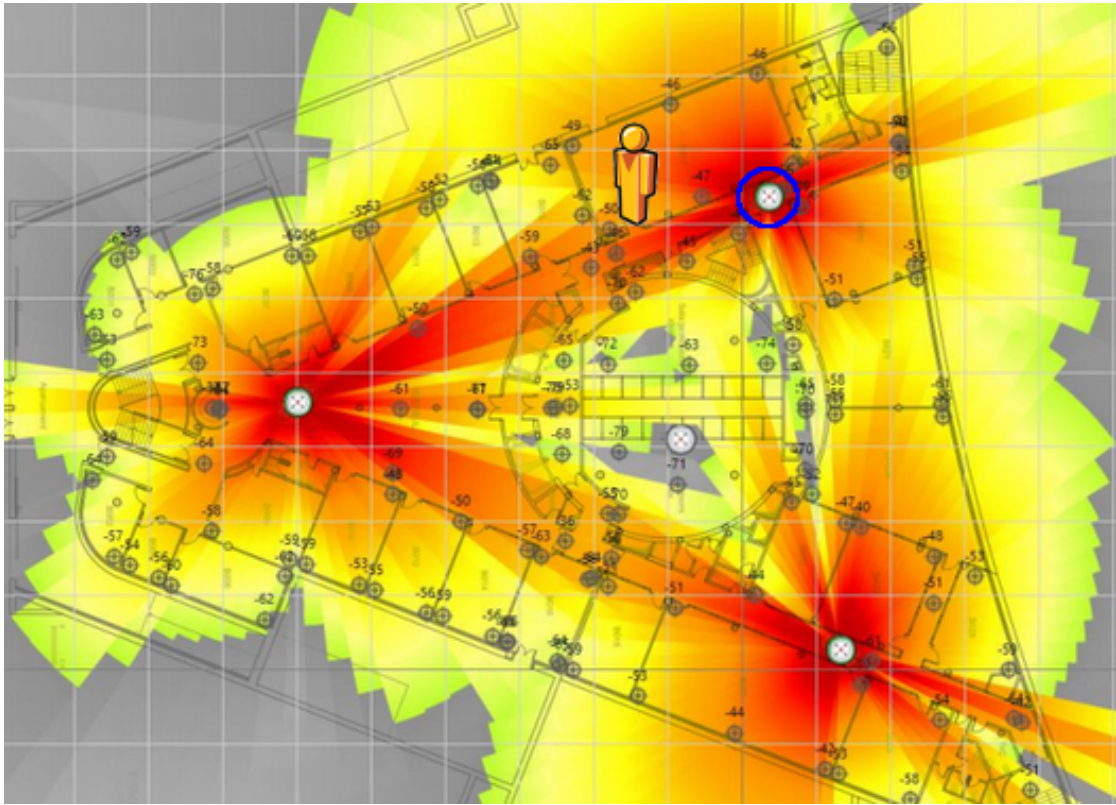


Figura 2.1.5: Fingerprinting
Fuente: Air-Go - Fingerprinting

En la figura [figura 2.1.5](#) podemos ver un posible mapa construido a partir de las intensidades de señal recibidas de tres puntos de acceso Wi-Fi (se redondea en azul el punto más cercano al usuario). Almacenar esta información en una base de datos sería tan sencillo como crear una tabla en la que las filas se corresponde con un vector de características con la información de las intensidades de señal, $[RSSI_a, RSSI_b, RSSI_c]$, asociado a una determinada posición dentro del mapa. E.g., asociamos las intensidades $[-74\text{dBm}, -40\text{dBm}, -50\text{dBm}]$ al punto $(42,42)$.

A la hora de localizar a un usuario, tendríamos que obtener las intensidades recibidas de los puntos de acceso, obteniendo otro vector de características $[RSSI'_a, RSSI'_b, RSSI'_c]$. Este vector de características lo compararíamos con todos los vectores almacenados en la base de datos, obteniendo la localización aproximada del usuario.

2.2. TECNOLOGÍAS ÓPTICAS

Aunque este tipo de señales podrían agruparse junto con otro tipo de radiación electromagnética, como las ondas de radio de una red WiFi, tanto la tecnología como las ventajas y desafíos que presentan son muy diferentes; por ejemplo, las señales ópticas utilizadas en tecnologías de localización tienen varias restricciones asociadas a la línea de visión.

2.2.1. INFRARROJOS

Un sistema de infrarrojos (IR, Infrared) está compuesto de un diodo emisor de luz infrarroja, que emite una señal infrarroja como ráfagas de luz no invisible, y un fotodiodo receptor para detectar y capturar los pulsos de luz, que son después procesados para recuperar la información.

La fiabilidad de estos sistemas se ve afectada por muchas características de la señal óptica emitida, tales como su directividad (en que grado es unidireccional), así como su forma de reaccionar ante obstáculos. La mayoría de sistemas IR requieren una línea de visión clara entre emisor y receptor. Como es evidente, este requisito en sistemas IR IPS es una gran desventaja, ya que no habrá detección en aquellas zonas ocluidas del transmisor o el sensor.



(a) Dispositivo emisor de infrarrojos



(b) Dispositivo sensor

Figura 2.2.1: Sensores infrarrojos para IPS

Fuente: [The Active Badge System](#)

2.2.2. COMUNICACIÓN CON LUZ VISIBLE

La comunicación con luz visible (VLC, Visible Light Communication) es una tecnología que usa luz visible para transmitir datos. Se puede utilizar cualquier tipo de lámpara, pero las luces LED son las más apropiadas. La transmisión de datos usando luz visible es posible debido a la capacidad de la fuente de luz de encenderse y apagarse en muy cortos intervalos de tiempo. Este parpadeo puede ser tan rápido que no pueda ser percibido por el ojo humano.

El principio detrás de VLC es que cada una de las lámparas fijas tiene una codificación de parpadeo diferente, por lo que el sensor, que podría ser transportado por el usuario, recibe la luz y compara la modulación con los esquemas de codificación conocidos y determina cuál es el dominante, lo que permite asociar la posición del sensor con la proximidad de la correspondiente lámpara.

Las ventajas de estos sistemas es que permite la reutilización de la infraestructura de luz artificial disponible; así como que tal disposición no es intrusiva, porque los usuarios humanos solo ven lámparas ordinarias fijadas en el techo.

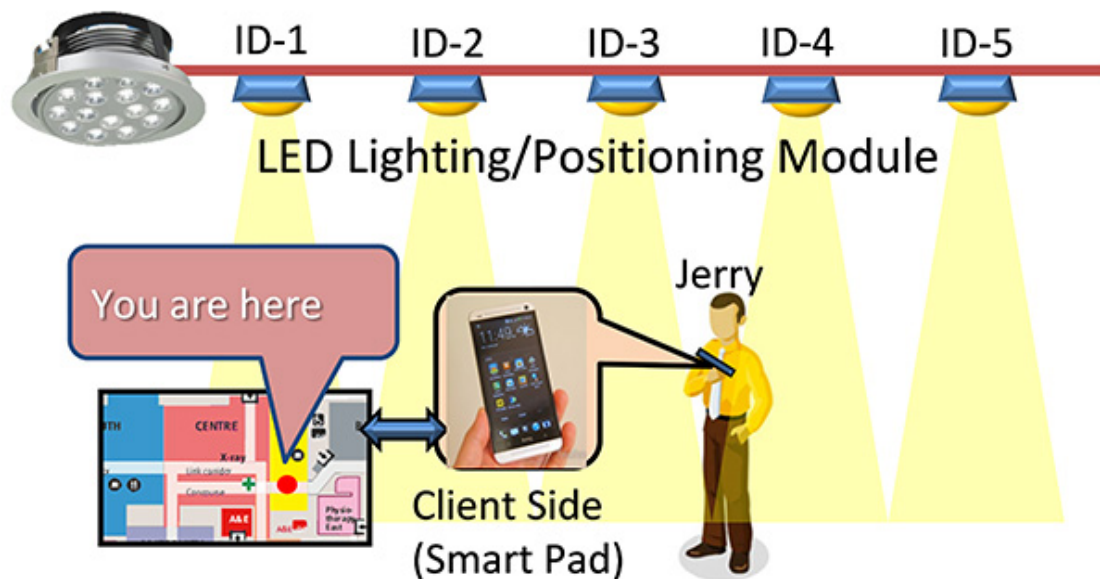


Figura 2.2.2: Sistema de posicionamiento en interiores mediante VLC

Fuente: ITRI TODAY - LED Visible Light Communication

2.3. TECNOLOGÍAS BASADAS EN EL SONIDO

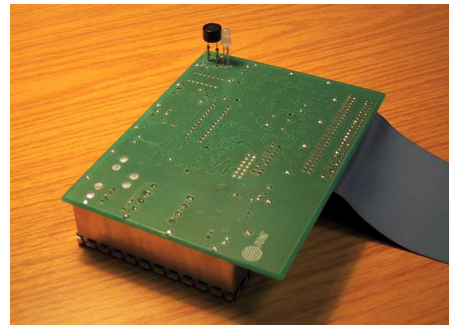
Este tipo de señales se benefician del hecho de que el sonido viaja a una velocidad mucho más lenta que las señales electromagnéticas, permitiendo medir con mayor facilidad el tiempo entre la emisión y la llegada de una señal. Este tiempo puede calcularse mediante la emisión simultánea de una señal de radio y una señal de sonido; la primera llega casi de manera instantánea, con lo que la diferencia entre los tiempos de llegada de una y otra señal pueden utilizarse para calcular la distancia.

2.3.1. ULTRASONIDOS

Los sistemas de localización por ultrasonidos utilizan frecuencias de sonido superiores al rango audible para determinar la posición del usuario, utilizando para ello el tiempo que tarda una señal ultrasónica en desplazarse de un transmisor a un receptor. Una ventaja evidente de las señales de ultrasonidos frente a las señales audibles es que las primeras no son detectables por los seres humanos.



(a) Dispositivo emisor de ultrasonidos



(b) Dispositivo sensor

Figura 2.3.1: Sensores de ultrasonidos para IPS

Fuente: [The Bat Ultrasonic Location System](#)

2.3.2. SONIDO AUDIBLE

También es posible utilizar este tipo de señal sonora para codificar la información para sistemas de localización. Es evidente que la idea de usar sonido audible tiene demasiados inconvenientes; el principal, que molestaría a las personas cercanas. No obstante, existen proyectos sofisticados en los que se utilizan fuentes de sonidos ya presentes, como la música en centros comerciales y otros lugares públicos.

2.4. TECNOLOGÍAS DE RADIO FRECUENCIA

Este tipo de tecnologías utilizadas en los IPS emplean señales de radio. La mayoría de ellos utilizan señales con un ancho de banda muy reducido (banda estrecha), aunque también hay aplicaciones que utilizan una banda muy ancha de frecuencias (espectro ensanchado).

2.4.1. WI-FI

Para la localización en interiores no solo basta con identificar el punto de acceso más cercano; hay que ir más allá para lograr una mayor precisión. Comúnmente se utilizan tres enfoques para localizar a un usuario utilizando tecnología WLAN²:

1. *Fingerprinting*: se vió antes en la [subsección 2.1.6](#). Un patrón de puntos Wi-Fi junto con sus intensidades de señal se compara con una base de datos de patrones conocidos asociados con ubicaciones. Este método requiere una actividad de mapeo anterior para almacenar los patrones de los puntos Wi-Fi en diferentes puntos con el fin de construir la base de datos.

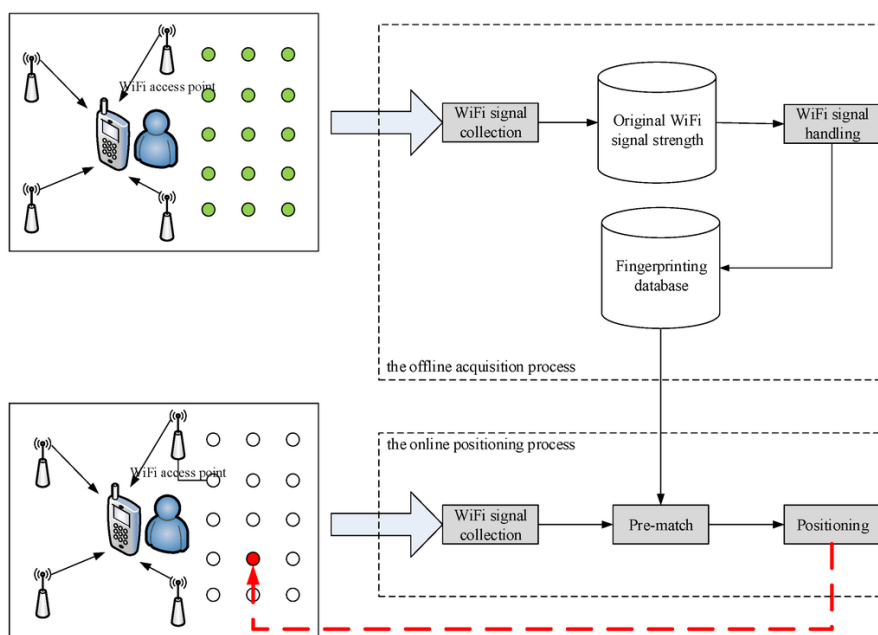


Figura 2.4.1: Algoritmo de fingerprinting mediante Wi-Fi

Fuente: An Improved WiFi Indoor Positioning Algorithm by Weighted Fusion[1]

²IEEE 802.11ac

2. Utilizando el modelo de propagación de una antena conocida y calculando la distancia.
3. La intensidad relativa de varios puntos Wi-Fi conocidos se utiliza para obtener la posición mediante un método de multilateración.

2.4.2. BLUETOOTH

La tecnología *Bluetooth* se considera un competidor de la tecnología Wi-Fi en los sistemas de posicionamiento en interiores, en particular, desde la adopción generalizada del Bluetooth Low Energy (BLE)³, debido a que es compatible con la mayoría de los *smartphones* modernos; es una tecnología de bajo coste; y a su reducido consumo de energía, lo que permite a los emisores funcionar con pilas durante varios meses o incluso años.

Al igual que en los sistemas Wi-Fi, se utiliza la RSSI para obtener la localización. En estos sistemas, existen balizas fijas denominadas *beacons* (análogas a los puntos Wi-Fi) que emiten la señal. La señal es recogida por un smartphone que lleva el usuario y se aplica la técnica correspondiente para calcular la distancia.



(a) Estimate Proximity Beacons



(b) Estimate Stickers

Figura 2.4.2: Diferentes tipos de balizas (beacons) Bluetooth

Fuente: [estimote](#)

Aunque esta tecnología compite con Wi-Fi, algunos sistemas combinan las dos, ya sea mediante técnicas de fingerprinting o multilateración.

³Bluetooth de baja energía

2.4.3. RFID

Un sistema RFID consiste en lectores y etiquetas RFID. El lector puede obtener los datos emitidos por las etiquetas. Estas últimas actúan como una antena, siendo capaces de emitir señales de información, principalmente su ID único. Las etiquetas se pueden clasificar en dos grupos en función de como obtienen la energía para funcionar: son “pasivas” si utilizan la pequeña energía emitida por el lector, recogida mediante la pequeña antena; o “activas” si tienen su propia fuente de alimentación y transmiten periódicamente su ID.

Esta tecnología tiene múltiples usos, como el control de acceso de personal a ciertas áreas. También se han utilizado sistemas RFID para la localización, especialmente cuando la localización precisa del usuario no necesita ser conocida en todo momento, sino sólo cuando pasa por lugares de control importantes. En estos casos, la ubicación del usuario se da a menudo en forma de ubicación lógica (e.g., “en la puerta”, “dentro de la sala”, “fuera del recinto”) y no en un sistema de coordenadas.

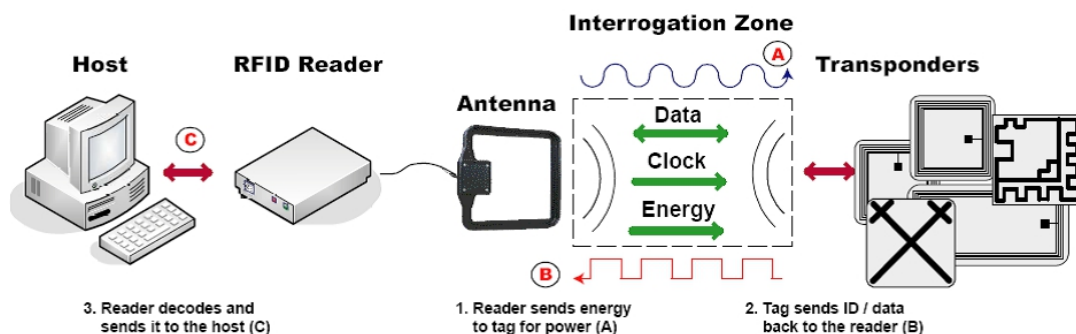


Figura 2.4.3: Componentes de un sistema RFID

Fuente: Chips Tags and Scanners Ethical Challenges for Radio Frequency Identification[5]

En la [figura 2.4.3](#) las etiquetas son “pasivas”. También podemos observar que la información emitida por las etiquetas (“transpondedores”) llega a un host a través del lector RFID.

2.5. TECNOLOGÍAS PASIVAS

En sección agrupamos a aquellas tecnologías que dependen de señales naturales, es decir, de señales que no tiene ningún tipo de información incrustada (e.g., en el caso

de las señales RFID, la información incrustada es el identificador único). Este tipo de sensores recogen las señales disponibles del medio ambiente.

2.5.1. CAMPO MAGNÉTICO

La mayoría de estos sistemas utilizan la intensidad del campo magnético de la Tierra y su orientación para realizar el posicionamiento.

Un IPS basado en campos magnéticos utiliza un magnetómetro para medir las variaciones del campo magnético, que se utilizará para posicionar al usuario. La estimación de la posición se realiza comúnmente a través de técnicas como el *fingerprinting*.

2.5.2. SENSORES INERCIALES

Suele denominarse *navegación por estima*. Es la navegación por medios analíticos teniendo en cuenta la situación inicial del usuario, su rumbo y su velocidad. El problema principal de este tipo de navegación es la acumulación progresiva de errores, ya que un pequeño error en la dirección del usuario podría significar un error enorme cuando se viaja una distancia muy grande.

Este tipo de sistemas utilizan acelerómetros y giroscopios, combinando la información con otros sensores para lograr un buen rendimiento. Los acelerómetros pueden utilizarse para determinar las variaciones en la posición del usuario cuando se detecta aceleración en una determinada dirección. Tal estimación puede mejorarse usando un giroscopio para detectar los cambios de dirección. Por otro lado, mediante el acelerómetro también podemos confirmar el hecho de que el usuario esté caminando, reconociendo el movimiento que se produce al caminar (podómetro).

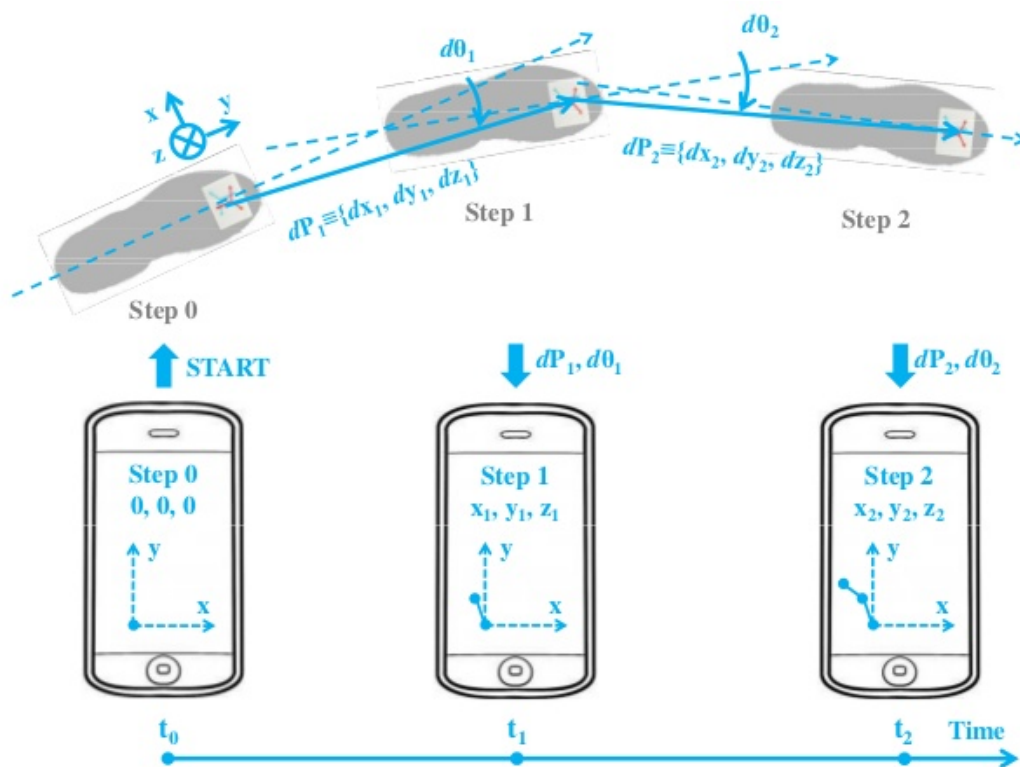


Figura 2.5.1: Navegación por estima

Fuente: Pedestrian Dead Reckoning Simplified

En la [figura 2.5.1](#) podemos ver como se utilizan el acelerómetro y el giroscopio de un smartphone para reconocer las variaciones en posición y rumbo del usuario. Utilizando estos datos (e.g., dP_1 y $d\theta_1$) y comparándolos con los datos del estado anterior, es posible calcular la trayectoria del usuario.

2.5.3. VISIÓN POR ORDENADOR

Estos sistemas hacen uso de la información recogida por cámaras y técnicas de procesamiento de imagen para identificar y rastrear objetos. Hay dos enfoques para estos sistemas. En un primer enfoque, una o varias cámaras se fijan en el entorno en el que se supervisarán a los usuarios y se utilizan estas para rastrearlos. En otro enfoque menos común, es el usuario el que lleva la cámara, que va capturando imágenes o vídeo, que se comparan con archivos previamente almacenados en la base de datos.

2.6. COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En la siguiente tabla comparamos las características de las tecnologías anteriormente analizadas. De esta manera será más fácil optar por una u otra.

Tabla 2.6.1: Comparación de las principales tecnologías para IPS

CI: coste de instalación; CU: coste para el usuario.

Tecnología	Exactitud aprox.	CI	CU	Ventajas	Inconvenientes
Infrarrojos	57cm - 2.3m	↑	↓	Barato para el usuario	Interferencia de la luz del Sol
VLC	10cm	↑	↓	Barato para el usuario	Infraestructura cara
Ultrasonidos	1cm-2m	↑	↑	Buena precisión	Coste, interferencias
Sonido audible	Metros	↓	↓	Bajo coste	Baja precisión
Wi-Fi	1.5m	↓	↓	Bajo coste, buena precisión	Pueden cambiar los puntos de acceso
Bluetooth	30cm-metros	↓	↓	Bajo coste, buena precisión	El rango de las balizas es reducido
RFID	1-5m	↑	↓	Coste muy bajo	Precisión muy reducida
Campo magnético	2m	↓	↓	No se necesita infraestructura, buena precisión	Requiere mapeo
Sensores inerciales	2m	↓	↓	Coste bajo	Acumula error
Visión por ordenador	1cm-1m	↓	↓	Coste bajo	Sensibilidad a cambios de luz

Por otro lado, es importante destacar también cual es la cobertura que ofrecen cada una de estas tecnologías. En un estudio realizado en 2014 por Luca Mainetti *et al.*[6], podemos apreciar esta característica de algunas de las tecnologías estudiadas (ver figura 2.6.1).

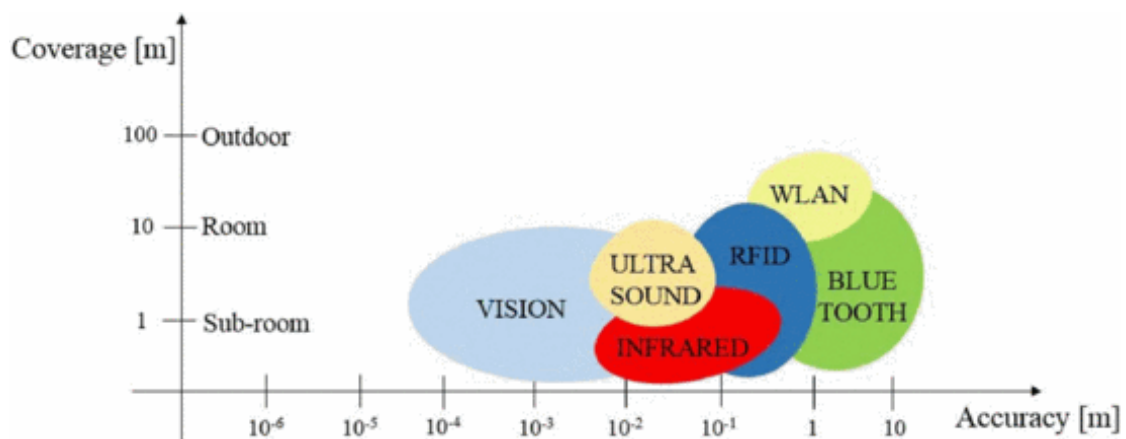


Figura 2.6.1: Tecnologías comparadas por su exactitud y cobertura
Fuente: A survey on indoor positioning systems[6]

2.7. TRABAJOS RELACIONADOS

En esta sección presentamos los trabajos que se están realizando en este campo y que nos permitirán estimar cual es la dificultad de la implementación al combinar tecnologías y técnicas. También nos permitirán estar al tanto de las novedades relacionadas con el material de este TFG.

En un estudio realizado por Pavel Davidson y Rober Piché[7], se ofrece una visión general de los métodos existentes para el posicionamiento en interiores usando un smartphone. Incluye enfoques basados en Wi-Fi y Bluetooth, fingerprinting usando el campo magnético, navegación asistida apoyada en los planos del edificio, y navegación usando otros sensores propios del dispositivo.

Aunque los métodos de posicionamiento basados en Wi-Fi y Bluetooth considerados en esta encuesta son enfoques relacionados con el fingerprinting, también se hace un pequeño inciso en como funcionaría un sistema usando estas tecnologías junto con la técnica de trilateración.

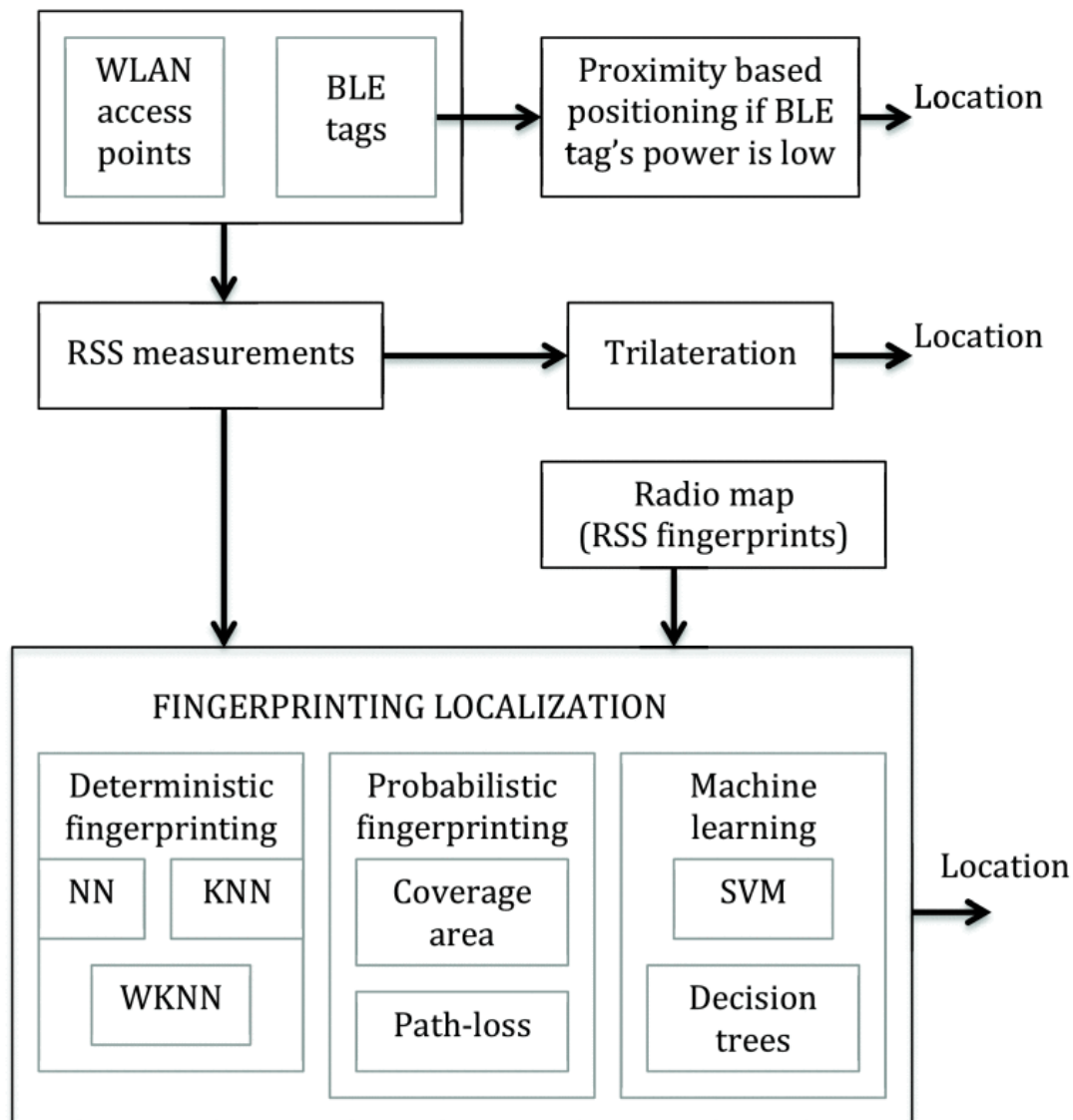


Figura 2.7.1: Aproximaciones para posicionamiento usando RSSI

Fuente: A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones[7]

Suk-Hoon Jung *et al*[8] presentan un sistema basado en fingerprinting WLAN. Se adopta un método basado en el aprendizaje sin supervisión para construir mapas de intensidad de señal recopiladas mediante *crowdsourcing* (i.e., los datos se obtienen de los usuarios del sistema) y la aplicación de un algoritmo probabilístico para el posicionamiento usando tales mapas.

En la misma línea, Suining He y S.-H. Gary Chan[9] examinan los avances recientes

en dos áreas de la localización en interiores mediante fingerprinting Wi-Fi: técnicas avanzadas de localización y despliegue eficiente del sistema. Respecto a la primera, presentan como utilizar patrones en las señales, colaboración entre usuarios y sensores de movimiento. En cuanto al despliegue eficiente del sistema, discuten los recientes avances en la adaptación a los cambios del fingerprinting, la calibración de dispositivos muy diversos para la recolección de señales y la eficiencia energética al usar smartphones.

Wewi Xu *et al*[10] optan por una aproximación VLC usando LEDs. A diferencia de otros sistemas donde el terminal a localizar tiene un único receptor, en este sistema se considera un terminal con múltiples receptores del que se conocen sus posiciones relativas.

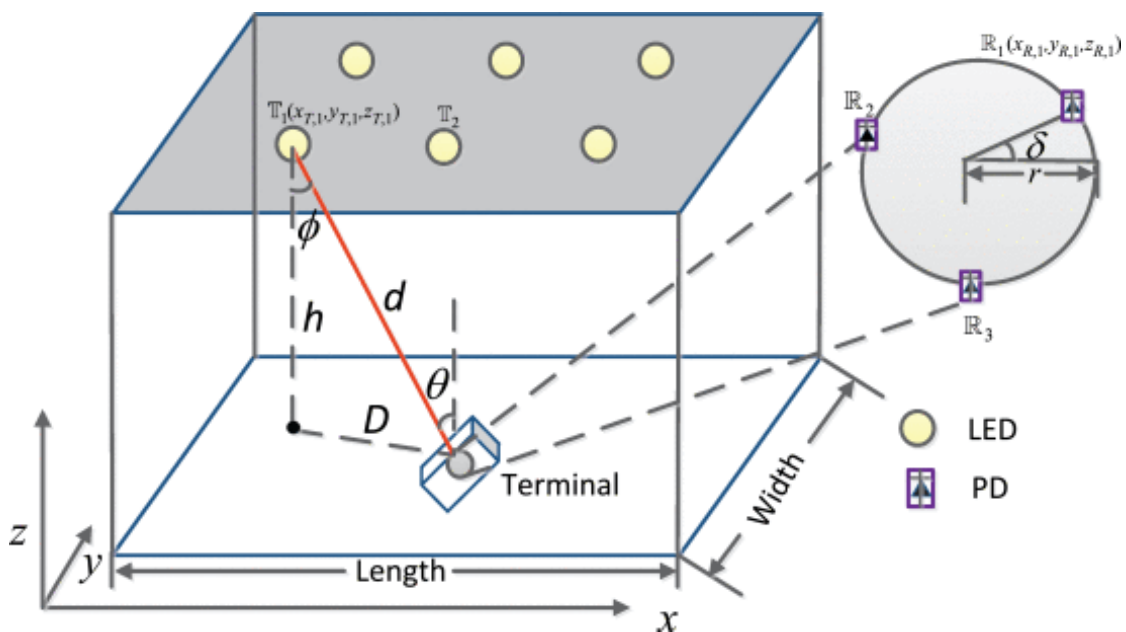


Figura 2.7.2: Posicionamiento VLC con múltiples receptores en el terminal
Fuente: Indoor Positioning for Multiphotodiode Device Using Visible-Light Communications[10]

En la **figura 2.7.2**, el terminal tiene tres receptores (PD) dispuestos en una circunferencia con ángulos conocidos.

Otro sistema basado en VLC es el desarrollado por Huichao Lv *et al*[11]. Este utiliza la intensidad de señal recibida por su simplicidad.

Alejándose de enfoques basados en fingerprinting, donde normalmente se requiere una laboriosa etapa de entrenamiento para recolectar las mediciones, Vibhu Varshney *et al*[12] presentan una aplicación desarrollada para dispositivos Android que

hace uso de las señales Wi-Fi y Bluetooth, posicionando al usuario usando el clásico algoritmo de trilateración mediante RSSI.

2.8. CONCLUSIONES

A la hora de prototipar un sistema de posicionamiento en interiores de manera rápida queda claro que la tecnología más idónea son las balizas bluetooth, tanto por el coste de las mismas, como por su facilidad de uso. Además, una de las ventajas más a destacar, y por la que hemos decidido usar esta tecnología, es que estas balizas pueden acoplarse/desacoplarse en distintos puntos de manera muy rápida; al contrario que otras tecnologías (Wi-Fi) donde los puntos de acceso están más o menos fijos. De esta manera, se pueden realizar varios experimentos cambiando la disposición de las balizas.

En cuanto a las técnicas, es fácil darse cuenta de que para un sistema de posicionamiento preciso, que no solo sitúe al usuario de manera lógica (e.g., en la cocina, en el salón, fuera del recinto), es necesario combinar alguna de estas técnicas junto con trilateración o fingerprinting. Es decir, mediante la técnica de ToF no se puede saber con exactitud la posición de un usuario, sino que serían necesario, por ejemplo, tres estimaciones de distancia mediante ToF para trilaterar con precisión al usuario. Es por ello por lo que posteriormente se hará un análisis de estas dos técnicas para comprobar cual se adapta mejor a nuestro problema.

Capítulo 3

Desarrollo con sistemas propietarios

Como se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos de este trabajo es el desarrollo de un sistema de posicionamiento en interiores de bajo coste. Dos de los principales problemas al desarrollar un sistema propio, frente al usar herramientas de terceros, son el gasto en infraestructura y un mayor tiempo de desarrollo. Por este motivo, se decidió en primera instancia acudir a un proveedor de este tipo de sistemas que ofreciera la posibilidad de crear aplicaciones de localización de forma rápida. Tras una pequeña búsqueda, surgieron dos proveedores: IndoorAtlas¹ y Situm². En esta sección realizamos una breve descripción de ambos y explicamos el funcionamiento de uno de ellos (Situm), junto con las experiencias que se tuvieron al usarlo.

3.1. INDOORATLAS



¹<http://www.indooratlas.com>

²<https://situm.es/es>

Este proveedor define su producto como “la única tecnología geomagnética híbrida de posicionamiento en interiores que se hace llegar a cientos de desarrolladores de todo el mundo como una plataforma escalable en la nube”.

Su funcionamiento se basa en el campo magnético de la tierra. Utilizando la brújula y otros sensores de un smartphone, su software es capaz de utilizar el campo magnético dentro de un edificio como un mapa para rastrear la posición del usuario de manera precisa en tiempo real.

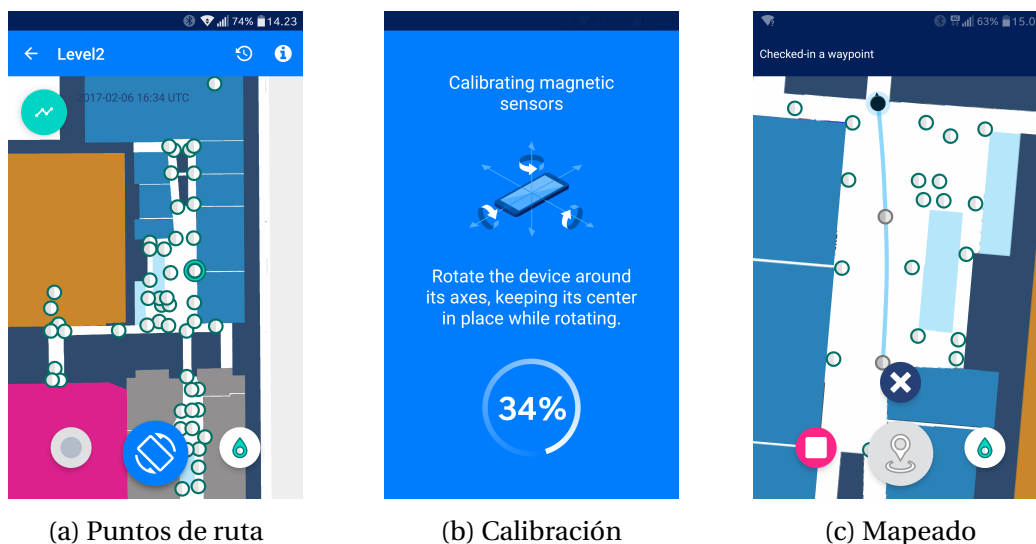


Figura 3.1.1: Flujo de trabajo en IndoorAtlas para mapear un edificio

Fuente: [Mapping Quick Start Guide with MapCreator 2](#)

El proceso para generar el mapa es muy similar tanto con este proveedor como el que veremos posteriormente. Tras añadir los planos del edificio a la plataforma online tenemos que realizar los siguientes pasos usando un aplicación móvil (tras desplazarnos al edificio que deseamos mapear).

1. En primer lugar hay que seleccionar varios puntos de ruta, i.e., lugares en el plano que sean accesibles a pie. El objetivo es cubrir el plano en su totalidad, como se puede ver en la [figura 3.1.1a](#).
2. A continuación calibramos los sensores del móvil ([figura 3.1.1b](#)).
3. Por último, iniciamos la etapa de recolección de datos moviéndonos de un punto de ruta a otro como vemos en la [figura 3.1.1c](#).

Una vez completados estos pasos, y tras subir los datos a la plataforma en la nube, se genera un mapa que podemos usar para la localización en interiores.

3.2. SITUM

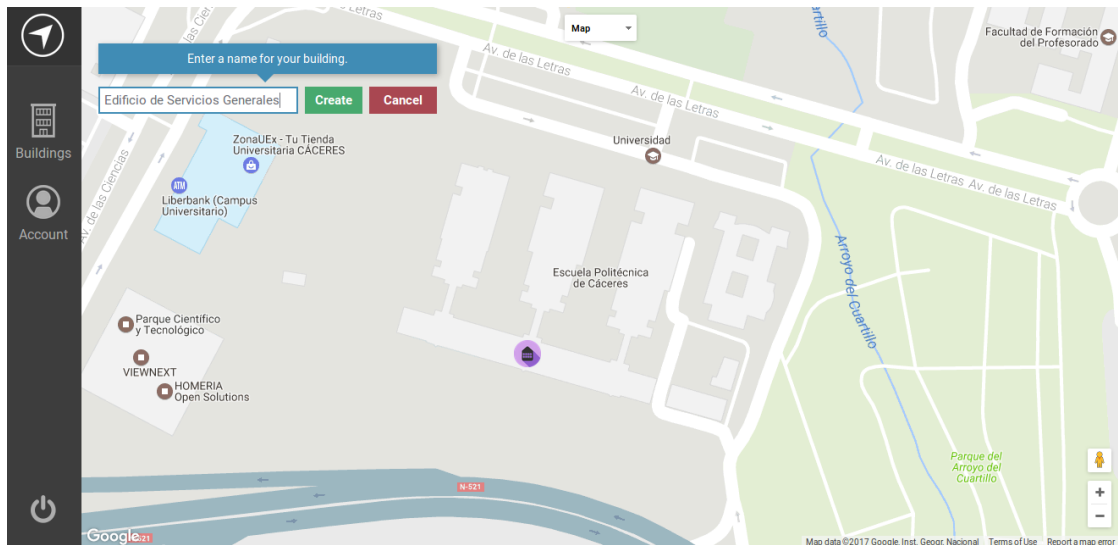


De manera análoga a IndoorAtlas, Situm se define como un “proveedor de localización universal”, con una plataforma que permite “máxima precisión y mínimo tiempo de despliegue”, y que ofrece la posibilidad de crear aplicaciones de localización en interiores para Android e iOS.

Aunque en su página web no explican el funcionamiento interno de su servicio, es fácil determinar que, al igual que IndoorAtlas, utilizan un enfoque híbrido en el que usando varios sensores del móvil recogen datos del entorno para crear un mapa mediante fingerprinting. A continuación, veremos como se intentó utilizar este servicio para crear un mapa del Edificio de Servicios Múltiples de la Escuela Politécnica.

3.2.1. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

Como se puede ver en la **figura ??**, el primer paso consiste en seleccionar el edificio del cual se quiere crear el mapa para interiores, asignándole un nombre.




Una vez seleccionado el edificio, tenemos que indicar la planta que se va a mapear, y subir una imagen del plano de esa planta.

New Floor

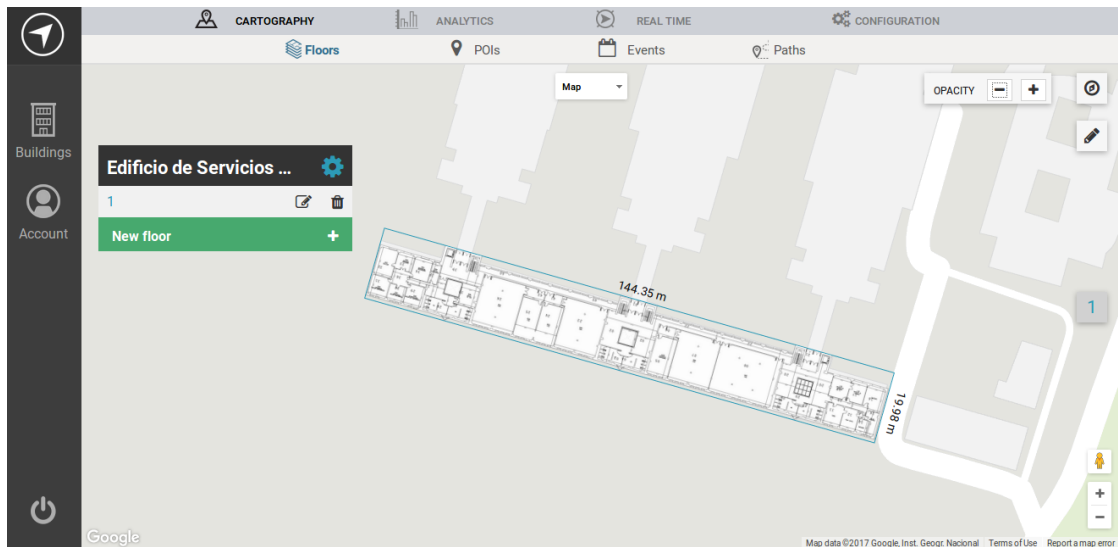
Indicate level *

Indicate level height

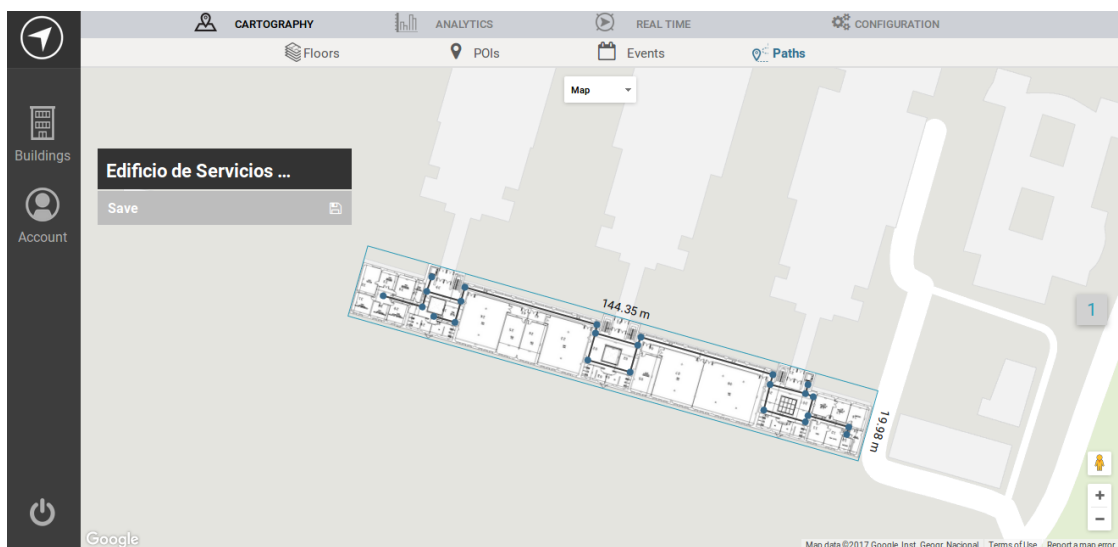
Upload map *


servicios_generales_planta_1.png

Seguidamente, la imagen que hayamos subido aparecerá en el mapa. Tenemos que ajustar esta el edificio real. Como se puede ver en la siguiente figura, tras ajustar el plano del edificio, la aplicación nos muestra una aproximación de las medidas del edificio; en este caso, 144.35m x 19.98m. Estas medidas son muy similares a las medidas reales del edificio, obtenidas del propio plano (142.75m x 14.40m)



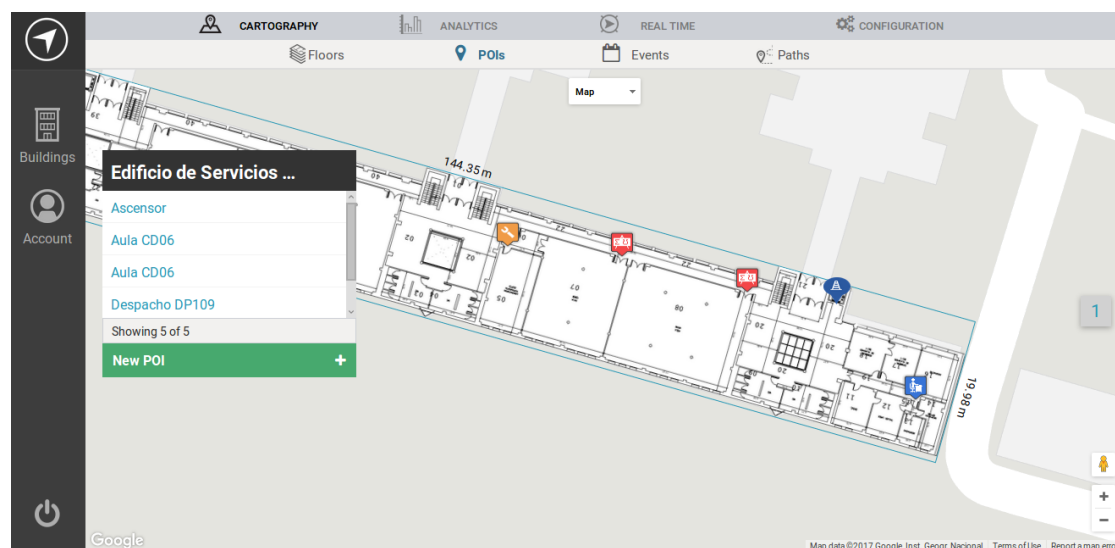
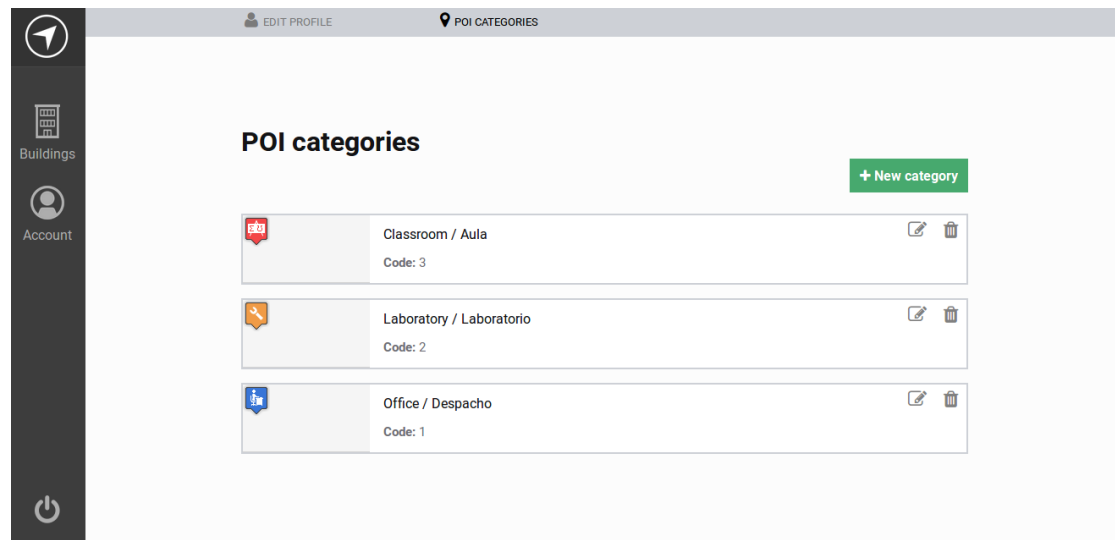
El siguiente paso es seleccionar las rutas que son accesibles en el mapa. En la siguiente imagen podemos ver que, uniendo varias puntos de ruta, hemos conseguido cubrir todo el mapa (el objetivo es navegar por los pasillos, no por el interior de las clases, de ahí que no haya puntos de ruta dentro de estas).



Una vez completado este paso, podemos empezar a recolectar datos mediante la aplicación móvil. Dado que el proceso es el mismo que el explicado anteriormente en la [sección 3.1](#), no volvemos a explicarlo aquí de nuevo.

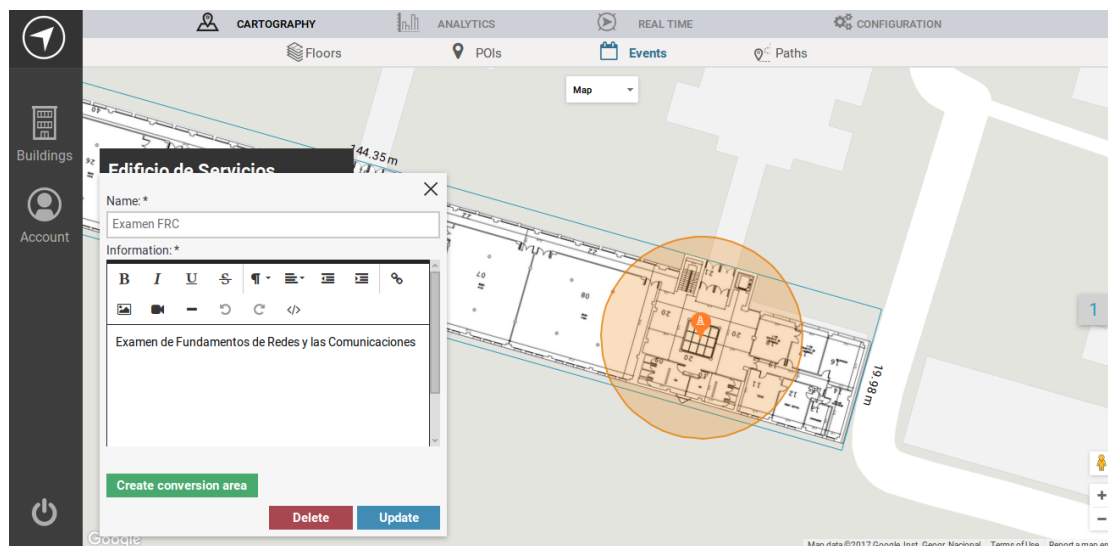
Tras la generación del mapa, podemos empezar a utilizar la utilidad de navegación en interiores.

Una de las ventajas de este proveedor es que permite crear puntos de interés en el mapa.



En este caso, hemos creado puntos de interés para las aulas, las escaleras y los despachos. Estos puntos de interés aparecen como seleccionables en el mapa, lo que permite iniciar la navegación a alguno de ellos, de manera similar a como ocurre en Google Maps cuando queremos ir de un origen a un destino.

Por último, destacar que este proveedor también permite la creación de “eventos”. Cada evento tiene una información asociada. Cuando el usuario está usando la navegación, si entra en la región del evento, se le mostrará la información del mismo.



3.3. CONCLUSIONES

Desafortunadamente, tras generar los mapas usando ambos proveedores, no conseguimos la precisión esperada. Se intentó realizar mapas de zonas más abiertas, como el Pabellón de Informática, pero los resultados fueron aun peores.

Se intentaron seguir todas las recomendaciones a la hora de obtener los datos para el mapeo: caminar de la manera más natural posible con el móvil apuntando en la dirección del movimiento, pasar por el mismo punto de ruta varias veces, realizar varias iteraciones sobre la misma zona, etc. No obstante, no se mejoró la precisión en ninguna plataforma.

Por este motivo se decidió desarrollar una solución *ad-hoc* que contemplase las características de cada entorno. El primer paso consistiría en elegir la técnica que mejor se adecuara a la tecnología disponible (balizas Bluetooth), como veremos en la siguiente sección.

Capítulo 4

Desarrollo con sistemas no propietarios: tecnología

Como hemos comentado anteriormente, el uso de balizas Bluetooth de bajo coste nos permite alterar de manera muy sencilla el entorno de pruebas, i.e., mientras que los puntos Wi-Fi no los podemos mover de un lado a otro (en nuestro caso), con los beacons si se puede hacer esto, lo que permitiría realizar numerosas pruebas en las misma habitación/edificio simplemente modificando la disposición de estos.

Aunque el grupo de investigación dentro del cual se realizó este TFG ya disponía de varios beacons, se realizó una pequeña búsqueda para comprobar si había otro tipo de beacon que se ajustase mejor al problema por sus funcionalidades.

Es por ello que en este capítulo realizamos, en primer lugar, un breve repaso sobre los diferentes tipos de beacons encontrados, y cual decidimos utilizar finalmente. A continuación, analizaremos como estimar la distancia al beacon mediante el valor de la intensidad de señal, y mostraremos las pruebas que se han llevado a cabo para comprobar como afecta la distancia del dispositivo de medición al error en la estimación de la distancia mediante RSSI.

4.1. ELECCIÓN DE DISPOSITIVOS BLUETOOTH (BEACONS)

Tras una búsqueda de diferentes proveedores, se obtuvo la tabla que se puede ver en la siguiente página. Los aspectos que más nos interesaban era el precio, el alcance y las funcionalidades extra que pudieran ofrecer.

Fabricante	Modelo	Precio (\$)	Alcance (m)	Duración de la batería	SDK	Sensores	Impermeable	Funcionalidades interesantes
	Location Beacon	99 (pack de 3)	200	1 año		Acelerómetro, T ^a , luz, magnetómetro y presión		Red inalámbrica en malla, GPIO, RTC, LED, 1Mb EEPROM y NFC programable
Estimote	Proximity Beacon	59 (pack de 3)	70	2 años	Android & iOS (+ iOS-Indoor-SDK)	Movimiento y T ^a	✗ (A prueba de salpicaduras y polvo)	NFC
	Sticker Beacon	99 (pack de 10)	7	1 año		Movimiento y T ^a		n/a
	Video Beacon	99 (pack de 3)	10	Alimentado por USB		✗		WiFi, HDMI, USB y 1GB almacenamiento eMMC
	Series 10	5	Hasta 50	3-4 meses		T ^a		n/a
Gimball	Series 21	30	Hasta 50	18 meses	Android & iOS (orientado al geofencing)	T ^a	✗	Incluye antena direccional secundaria y luz LED externa para comprobar el estado de la batería
	U-Series 5	25	Hasta 30	Alimentado por USB		✗		Factor de forma pequeño
Radius Networks	Dot	14	Desde 5 hasta 50	Desde 30 días (tasa de emisión de 100ms) hasta 285 días (tasa de emisión de 1000ms)		✗	✗ (Resistente al clima)	n/a
	USB	29	Desde 5 hasta 30	Alimentado por USB	Android & iOS		n/a	n/a
	X4	29	Desde 5 hasta 50	Desde 18 meses (tasa de emisión de 100ms) hasta 184 meses (tasa de emisión de 1000ms)	(Campaign Kit & Proximity Kit)		✓	Resistencia a temperaturas extremas (-40°C a +85°C)
	Beacon	60 (pack de 3)	Hasta 50	Desde 6 meses (tasa de emisión de 100ms) hasta 2 años (tasa de emisión de 350ms)		✗	✗	n/a
	Beacon Pro	87 (pack de 3)	Hasta 80	Hasta 60 meses		Acelerómetro y luz	✗ (A prueba de salpicaduras y polvo)	NFC, reloj en tiempo real, indicador LED
Kontakt	Card Beacon	87 (pack de 3)	Desde 10 hasta 50	8 meses	Android & iOS & API	✗	✗	2mm de espesor, NFC, RFID e interruptor de encendido/apagado
	Gateway	119	Hasta 50	Alimentado por USB		✗	✗	Realiza un seguimiento de todos tus beacons en tiempo real. Envía la información a la nube.
	USB Beacon	60 (pack de 3)	Hasta 70	Alimentado por USB		✗	n/a	Permite configurar los beacons mediante una aplicación.
	Tough Beacon	81 (pack de 3)	Hasta 70	Desde 6 meses (tasa de emisión de 100ms) hasta 2 años (tasa de emisión de 350ms)		✗	✓ (Grado de protección IP-68)	Posee enganches para montarlo en diversos espacios No se puede cambiar la batería.
	AA	87 (pack de 3)	Desde 100 hasta 400	3 años			✗ (Resistente al agua y al polvo)	n/a
BlueCats	USB	75 (pack de 3)	Desde 20 hasta 40	Alimentado por USB	Android & iOS & API	✗	n/a	Transmisión de datos de doble sentido
	Coin	45 (pack de 3)	Desde 100 hasta 400	1 año			✗ (Resistente al agua y al polvo)	Se puede conectar a diversos sensores

De todos los mostrados, destacamos dos por sus funcionalidades. El primero de ellos son los *Location Beacon* de Estimote ya que, a parte de su gran alcance, disponían de un SDK para realizar aplicaciones de posicionamiento en interiores¹. Desafortunadamente, el SDK solo estaba disponible para iOS con lo que nos era imposible comprobar su funcionamiento con los recursos disponibles.

Por otro lado, nos llamó la atención el *Gateway* de Kontakt. Este es un beacon especial que si fija a la pared dentro de una sala y permite rastrear otros beacons del mismo fabricante; normalmente se usaban junto a los *Card Beacon*, ya que las personas a rastrear llevaban estos a modo de tarjetas de identificación². No obstante, el problema que tenía este sistema es que la precisión ofrecida no era muy alta, y parecía más enfocado a rastrear la posición de los usuarios de manera lógica (e.g., en la cocina, fuera de la sala, etc.). Es por ello que también descartamos este tipo de beacon.

En conclusión, dado que ningún beacon tenía ninguna característica especial a la hora de desarrollar un sistema de posicionamiento en interiores, decidimos usar de los que ya disponíamos.

4.2. CÁLCULO DE LA DISTANCIA

4.2.1. MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA DISTANCIA

Se puede estimar la distancia a un dispositivo Bluetooth conociendo la intensidad de señal recibida a partir de la siguiente fórmula:

$$RSSI = -(10 \times n) \log_{10}(d) - A \quad (4.1)$$

Donde

- *RSSI* es el indicador de la intensidad de señal recibida en *dBm*.
- *n* es la constante de propagación de la señal.
- *d* es la distancia entre el emisor y el receptor de la señal.
- *A* es el valor de la RSSI cuando la separación entre emisor y receptor es de 1m. Es decir, es un RSSI de referencia.

Dado que lo que queremos obtener es la distancia, debemos despejar *d* en la ecuación **ecuación 4.1**, obteniendo:

$$d = 10^{\left(\frac{A-RSSI}{10 \times n}\right)} \quad (4.2)$$

El valor del *RSSI* lo podemos obtener. *A* es un valor calculado por el fabricante y que está incrustado en las tramas enviadas por el beacon, por ejemplo, en el caso

¹<https://estimote.com/indoor/>

²Para ver el funcionamiento de este sistema, puede visitarse: <https://www.youtube.com/watch?v=v03DZueYikw>

de los beacon de Kontakt (los que estamos usando) este valor es de -77dBm (ver [figura 4.2.1](#)). Este parámetro a veces se le llama *TxPower* (potencia de emisión) y normalmente puede modificarse. Cuanto mayor es la potencia de emisión, mayor es el alcance del beacon, a expensas de una reducción en la duración de la batería.



Figura 4.2.1: Control para modificar la potencia de emisión en beacons Kontakt

Por lo tanto, el único valor que nos hace falta obtener es n . Muchos autores dan a este parámetro el valor 2 ya que es el valor para esta constante en el vacío. No obstante, nuestra idea era calcular el valor de esta constante empíricamente. Para ello, en primer lugar, tomamos la ecuación [ecuación 4.1](#) y despejamos esta constante.

$$n = \frac{A - RSSI}{10 \cdot \log_{10}(d)} \quad (4.3)$$

Para obtener el valor de n lo que haremos es tomar medidas de *RSSI* a distintas distancias (d fija), sabiendo que nuestros beacons transmiten a -77dBm (A). Por ejemplo, situamos el dispositivo móvil a 2m del beacon, tomamos 50 medidas de la *RSSI* y con la media de todas ellas despejamos en la anterior fórmula. Repetimos este proceso con varias distancias hasta tener varios valores de n de los cuáles podemos obtener también la media.

En la siguiente sección se explica el proceso que se ha seguido para obtener estas medidas y las conclusiones que se han obtenido.

4.2.2. CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL

Como hemos dicho anteriormente, el objetivo de esta sección es calcular el valor de esta constante en nuestro entorno de trabajo, en vez de usar el valor por defecto (2). El objetivo es mejorar la precisión de nuestro sistema, ya que esta constante influye en la estimación de la distancia al beacon.

Para ello, cada vez que tomemos una medida vamos a guardar los siguientes datos:

Medida
scan_id: long
trace_id: long
bluetooth_adress: string
bluetooth_name: string
measuring_device: string
place: string
real_distance: int
rss: int
tx_power: int
timestamp: datetime

Figura 4.2.2: Datos almacenados de una medición obtenida de un beacon

A continuación, se realizaron diferentes medidas dentro de varios edificios de la Escuela Politécnica de Cáceres. Se usaron dos dispositivos para realizar las mediciones de RSSI: un Motorola E2 y un Smartphone de la OCU. El objetivo de realizar las mediciones con dos dispositivos era averiguar hasta que punto afectaba el dispositivo usado al valor de la medición.

Para realizar las medidas, se utilizó una cinta métrica para colocar el beacon a distintas distancias del dispositivo móvil, tal y como se puede ver en la [figura 4.2.3](#).

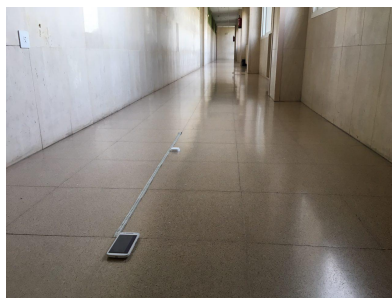


Figura 4.2.3: Toma de medidas con dispositivo Motorola E2 y beacon Kontakt. Lugar: Edificio de Servicios Generales de la EPCC (Planta 2ª)

Las medidas se tomaron en diferentes lugares:

- Edificio de Servicios Generales (Planta 2ª)
- Laboratorio de Investigación de Ingeniería del Software.
- Cámara reverberante
- Cámara de emisión

Las medidas en la cámara reverberante y en la cámara de emisión nos permitirán saber como afecta el nivel de reflexión de la señal a la estimación de la distancia. Las paredes del primer lugar están diseñadas para maximizar la reflexión, al contrario que las del segundo.

Tras tomar las medidas durante varios días, obtuvimos varios datos. Presentamos la consulta SQL que usamos para obtener la información de estas medidas.

```
SELECT min(timestamp)::date as fecha,  
       bluetooth_address as bt_addr,  
       real_distance as d,  
       AVG(rssi) as avg_rssi,  
       place as lugar,  
       measuring_device as dispositivo  
FROM BEACON  
GROUP BY bluetooth_address, real_distance,  
         scan_id, place, measuring_device  
ORDER BY real_distance, scan_id ASC;
```

Se tomaron 50 medidas de cada beacon, a diferentes distancias, en diferentes lugares y con diferentes dispositivos. En vez de mostrar todos los datos generados por la anterior consulta, vamos a analizar pequeños subconjuntos de estos.

Por ejemplo, veamos los resultados que se obtuvieron en el Edificio de Servicios Generales cuando la distancia al beacon era de 1m. Destacar que los beacons que se muestran son del mismo fabricante y tienen la misma potencia de emisión, por lo que este último parámetro no debería afectar a la intensidad de señal recibida.

Tabla 4.2.1: Medidas a 1m tomadas en el Edificio de Servicios Generales

fecha	bt_addr	d	avg_rssi	lugar	dispositivo
2017-02-21	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-79.38	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-21	E2:12:BB:38:E9:57	1	-79.18	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-23	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-85.32	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-23	E2:12:BB:38:E9:57	1	-83.62	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-28	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-85.9	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-28	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-84.72	ESG	OCU Smartphone
2017-03-07	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-89.58	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-03-07	E7:84:D0:9A:3F:60	1	-88.66	ESG	MotoE2(4G-LTE)

El principal problema que podemos ver es que las medidas son muy dispares entre diferentes días (e.g., entre el 21 y el 23 de Febrero). Puede ser que existiera algún tipo de error al haber tomado las medias, pero sería mucha casualidad que para un mismo día, dos beacons distintos (*bt_addr*) den los mismos resultados. Además, también parece que el dispositivo con el que se realizan las mediciones no afecta, es decir, que la intensidad de señal recibida por distintos dispositivos parece ser la misma.

Algo similar puede observarse en las medidas realizadas a 2m del beacon:

Tabla 4.2.2: Medidas a 2m tomadas en el Edificio de Servicios Generales

fecha	bt_addr	d	avg_rssi	lugar	dispositivo
2017-02-21	C2:A7:86:9B:A1:A1	2	-86.46	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-21	E2:12:BB:38:E9:57	2	-86.18	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-28	C2:A7:86:9B:A1:A1	2	-89.8	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-28	C2:A7:86:9B:A1:A1	2	-90.54	ESG	OCU Smartphone

De nuevo, las medidas del 21 de Febrero difieren con las tomadas el 28 de Febrero, a pesar de haber sido tomadas bajo las mismas condiciones. Al igual que en el caso anterior, el dispositivo de medición no parece afectar a la intensidad de señal recibida.

Con estos datos hemos podido comprobar lo que ocurre cuando se toman las medidas en distintos días. Veamos ahora que podemos obtener de las medidas tomadas a una misma distancia, pero en diferentes sitios. De esta manera podemos ver como el entorno afecta al valor de la RSSI.

A continuación, mostramos las medidas tomadas a 1m del beacon en dos lugares diferentes.

Tabla 4.2.3: Medidas a 1m tomadas en varios lugares

fecha	bt_addr	d	avg_rssi	lugar	dispositivo
2017-02-21	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-79.38	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-21	E2:12:BB:38:E9:57	1	-79.18	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-23	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-85.32	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-23	E2:12:BB:38:E9:57	1	-83.62	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-23	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-76.44	LAB	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-23	E2:12:BB:38:E9:57	1	-69.98	LAB	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-28	E2:12:BB:38:E9:57	1	-70.54	LAB	OCU Smartphone
2017-02-28	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-85.9	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-28	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-84.72	ESG	OCU Smartphone
2017-03-07	E7:84:D0:9A:3F:60	1	-67.72	LAB	MotoE2(4G-LTE)
2017-03-07	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-66.18	LAB	MotoE2(4G-LTE)
2017-03-07	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-89.58	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-03-07	E7:84:D0:9A:3F:60	1	-88.66	ESG	MotoE2(4G-LTE)
2017-03-08	E7:84:D0:9A:3F:60	1	-67.32	LAB	MotoE2(4G-LTE)
2017-03-08	E7:84:D0:9A:3F:60	1	-67.36	LAB	MotoE2(4G-LTE)

Si nos fijamos en las medidas tomadas el 23 de Febrero, podemos ver que las medidas tomadas en Laboratorio de Investigación (LAB) difieren mucho de las tomadas en el Edificio de Servicios Generales (ESG). Lo mismo ocurre con las medidas tomadas el 28 de Febrero y el 7 de Marzo (en este último día la diferencia entre los valores de RSSI es abismal).

No hemos mostrado anteriormente las medidas tomadas en la cámara reverberante y la cámara de emisión por las características especiales de estos lugares. No obstante, si ya de los anteriores datos podemos concluir que el entorno (lugar) afecta a la intensidad de señal recibida; los siguientes datos no hacen sino confirmarnos este hecho.

Tabla 4.2.4: Medidas a 1m tomadas en cámara de emisión y cámara reverberante

fecha	bt_addr	d	avg_rssi	lugar	dispositivo
2017-02-23	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-84.32	EMI	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-23	E2:12:BB:38:E9:57	1	-86.16	EMI de emisión	MotoE2(4G-LTE)
2017-02-23	C2:A7:86:9B:A1:A1	1	-94.64	REV	MotoE2(4G-LTE)

Las mediciones en la cámara reverberante parecen indicar que cuanto mayor es la reflexión de la señal en las paredes del edificio, menor es la intensidad de señal recibida. Las medidas tomadas en la cámara de emisión son muy similares al resto, por lo que no podemos extraer conclusiones.

En definitiva, no podemos calcular un valor para la constante de propagación (ver [ecuación 4.4](#)), porque los valores para el RSSI cambian mucho, ya no de un lugar a otro, sino de un día a otro.

Desafortunadamente, no hemos podido averiguar cual es la causa de que las mediciones en un mismo lugar cambien tanto de un día a otro. Es lógico que la intensidad de señal cambie de un lugar a otro, ya que distintos edificios reflejan la señal de manera diferente. Tras observar estos datos se planteó la idea de que fuera la temperatura o el grado de humedad los que afectaban a estas mediciones, sin embargo, tras recaudar esta información gracias a la página de AEMET, no pudimos confirmar este hecho.

Por tanto, para la [ecuación 4.1](#) usaremos un valor para la constante de propagación de 2, que es el que usan muchos autores, ya que este es el valor para la constante de propagación en el vacío. Por tanto, para estimar la distancia de un beacon al dispositivo móvil usaremos la siguiente ecuación:

$$d = 10^{\left(\frac{A-RSSI}{20}\right)} \quad (4.4)$$

Capítulo 5

Desarrollo con sistemas no propietarios: técnicas de posicionamiento

5.1. COMPARACIÓN ENTRE MULTILATERACIÓN Y FINGER- PRINTING

En esta sección se explican con detalle las técnicas de multilateración y fingerprinting. En primer lugar explicaremos como se obtiene la posición de un usuario en un espacio de dos dimensiones cuando se conocen las distancias a tres puntos de referencia, de los que conocemos también sus coordenadas. El problema que surge en los IPS es que las distancias a estos puntos de referencia son estimaciones con un determinado error; esto provoca, como veremos, que la posición final del usuario no sea única, sino que se trate de una superficie de la cual podemos dar un punto como mejor aproximación.

Por otro lado, también proponemos un modelo de fingerprinting que no hace uso de las intensidades de señal, sino de las estimaciones de distancia, comparando la precisión de este modelo con la trilateración.

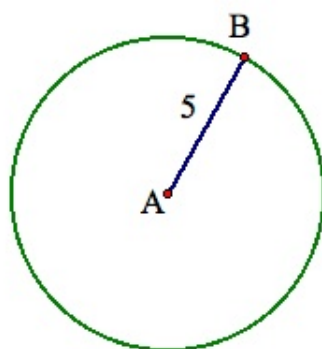
El objetivo de esta sección es descubrir si existe alguna ventaja en usar una técnica u otra. Para ello hemos realizado varios experimento para comprobar la precisión de ambas bajo las mismas condiciones.

Tanto para explicar los detalles de ambos modelos, como para realizar la comparación entre ambos, hacemos uso del software *Wolfram Mathematica*¹. Este software nos permitirá representar ambos modelos de forma gráfica y extraer conclusiones.

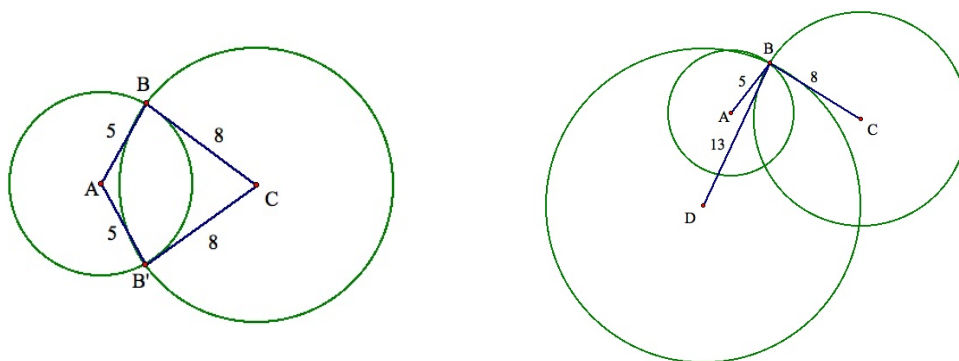
¹<https://www.wolfram.com/mathematica/>

5.1.1. MULTILATERACIÓN

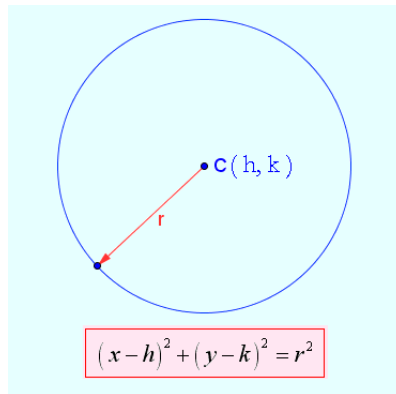
La trilateración es el proceso por el que se obtiene la posición de un punto conociendo tres distancias fijas a tres puntos conocidos. Dado que estamos tratando con distancias fijas, las circunferencias van a jugar un papel importante para determinar la posición del punto. Por ejemplo, si este punto está a una distancia de 5m del punto A, es seguro que el punto que queremos encontrar es uno de los puntos de la circunferencia de radio 5, centrada en A.



El grado de incertidumbre se reduce si añadimos una segunda distancia, al obtener dos puntos de corte (o uno si son tangentes); y aún más si añadimos un tercer punto, obteniendo un único punto donde se cortan las tres circunferencias.



De esta manera, en el mejor de los casos, cuando se conocen tres distancias (suponiendo que no existe error alguno), podemos determinar la posición del punto de manera unívoca. Para ello, tenemos que resolver el sistema de tres ecuaciones que forman las ecuaciones de las tres circunferencias. Recordemos que la ecuación de una circunferencia con centro en el punto $C(h, k)$ es $(x - h)^2 + (y - k)^2 = r^2$ (el punto $P(x, y)$ pertenecerá a la circunferencia).



A continuación, mostramos como se resuelve este sistema de tres ecuaciones. Con el objetivo de facilitar los cálculos, de los tres puntos de referencia (el centro de las circunferencias), uno lo hemos movido al origen de coordenadas $(0, 0)$ y otro a un punto del eje x $(a, 0)$. El tercer punto es el punto (b, c) .

$$\begin{aligned} r_1^2 &= x^2 + y^2 \\ r_2^2 &= (x - a)^2 + y^2 \\ r_3^2 &= (x - b)^2 + (y - c)^2 \end{aligned}$$

Recordemos que el punto $P(x, y)$, el punto común a las tres circunferencias, es el punto que estamos intentando encontrar.

Ahora, restamos la segunda a la primera ecuación.

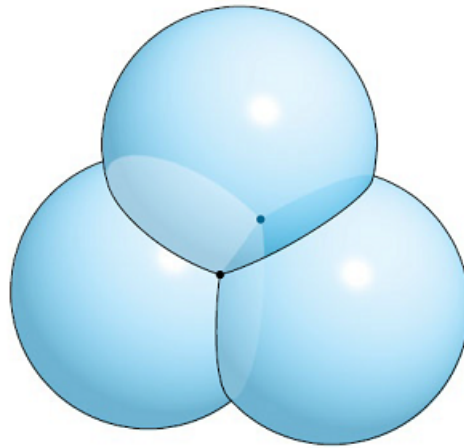
$$\begin{aligned} r_1^2 - r_2^2 &= x^2 + y^2 - x^2 - a^2 + 2xa - y^2 \\ \Rightarrow x &= \frac{r_1^2 - r_2^2 + a^2}{2a} \end{aligned}$$

Finalmente, utilizando este valor de x en la primera ecuación, obtenemos que signo de y es válido.

$$y = \pm \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{r_1^2 - r_2^2 + a^2}{2a}\right)^2}$$

La tercera ecuación sirve para determinar el signo de y .

Por otro lado, mientras que para un sistema de dos dimensiones se necesitan tres circunferencias, en un sistema de tres dimensiones son necesarias cuatro esferas para determinar de manera unívoca el punto.



Como podemos ver en la figura anterior, tres esferas tienen dos puntos en común, con lo que una cuarta es necesaria para resolver la ambigüedad. No explicaremos el proceso para resolver el sistema de ecuaciones generado, ya que se basa simplemente en extender el modelo presentado anteriormente. No obstante, si se desea ver estas ecuaciones, puede visitarse la referencia [13].

El problema lo encontramos cuando hay errores en las medidas a los puntos de referencia. Por ejemplo, en el caso de un espacio de dos dimensiones con tres puntos de referencia, las circunferencias resultantes pueden, o bien no cortarse en ningún punto, o bien, en el caso de cortarse, que no exista ningún punto común a las tres (se cortan dos a dos).

Para comprobar lo que ocurre cuando se dan este tipo de errores, usamos *Wolfram Mathematica*. Los datos los hemos almacenado en una hoja de cálculo con el siguiente formato:

Tabla 5.1.1: Tres circunferencias con un punto en común a las tres.
El punto (X,Y) es el centro de la circunferencia de radio *Distance*

trilateration2DExact1		
X	Y	Distance
0	0	1
2	0	1
1	1	1

Tratar con hojas de cálculo en Mathematica es muy sencillo. El siguiente código muestra como quedan representado los datos en este software tras extraerlos.

```
In[1]:= sheet = 1;
        from = 3;
        to = 5;
```

```
In[2]:= data = s[[sheet, from;;to, 1;;3]]
```

```
Out[2]= {{0, 0, 1}, {2, 0, 1}, {1, 1, 1}}
```

Como podemos ver, se obtiene una lista de n listas. En este caso obtenemos tres listas; cada lista representan los datos de una fila de la tabla.

La ventaja de usar Mathematica es que nos permite realizar una regresión no lineal² para obtener el punto (x_0, y_0) que mejor se ajuste a los ecuaciones. Por ejemplo, si las circunferencias no se cortan en absoluto, podemos obtener el punto con el que el error es mínimo.

```
In[3]:= fit = NonlinearModelFit[data, Norm[{x, y} - {x0, y0}], {x0, y0}, {x, y}]
```

```
Out[3]= FittedModel[ $\sqrt{\text{Abs}[-1.+x]^2 + \text{Abs}[4.41532 \cdot 10^{-13} + y]^2}$ ]
```

Es decir, el punto que mejor se ajusta es el punto $(1, 0)$. En este tipo de modelos se pueden obtener intervalos de confianza en función de un parámetro denominado *Nivel de Confianza*³. Cuanto más cercano a uno es este parámetro, más amplios son los intervalos de confianza⁴. Por ejemplo, con un nivel de confianza del 95%, para el modelo construido a partir de los puntos de la tabla [tabla A.0.8](#), obtenemos los siguientes resultados:

	Estimate	Standard Error	Confidence Interval
x_0	1.	$3,1220 \times 10^{-13}$	{1., 1.}
y_0	$-4,4153 \times 10^{-13}$	$4,4152 \times 10^{-13}$	{ $6,0516 \times 10^{-12}$, $5,1685 \times 10^{-12}$ }

²<https://reference.wolfram.com/language/ref/NonlinearModelFit.html>

³<https://reference.wolfram.com/language/ref/ConfidenceLevel.html>

⁴Al tratarse de modelos estadísticos, el intervalo de confianza marca, con un cierto nivel de seguridad, el intervalo donde se encontrarán las soluciones. Se puede aprender más de este tipo de modelos en [Wolfram Mathematica - Get Results for Fitted Models](#)

Podemos concluir que el error de la estimación dada es ínfimo (esto es porque estas tres circunferencias se cortan en un único punto). También lo podemos ver en los intervalos de confianza, los cuáles no son nada amplios.

Finalmente, podemos dibujar los resultados en una gráfica.

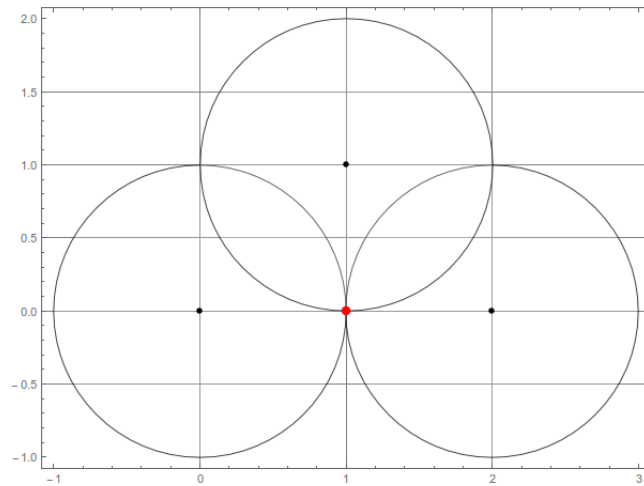


Figura 5.1.2

Mostramos también los gráficos generados para otros dos casos en los que las circunferencias se cortan en un punto. Tanto los datos de las circunferencias dibujadas, como el ajuste generado por Mathematica pueden verse en la [apéndice A](#).

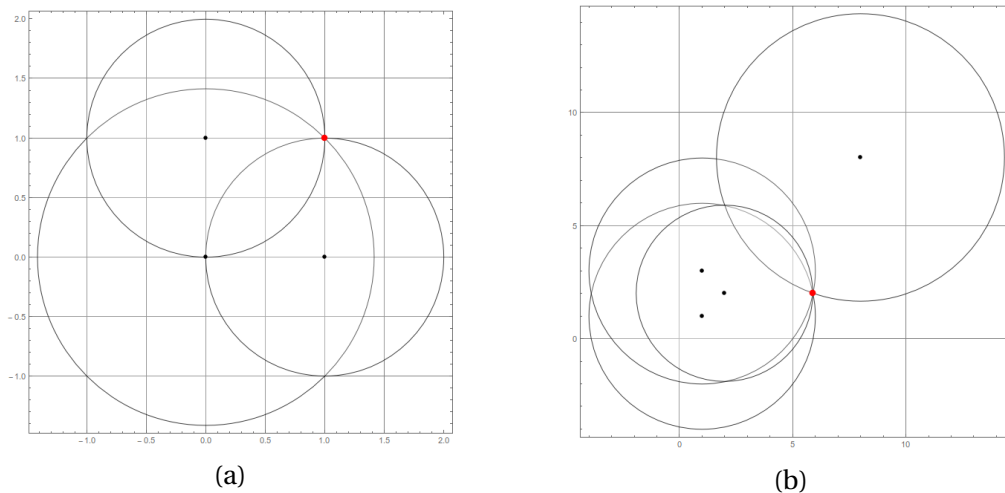


Figura 5.1.3

No obstante, lo que es interesante analizar es que obtenemos cuando las tres circunferencias no tienen ningún punto en común, es decir, cuando el sistema de ecuaciones no tiene solución. Por ejemplo, para el caso de las tres circunferencias siguientes:

Tabla 5.1.2: Tres circunferencias sin ningún punto en común a las tres

trilateration2DInexact1		
X	Y	Distance
1	1	0.9
3	1	1
2	2	1

Si representamos estas tres circunferencias en el plano, obtenemos el siguiente diagrama:

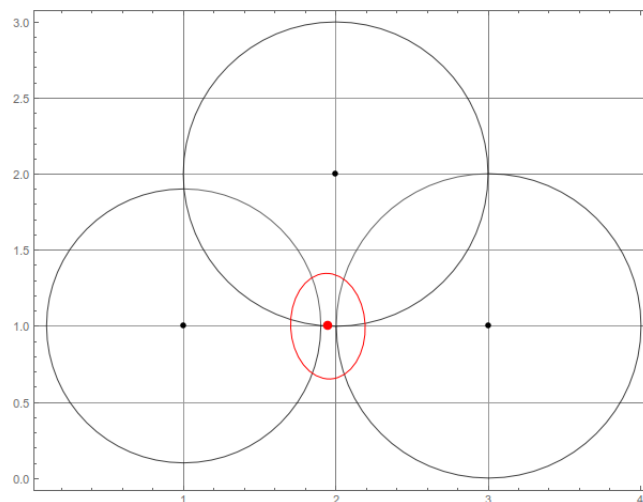


Figura 5.1.4

La elipse que vemos dibujada en rojo es una región de confianza⁵ asociada al parámetro *Nivel de Confianza*. En el caso de la figura 5.1.4, el valor que hemos escogido ha sido 0.8.

```
In[4]:= fit["ParameterConfidenceRegion", ConfidenceLevel -> 0.80];
```

⁵<https://reference.wolfram.com/language/RegressionCommon/ref/ParameterConfidenceRegion.html>

Si observamos la tabla de los intervalos de confianza podemos extraer varias conclusiones.

	Estimate	Standard Error	Confidence Interval
x_0	1,95	0,05	{1,3147, 2,5853}
y_0	1,0011	0,07	{0,1010, 1,9013}

En primer lugar, podemos ver que el error que se produce con la estimación (el punto (1,95, 1,0011)) es mayor que en casos anteriores. Lo mismo ocurre con los intervalos de confianza. Sin embargo, cabe destacar que, aunque no exista solución para el sistema de ecuaciones, la estimación dada es bastante buena (imaginemos este resultado desde el punto de vista de un sistema de posicionamiento en interiores).

A continuación, mostramos otro caso en el que las circunferencias no se cortan:

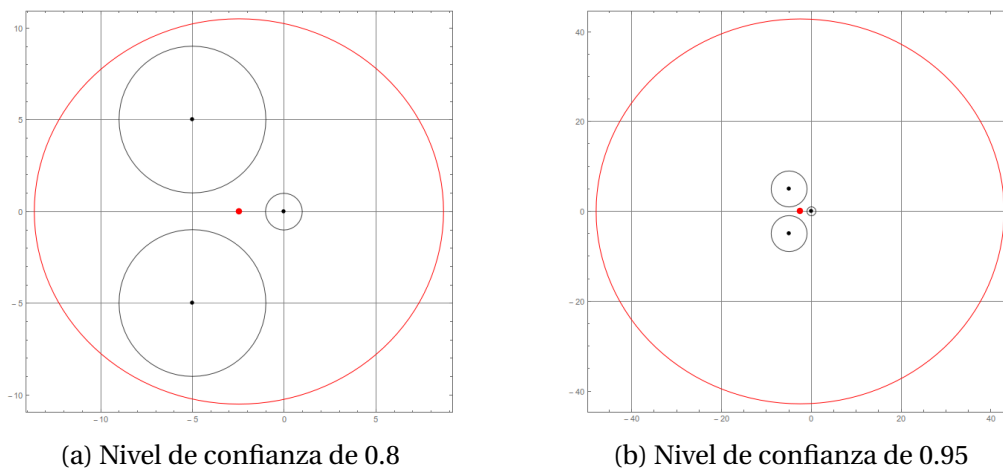


Figura 5.1.5

En ambas figuras se representan las mismas circunferencias, solo que en la figura de la derecha, el valor para el parámetro *Nivel de Confianza* ha sido más alto y, por lo tanto, la elipse que se genera abarca un área muchos más grande.

Por otro lado, si observamos las tablas de intervalos de confianza de este ejemplo (ver [tabla A.0.4](#)), podemos observar que el error que se produce al dar la mejor estimación (el punto rojo en la gráfica) es mucho mayor.

Por últimos, extendemos este modelo a un sistema de tres dimensiones. Las modificaciones a realizar en Mathematica son mínimas, simplemente trabajamos con esferas en vez de con circunferencias.

Tabla 5.1.3: Cuatro esferas con un punto en común a todas.
 El punto (X,Y,Z) es el centro de la esfera de radio *Distance*

trilateration3DExact			
X	Y	Z	Distance
1	1	1	1
3	1	1	1
2	2	1	1
2	-1	1	2

La representación gráfica de estas esferas es la siguiente:

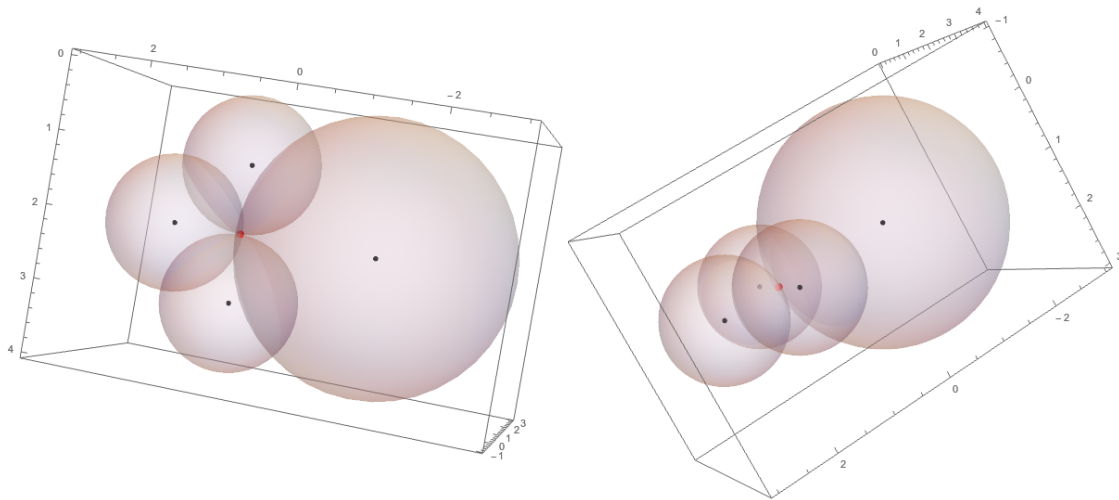


Figura 5.1.6

En la **figura 5.1.6** las tres esferas se cortan en un único punto. En el caso de que las cuatro esferas no se corten (i.e., el sistema de ecuaciones no tenga solución), podemos representar un elipsoide que marcará, al igual que en los ejemplos de dos dimensiones, una zona de confianza (**figura 5.1.7**).

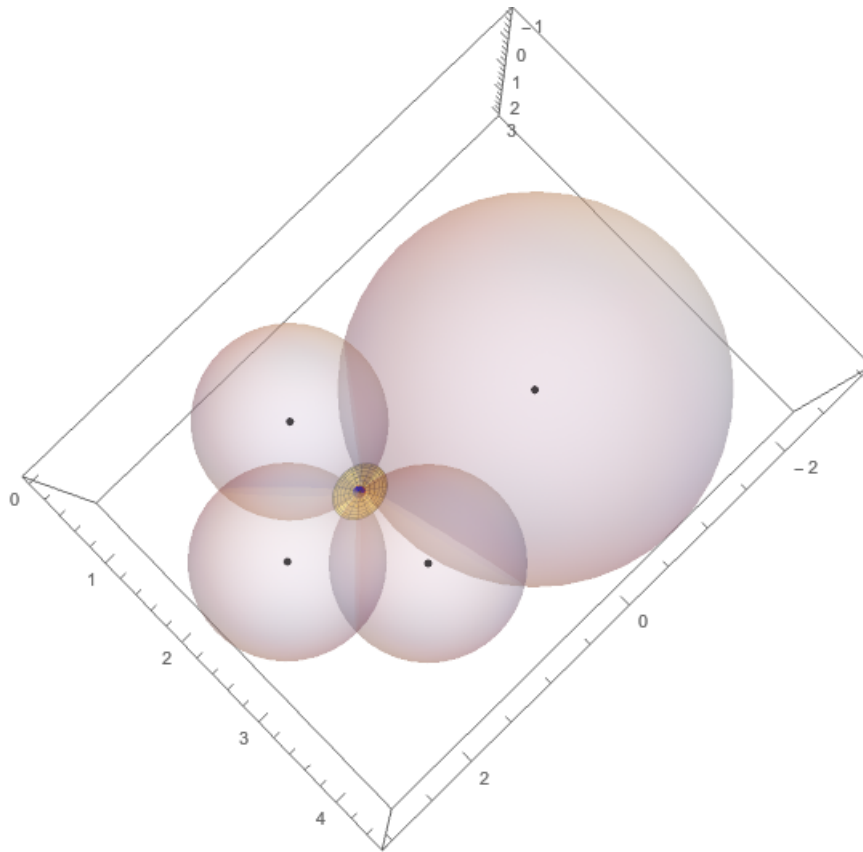


Figura 5.1.7

5.1.2. FINGERPRINTING

Recordamos que el fingerprinting se realiza en dos fases: una primera fase *offline* de entrenamiento, seguida de una fase *online* de consulta. En la fase *offline* recogemos vectores de intensidad de señal (RSSI) de todos los puntos de acceso detectados (si estamos utilizando Wi-Fi o balizas Bluetooth) en varios puntos de referencia. Todos estos vectores se almacenan en una base de datos. Más tarde, durante la fase *online*, el usuario recoge las medidas de los puntos de acceso en la posición en la que está y, usando algoritmos de proximidad, se busca el vector más similar en la base de datos. De esta manera se puede localizar al usuario.

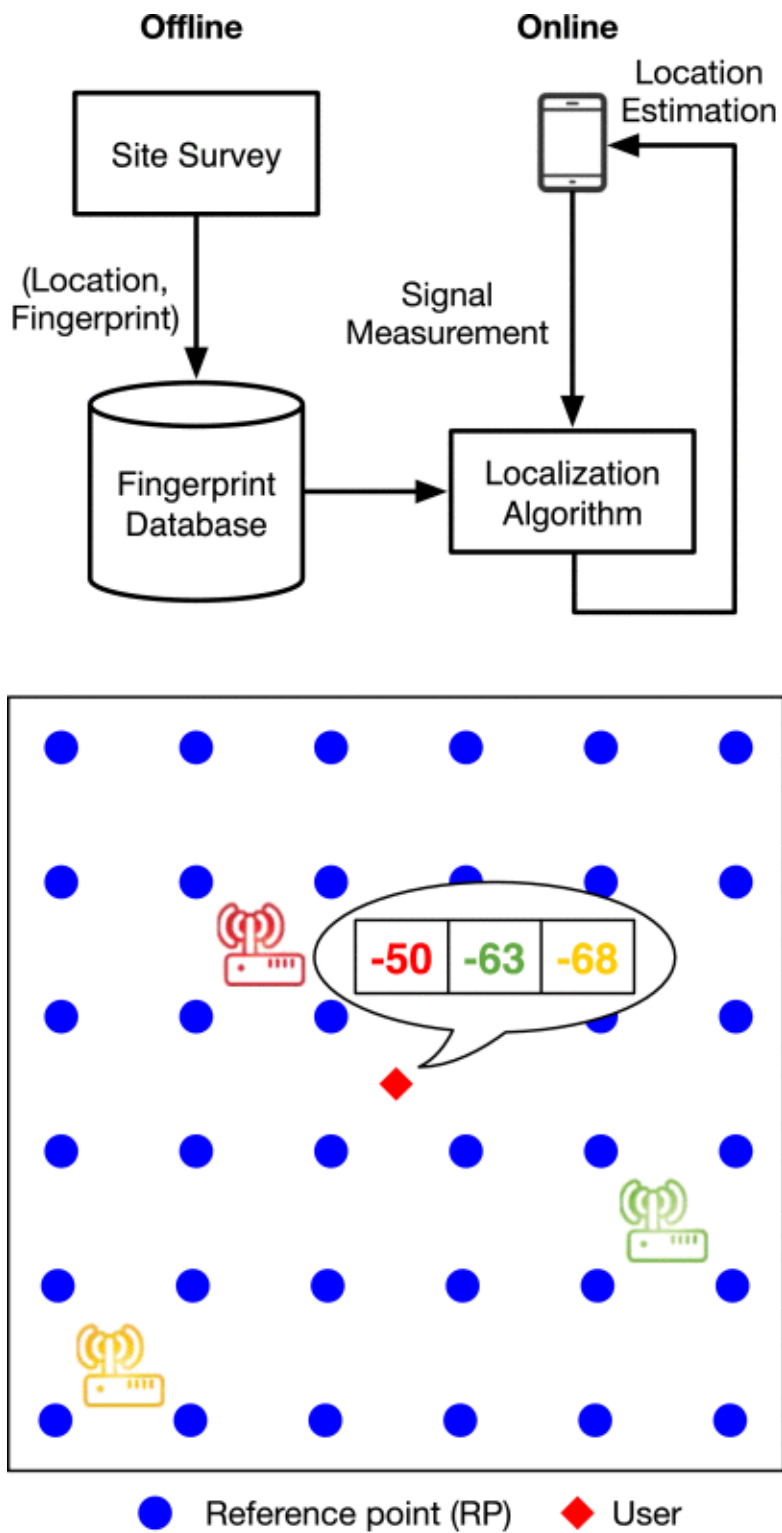


Figura 5.1.8: Flujo de un sistema basado en fingerprinting

Fuente: Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons[14]

El proceso que vemos en la [figura 5.1.8](#) tendríamos que realizarlo en todos aquellos edificios en los que queramos incorporar nuestro sistema. Por ejemplo, en el caso de que queramos posicionar a un usuario en el Pabellón de Informática de la EPCC, tendríamos que escoger puntos de referencia y llevar a cabo las dos fases.

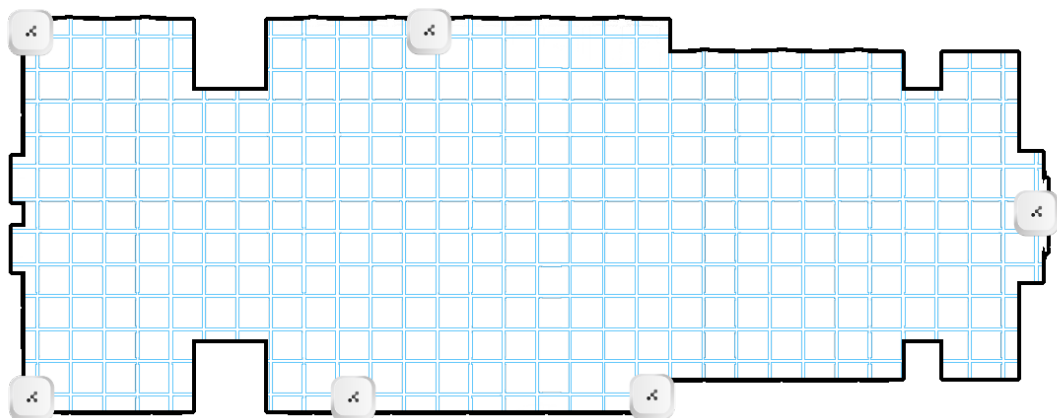


Figura 5.1.9: Pabellón de informática dividido en puntos de referencia

El problema del fingerprinting, como ya hemos comentado anteriormente, es que la etapa de entrenamiento es laboriosa. Nuestra propuesta intenta eliminar el paso de la etapa de entrenamiento.

Para ello, en vez de calcular un vector con las intensidades de señal para cada punto de referencia en la fase offline, lo que hacemos es calcular directamente un vector con las distancias reales a los puntos de acceso y almacenamos esta información en una base de datos. Es decir, en el caso de la [figura 5.1.9](#), para cada punto del *grid*, calculamos la distancia real a cada uno de las balizas, algo que se puede lograr fácilmente si disponemos del plano del edificio. En la fase online, tendríamos que estimar la distancia a las balizas como fuere (se vió anteriormente en la [subsección 4.2.1](#)) y comparamos este vector de estimaciones con aquellos de la base de datos para obtener la posición del usuario.

Creemos que el error cometido con esta aproximación no debe ser muy grande ya que en los sistemas de fingerprinting tradicionales, al final se usa el valor del RSSI para estimar la distancia, con lo que lo único que estaríamos haciendo es un cálculo más al tener que estimar la distancia del usuario a los puntos de acceso durante la fase online del fingerprinting antes de realizar la comparación con la base de datos.

En nuestro caso, hemos realizado una prueba de concepto usando Mathematica. Hemos considerado un edificio de 20m x 20m, hemos hecho los cálculos correspondientes a la fase offline y posteriormente, tras introducir unas posibles estimaciones de

distancia con errores (inventadas) correspondientes a la fase online, hemos comprobado el funcionamiento de esta aproximación. En la siguiente imagen podemos ver este supuesto edificio de $20m^2$ en el que hemos considerado puntos de referencia separados 2m entre sí.

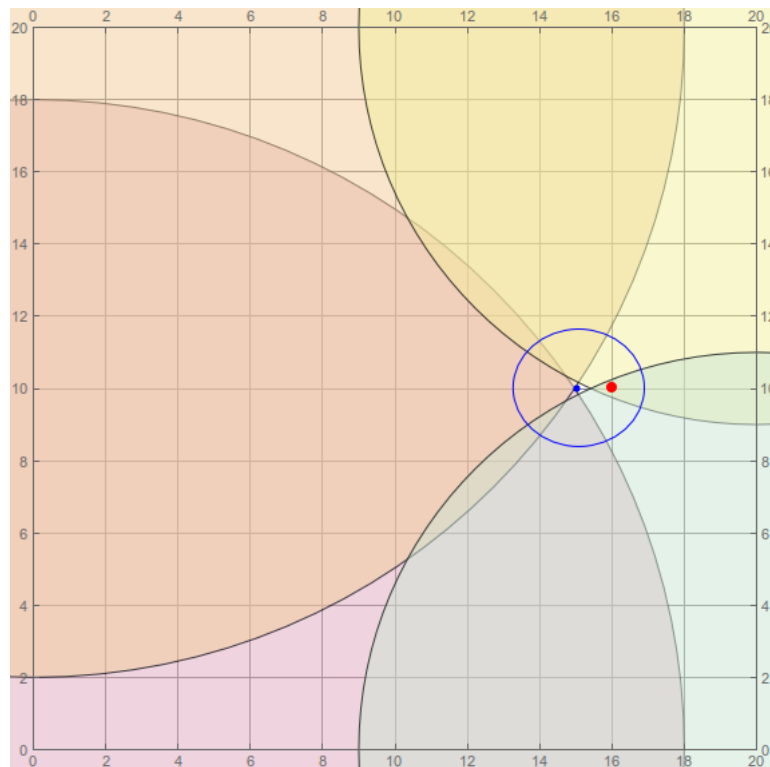
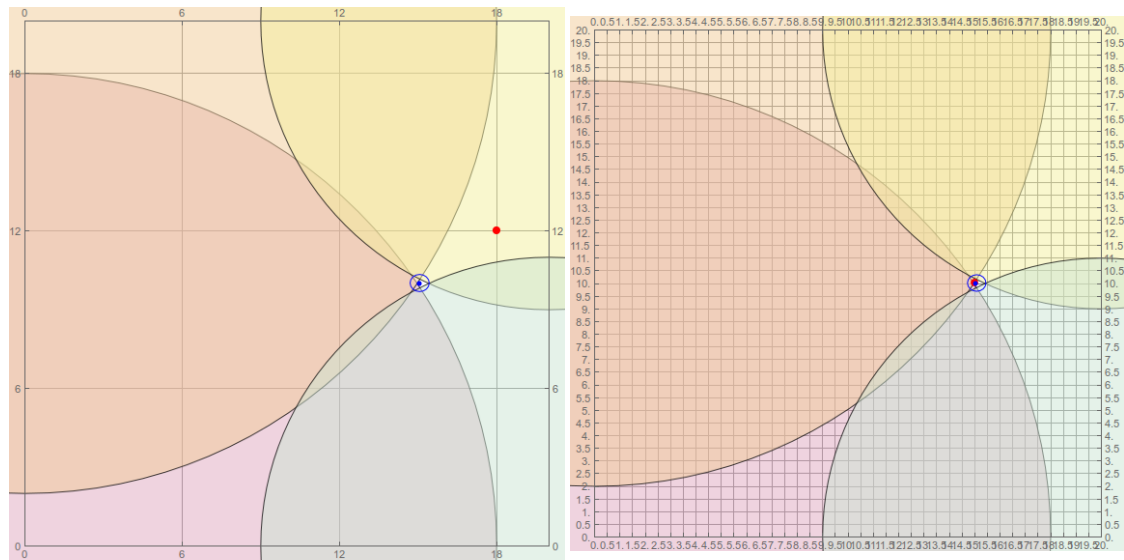


Figura 5.1.10

Las circunferencias muestran las distancias estimadas los puntos de acceso (consideramos siempre que están en las esquinas de este supuesto edificio). En azul, podemos ver la solución que se obtiene mediante la técnica de trilateración (junto con la zona de confianza), mientras que en rojo se marca la solución mediante la técnica de fingerprinting anteriormente explicada. Como podemos ver ambas soluciones están muy próximas entre sí.

Un factor importante a la hora de obtener la solución mediante fingerprinting es el número de puntos de referencias (PR) tomados en la fase offline. Dado que al final estimamos la posición del usuario a uno de estos puntos de referencia, si tenemos pocos (están muy separados entre sí) el error será muy grande. Por ejemplo, a continuación mostramos dos imágenes similares a la de la [figura 5.1.10](#), con tamaños de grid diferentes.



(a) Separación de 6m entre PR

(b) Separación de 0.5m entre PR

Figura 5.1.11

La **figura 5.1.11a** tiene muchos menos puntos de referencia que la **figura 5.1.11b**, por lo que en la primera figura, al tener que aproximar la solución a uno de estos puntos de referencia (punto rojo), se aleja mucho de la solución obtenida mediante trilateración (azul). Sin embargo, en la segunda figura podemos ver que la solución de ambas aproximaciones son muy similares.

Comprobemos ahora que ocurre cuando introducimos más error en las estimaciones de distancia.

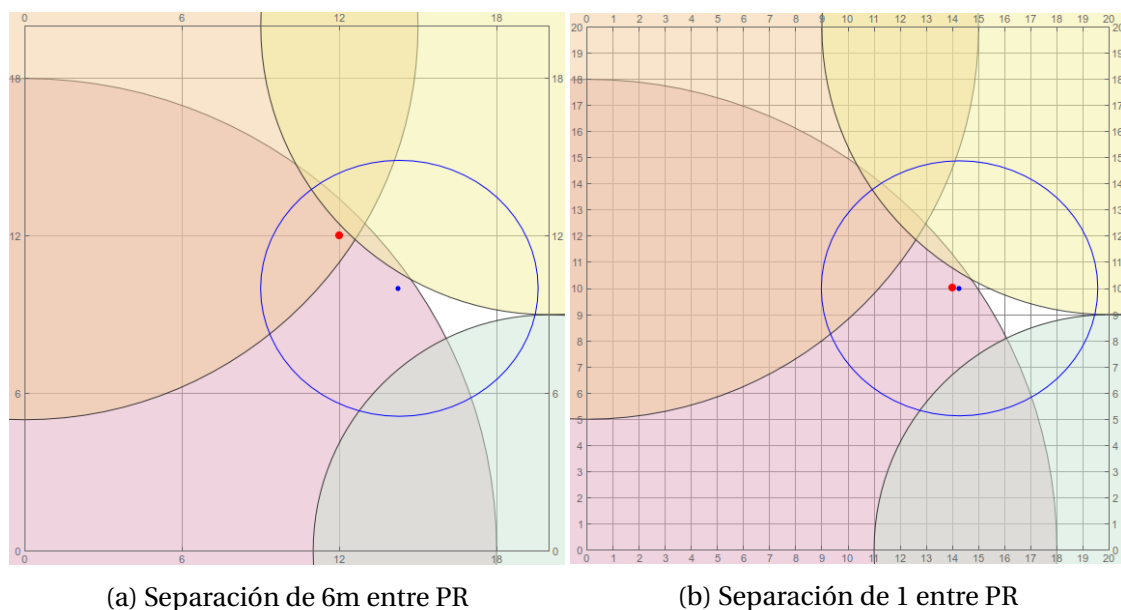


Figura 5.1.12

Vemos que, de nuevo, en función del número de puntos de referencias tomados, la solución dada por el fingerprinting es similar o no a la de trilateración. No obstante si algo podemos concluir de estas gráficas es que la trilateración ofrece grandes resultados incluso cuando el error es grande. El fingerprinting tampoco ofrece muchas más ventajas en este caso.

5.2. CONCLUSIONES

Como hemos podido ver en esta última sección, el fingerprinting no ofrece, en base a las pruebas realizadas, ninguna ventaja aparente frente a la trilateración. Es más, aunque con la idea de utilizar distancias en vez de RSSI, la fase de entrenamiento se vuelva mucho menos laboriosa; sigue siendo mucho más directo realizar la trilateración una vez se tienen las estimaciones de distancia.

Por otro lado, el algoritmo que hay que aplicar en la fase online del fingerprinting es mucho más complejo que el de la trilateración, y requiere de más elementos software (e.g., una base de datos).

En definitiva, por su facilidad de uso hemos decidido usar la técnica de trilateración en nuestro sistema de posicionamiento en interiores. Creemos que una vez reduzcamos el error en las estimaciones de distancia a las balizas Bluetooth, como se verá en el siguiente capítulo, el sistema debería situar al usuario con suficiente precisión.

Capítulo 6

Desarrollo con sistemas no propietarios: mejora de la precisión

En este capítulo describimos los pasos que se han llevado a cabo para reducir el error en la estimación de la distancia. El error que se comete está formado en su mayor parte por medidas ruidosas de RSSI, sobre todo a medida que nos alejamos de la fuente. Para comprobar este hecho, realizamos un análisis de como afecta la distancia entre el dispositivo de medición y el beacon a la intensidad de señal recibida.

Finalmente, proponemos un modelo de filtro para reducir el impacto de estas medidas ruidosas mediante el uso del Filtro de Kalman, y realizamos un breve inciso en la implementación realizada para nuestro sistema.

6.1. ESTUDIO DEL RUIDO EN LAS MEDIDAS RSSI

Es fácil a partir de la [ecuación 4.1](#) obtener los valores teóricos de RSSI que se tendrían que obtener a ciertas distancias. Por ejemplo, sabiendo que nuestros beacon emiten a -77dBm (A) y dando a la constante de propagación de la señal (n) el valor 2, obtenemos los siguientes valores teóricos para distancias de 1 a 6 metros.

Tabla 6.1.1: Valores teóricos de RSSI para distancias de 1 a 6 metros

RSSI teórico (dBm)	Distancia al beacon (m)
-77	1
-83.02	2
-86.54	3
-89.04	4
-90.98	5
-92.56	6

Podemos usar los datos que hemos recolectado durante la [subsección 4.2.2](#) para comparar los resultados teóricos con los prácticos. Para visualizar la mayor cantidad de información posible hemos representado los datos obtenidos en un diagrama de cajas. Por ejemplo, en la siguiente imagen podemos ver representadas 50 medidas tomadas a 2m del beacon.

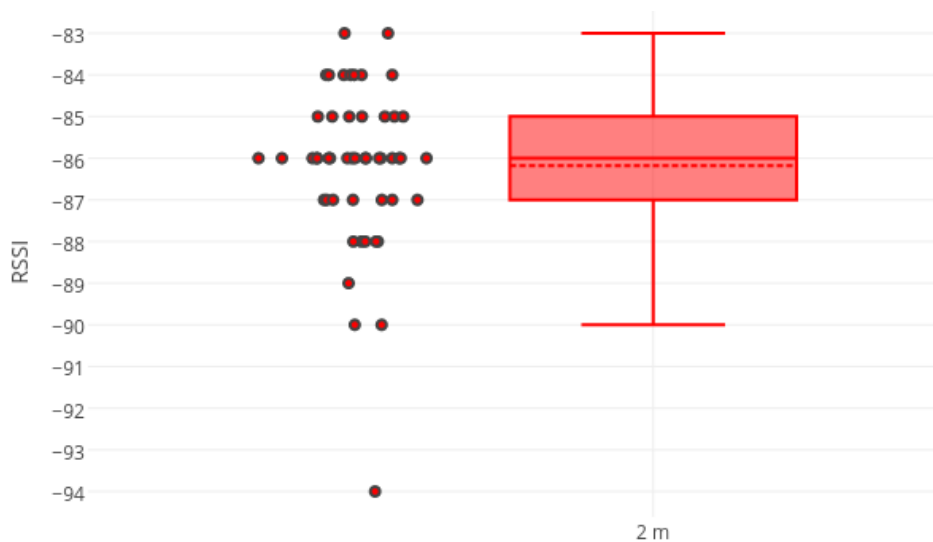


Figura 6.1.1: Gráfico de caja: 50 medidas tomadas a 2m del beacon

Como podemos ver, la dispersión de los datos no es muy elevada, la mayoría se concentran en el intervalo [-87,-85], y no hay apenas valores atípicos; en este caso, solo . No obstante, la media de estos valores, representada mediante una línea de puntos, está alejada del valor teórico que debería dar.

Veamos que ocurre si nos alejamos aún más del beacon.

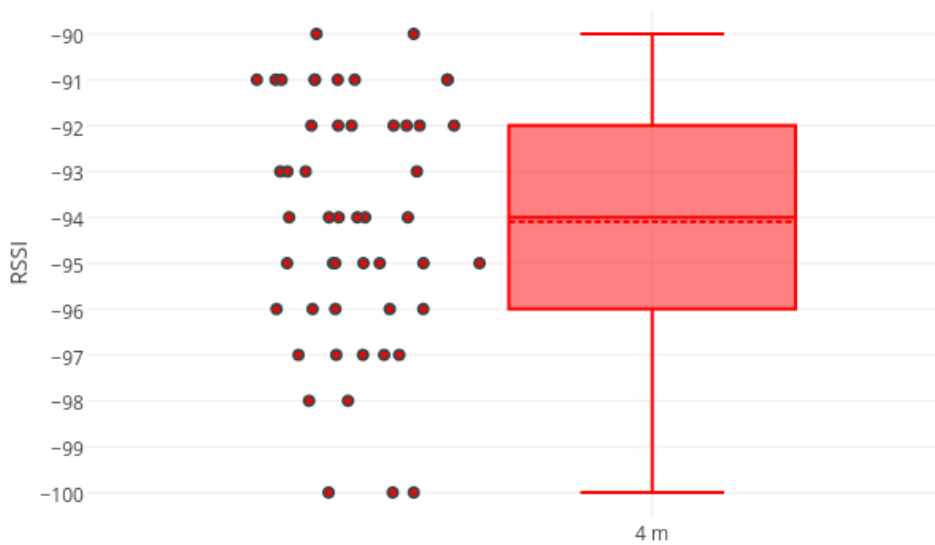


Figura 6.1.2: Gráfico de caja: 50 medidas tomadas a 4m del beacon

En este caso, la dispersión es mucho mayor que en el caso anterior y el valor obtenido para la RSSI es muy diferente al valor teórico que se debería obtener. Ocurre exactamente si nos alejamos hasta los 6 metros, como puede verse en la siguiente imagen:

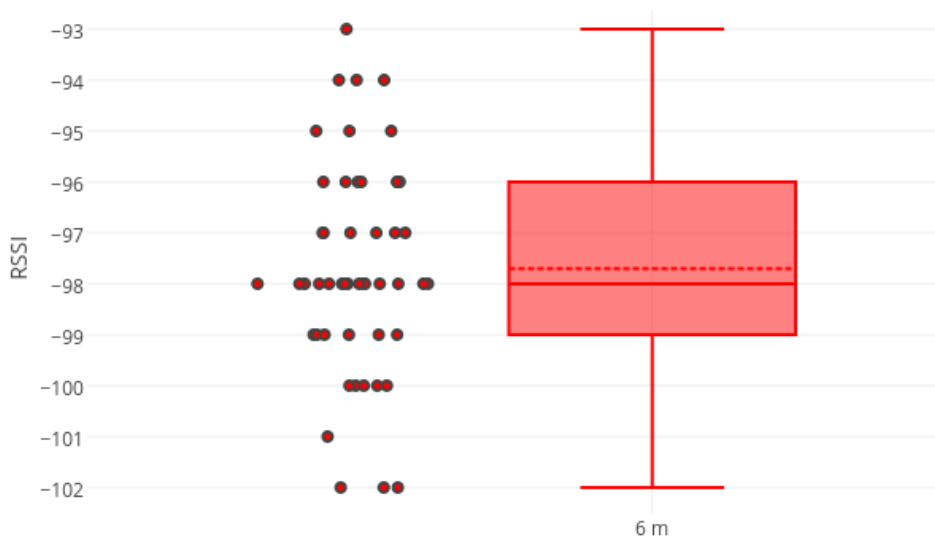


Figura 6.1.3: Gráfico de caja: 50 medidas tomadas a 6m del beacon

Se puede concluir que, a medida que nos alejamos del beacon, los valores que se obtienen para el RSSI se alejan cada vez más de los valores teóricos. Además, el número

de valores atípicos suele aumentar y la dispersión de los valores obtenidos suele ser mayor. Esto último es un problema que los sistemas de posicionamiento ya que un gran salto en el valor del RSSI puede suponer en un salto grande en la estimación de la distancia. En la siguiente imagen pueden verse varios diagramas de caja asociados a diferentes distancias.

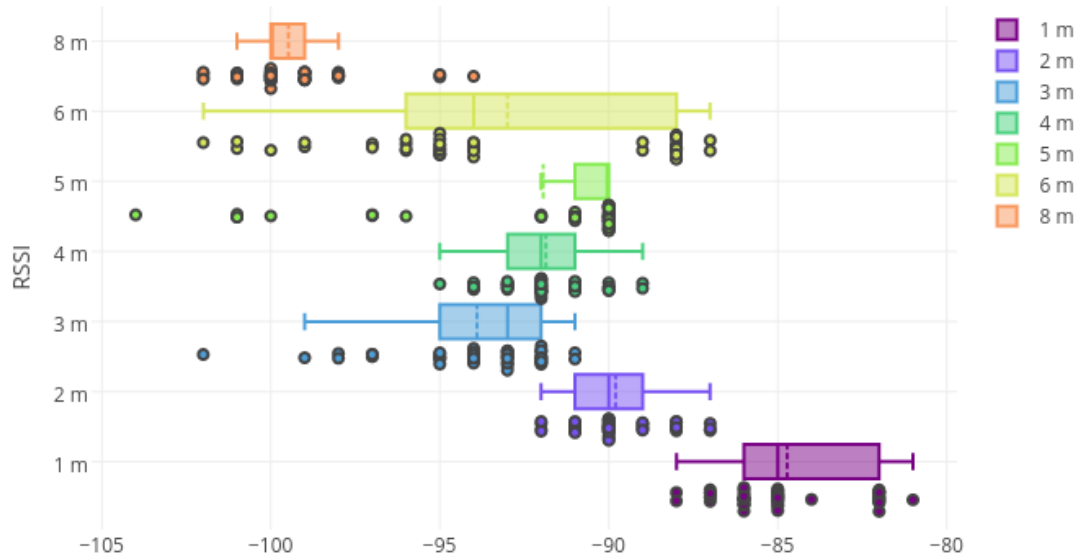


Figura 6.1.4: Gráfico de cajas: medidas tomadas de 1 a 8 metros

Podemos visualizar los mismos datos mediante otro tipo de diagrama para ver si podemos obtener otro tipo de información. Por ejemplo, en la siguiente imagen se muestra un gráfico de líneas para los datos obtenidos a 1, 4 y 8 metros de distancia del beacon.

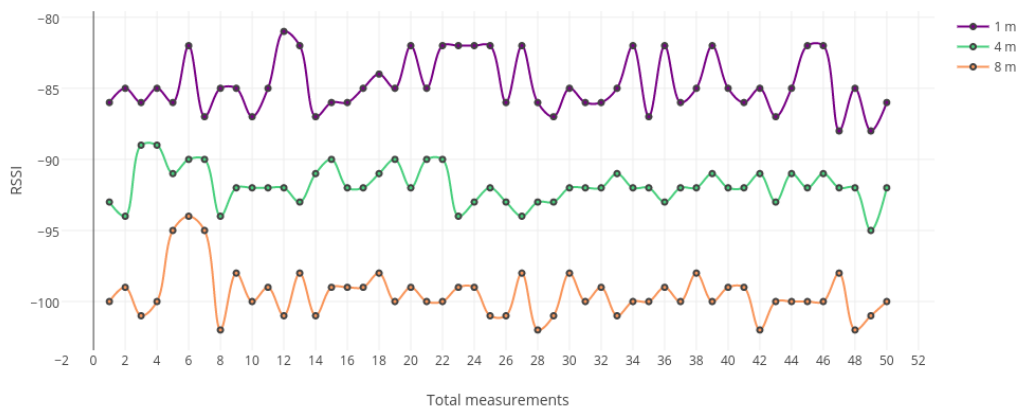


Figura 6.1.5: Gráfico de líneas: medidas tomadas a 1, 4 y 8 metros

Podemos ver que si utilizáramos un valor medio (por ejemplo mediante una ventana deslizante), podríamos eliminar gran parte del ruido. En nuestro caso, como alternativa a este método, vamos a utilizar el Filtro de Kalman para eliminar el ruido de señales RSSI, como se verá en la siguiente sección.

6.2. EL FILTRO DE KALMAN

El filtro de Kalman tiene más de 50 años pero sigue siendo uno de los algoritmos de fusión de datos más comunes e importantes que se usan hoy en día. Llamado así en honor a Rudolf. E. Kálmán, el gran éxito del filtro de Kalman se debe a su pequeño coste computacional, elegancia recursiva, y a su estatus como el estimador óptimo para sistema lineales de una dimensión con función de error de Gauss. Los usos típicos del filtro de Kalman incluyen suavizar datos con ruido y proporcionar estimaciones de parámetros de interés[15].

Nuestro objetivo será la obtención de un estimador óptimo de un sistema dinámico, basado en observaciones de señales RSSI ruidosas.

6.2.1. MODELO DEL SISTEMA

El modelo del filtro de Kalman asume que el estado de un sistema en tiempo t evoluciona del estado anterior en tiempo $t-1$ de acuerdo a la ecuación[15], [16]

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{A}_t \mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{B}_t \mathbf{u}_t + \mathbf{w}_t \quad (6.1)$$

donde

- \mathbf{x}_t es el vector de estados que contiene los términos de interés para el sistema (e.g., posición, velocidad, rumbo) en tiempo t .
- \mathbf{u}_t es el vector que contiene cualquier entrada de control (e.g., ángulo de dirección, ajuste del acelerador, fuerza de frenado).
- \mathbf{A}_t es la matriz de transición de estados, que aplica el efecto que produce cada parámetro de estado del sistema en tiempo $t-1$ sobre el estado del sistema en tiempo t . Dicho de otro modo, relaciona el estado del sistema en tiempo $t-1$ con el estado del sistema en tiempo t (e.g., la posición y velocidad en tiempo $t-1$ afectan a la posición en tiempo t).

- \mathbf{B}_t es la matriz de entrada de control, que aplica el efecto que produce cada parámetro de entrada de control del vector \mathbf{u}_t sobre el vector de estados. Dicho de otro modo, relaciona la entrada de control con el estado del sistema (e.g., aplica el efecto que tiene la fuerza de frenado sobre la posición y velocidad del sistema).
- \mathbf{w}_t es el vector que contiene los términos de ruido en el proceso para cada parámetro en el vector de estados. Este ruido viene a representar la idea de que el estado del sistema cambia a través del tiempo, pero no conocemos los detalles exactos de cuándo y cómo ocurren estos cambios. Se puede leer una explicación más detallada en la [subsección 6.2.4](#).

En nuestro caso vamos a simplificar el problema asumiendo que, mientras estamos obteniendo las medidas de RSSI, no nos movemos. En otras palabras, esperamos recibir una señal de RSSI constante, todo lo demás es ruido. De esta forma, la [ecuación 6.1](#) se simplifica bastante ya que no hay entrada de control (no nos estamos moviendo) y la matriz de transición de estados es la matriz identidad (el estado actual debería ser igual que el anterior). Nuestro modelo queda representado por la ecuación

$$x_t = A_t x_{t-1} + B_t u_t + w_t = x_{t-1} + w_t \quad (6.2)$$

Obsérvese que, para nuestro modelo, x y w no son vectores. Esto se debe a que el único término de interés para nuestro sistema es el valor de la señal RSSI.

6.2.2. MODELO DE MEDIDA

También se pueden hacer mediciones del sistema de acuerdo al modelo

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (6.3)$$

donde

- \mathbf{z}_t es el vector de medidas.
- \mathbf{H}_t es la matriz de transformación que convierte los parámetros del vector de estados en medidas del dominio (e.g., si midiéramos únicamente la posición del sistema, esta matriz tendría que obviar la velocidad del mismo[17]).

- \mathbf{w}_t es el vector que contiene los términos de ruido en la medida para cada observación en el vector de medidas. Este ruido viene a representar la idea de que cada tipo de sensor tiene sus limitaciones fundamentales relacionadas con el medio físico asociado, por esta razón las señales se ven degradadas. Además, alguna cantidad de ruido eléctrico aleatorio es sumado a la señal a través del sensor y los circuitos eléctricos[18].

Dado que, en el caso que nos atañe, nuestro estado y medida son lo mismo (RSSI), el modelo de medida se reduce a

$$z_t = H_t x_t + v_t = x_t + v_t \quad (6.4)$$

6.2.3. ESTIMACIÓN DEL ESTADO

El verdadero estado del sistema \mathbf{x}_t no puede ser directamente observado, y el filtro de Kalman proporciona un algoritmo para determinar una estimación $\hat{\mathbf{x}}_t$ teniendo en cuenta tanto la observación actual como el estado estimado anterior[19]. Tal estimación viene representada por la ecuación

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_{t-1} + K_t(\mathbf{z}_t - \hat{\mathbf{x}}_{t-1}) \quad (6.5)$$

Es fácil entender lo que expresa la ganancia K_t si pensamos que ocurre para dos valores extremos. Por ejemplo, si $K_t = 0$ ¹ obtenemos

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_{t-1} + 0(\mathbf{z}_t - \hat{\mathbf{x}}_{t-1}) = \hat{\mathbf{x}}_{t-1}$$

En otras palabras, cuando la ganancia es cero, la observación no tiene ningún efecto, y obtenemos la ecuación original que relaciona el estado actual con el anterior. Por otro lado, si $K_t = 1$ ² obtenemos

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_{t-1} + 1(\mathbf{z}_t - \hat{\mathbf{x}}_{t-1}) = \hat{\mathbf{x}}_{t-1} + \mathbf{z}_t - \hat{\mathbf{x}}_{t-1} = \mathbf{z}_t$$

En otras palabras, cuando la ganancia es uno, el estado anterior no importa, y obtenemos la estimación del estado actual completamente de la observación actual.

¹En el caso general, K_t es una matriz de ganancias. Para este ejemplo suponemos una matriz de ceros.

² K_t es una matriz con unos en su diagonal.

6.2.4. RUIDO EN EL PROCESO Y RUIDO EN LA MEDIDA

En esta sección se explican con más detalle los conceptos de ruido en el proceso y ruido en la medida, usando para ello un ejemplo muy sencillo[20].

Supongamos que queremos modelar la temperatura dentro de un frigorífico. La temperatura es de 5°C y debería mantenerse en este valor. En este ejemplo:

- El estado del sistema es la temperatura.
- Obtenemos medidas de la temperatura cada hora mirando el termómetro. En este proceso de medición existen ciertas incertidumbres provocadas por la precisión del aparato de medida (el termómetro), la medición no es completamente fiel. Este error introducido por el aparato de medida lo denominamos **ruido en la medida**.
- En el momento t , miramos al termómetro, que marca 7°C . Si asumimos que los errores en la medida son muy pequeños, esto significa que la verdadera temperatura es muy cercana a 7°C .
- La cuestión es: ¿cuál será la temperatura 15 minutos después de esta última medición?

Si no sabemos cuándo el condensador del frigorífico se enciende o apaga podría ocurrir que:

1. La temperatura 15 minutos después sea mayor que 7°C , porque, por ejemplo, el condensador no se enciende hasta 20 minutos después, cuando la temperatura sobrepasa un umbral.
2. La temperatura sea menor si el condensador ha estado funcionando.
3. La temperatura sea más o menos la misma.

Esta idea de que hay una distribución de posibles resultados para el estado real del sistema en algún momento posterior es el **ruido del proceso**.

6.3. COMPARACIÓN DEL EFECTO DE VARIOS FILTROS

En esta sección comparamos el rendimiento del Filtro de Kalman con otros filtros que se usan para eliminar el ruido en las mediciones de una señal. En particular, lo comparamos con un filtro del tipo *AutoRegressive Moving Average*³ (ARMA) y una

³https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_autorregresivo_de_media_m%C3%B3vil

media móvil simple que toma los últimos 20 valores. Realizamos la comparación con estos dos ya que son los que vienen implementados en la *Android Beacon Library*⁴, que es la librería que utilizamos para detectar los beacons mediante el dispositivo móvil. En el repositorio de GitHub de esta librería podemos encontrar los detalles de implementación de estos dos filtros. La implementación se encuentra en las clases [ArmaRssiFilter.java](#) y [RunningAverageRssiFilter.java](#) respectivamente.

En primer lugar, mostramos el rendimiento de los dos filtros ya implementados en la librería para medidas ruidosas tomadas a 1m del beacon:

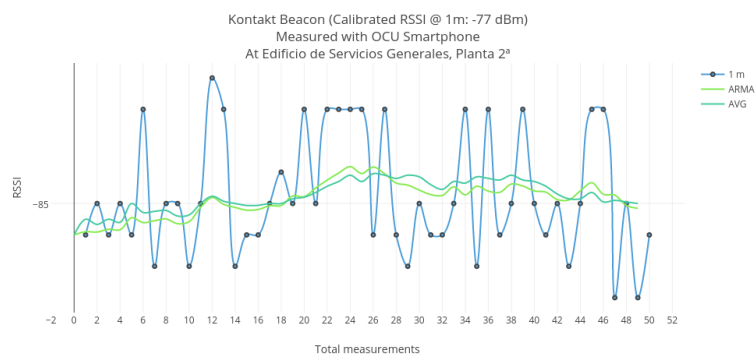


Figura 6.3.1: Comparación de filtros: ARMA vs media móvil (beacon a 1 metro)

Como podemos ver, ambos se comportan de manera similar, ya que ambos están basados en medias móviles. Veamos el rendimiento del Filtro de Kalman para los mismos valores.

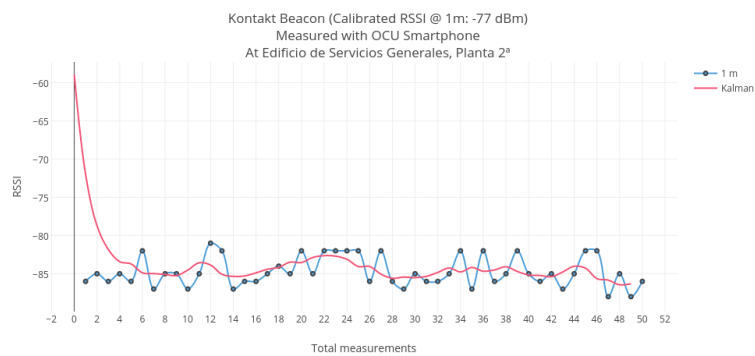


Figura 6.3.2: Comparación de filtros: Kalman (beacon a 1 metro)

⁴<https://altbeacon.github.io/android-beacon-library/>

El rendimiento parece similar. Incluyamos ahora los datos de diferentes distancias y comparemos el Filtro de Kalman con ARMA.

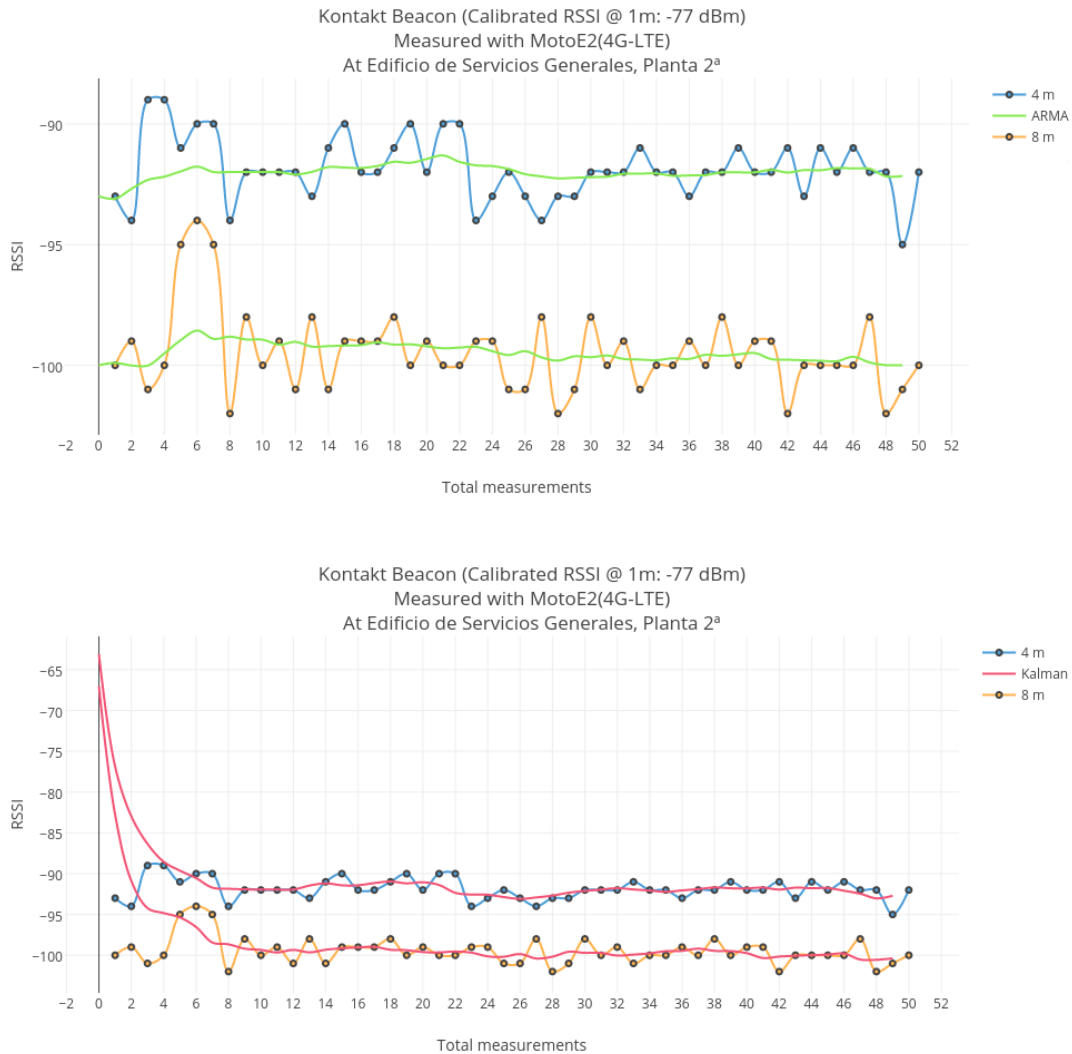


Figura 6.3.3: Comparación de filtros: ARMA vs Kalman (beacon a 4 y 8 metros)

De momento todos los datos que se han mostrado corresponden a situaciones en las que el usuario no se está desplazando. Veamos ahora que ocurre si unimos datos de diferentes distancias para ver como se comportan estos filtros cuando el usuario se aleja de la fuente. En primer lugar, veamos el rendimiento de los filtros basados en medias móviles.

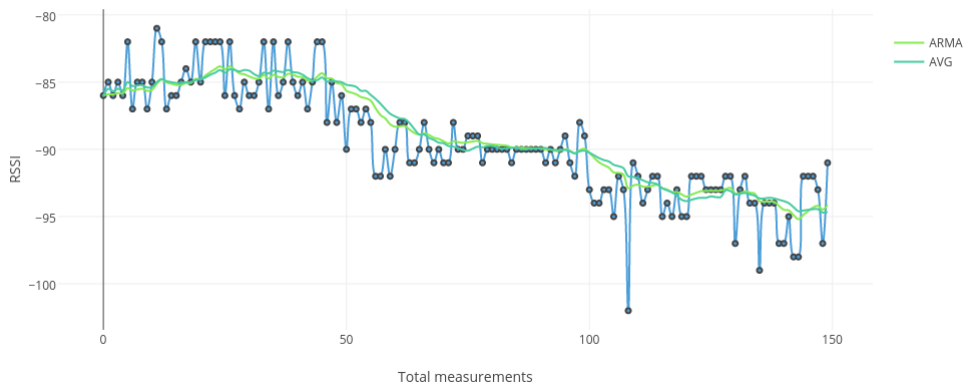


Figura 6.3.4: Comparación de filtros: ARMA vs media móvil (desplazamiento de 1 a 3 metros)

De nuevos, ambos filtros se comportan igual, y se adaptan bastante bien a los cambios en la intensidad de señal. Nótese que en la [figura 6.3.5](#), las 50 primeras medidas corresponden a la RSSI recibida a 1 metro de distancia; las 50 siguientes a la RSSI recibida a 2 metros; y la 50 restantes a la RSSI recibida a 3 metros. Es decir, es como si el usuario estuviera a 1 metro del beacon, y se alejase hasta los 3 metros.

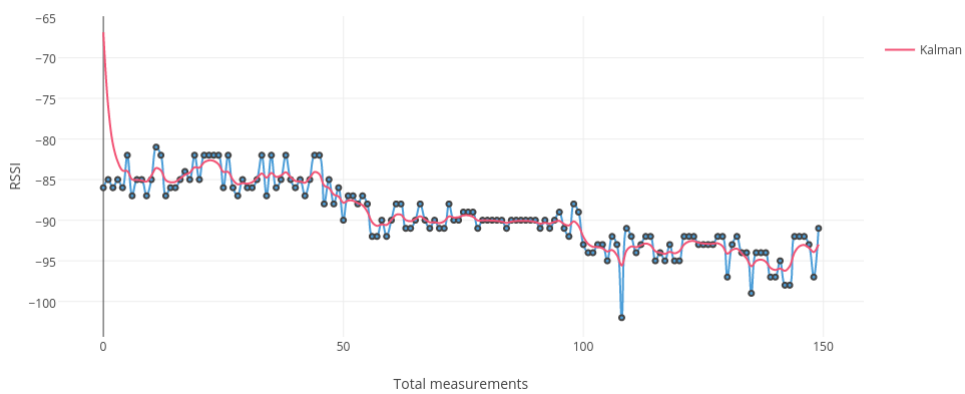


Figura 6.3.5: Comparación de filtros: Kalman (desplazamiento de 1 a 3 metros)

En base a los resultados anteriores parece que el Filtro de Kalman se ajusta mejor y se

estabiliza mucho antes en este tipo de casos. Sobre todo hay que observar lo rápido que se ajusta el filtro a los cambios de distancia, es decir, en las medidas número 50 y 100. El peor rendimiento de los filtros basados en medias móviles es que quizás, cuando el usuario se aleja de la fuente, están dando mucho más importancia a las anteriores medidas.

Comprobemos que pasa ahora cuando el usuario se aleja de los 4 a los 8 metros.



Figura 6.3.6: Comparación de filtros: ARMA vs Kalman (desplazamiento de 4 a 8 metros)

6.4. CONCLUSIÓN

Queda patente que el Filtro de Kalman se ajusta mejor a los cambios bruscos en las intensidades de señal recibida, es decir, a casos en los que el dispositivo de medición se aleja/acerca de la fuente (beacon). Y dado que esto es justo lo que ocurre en un sistema de posicionamiento en interiores, creemos que el rendimiento de este filtro será mejor que el de aquellos basados en medias móviles. Además, también se comporta muy bien a la hora de eliminar el ruido cuando el dispositivo de medición se encuentra en una posición estática.

Trabajos futuros

En este capítulo explicamos diversas mejoras que podrían introducirse en el sistema y que permitirían mejorar la precisión.

7.1. PREDECIR LA POSICIÓN DEL USUARIO MEDIANTE EL FILTRO DE KALMAN

Mientras que en este trabajo se utiliza el Filtro de Kalman para eliminar medidas de RSSI ruidosas, también puede utilizarse para predecir la posición del usuario usando un modelo matemático más complejo. Como se ha podido ver en la [sección 6.2](#), tanto para el modelo de estado como para el modelo de medida se ha supuesto que el usuario se encontraba estático (sin moverse). El objetivo sería mejorar el filtro haciendo uso del acelerómetro del dispositivo móvil para estimar cómo el usuario se está moviendo. Esto permitiría mejorar aún más la precisión del sistema, como ya han hecho otros autores[21], [22].

7.2. UTILIZAR UN GRAFO PARA RESTRINGIR LA POSICIÓN

En el sistema desarrollado no se tienen en cuenta ciertas características del edificio. Por ejemplo, puede que el sistema este posicionando al usuario en un determinado lugar y que, de repente, sitúe al usuario en otro lugar “saltándose” una pared.

Es decir, el objetivo es construir un grafo con los posibles caminos que se pueden tomar dentro del edificio para evitar este tipo de incongruencias. Además, de esta

manera también se puede predecir la posición de un usuario utilizando de nuevo el acelerómetro. Por ejemplo, es fácil determinar cuál va a ser la siguiente posición de un usuario que está en un pasillo moviéndose hacia adelante.

En definitiva, el objetivo de esta mejora es evitar saltos bruscos en la posición de un usuario, de manera similar a lo que ocurre en sistemas GPS.

7.3. COMBINAR VARIAS TECNOLOGÍAS

Se pueden combinar varias tecnologías para estimar la distancia del usuario a diversos puntos de referencia. Mientras que en este trabajo los puntos de referencia son balizas Bluetooth; podrían introducirse de la misma manera puntos de acceso Wi-Fi. Simplemente habría que añadir el modelo de propagación de este tipo de señal para estimar la distancia a los puntos Wi-Fi. Se utilizarían los tres puntos de acceso más cercanos, ya sean beacons o puntos Wi-Fi, para trilaterar al usuario.

7.4. SITUAR BEACONS EN PUNTOS CLAVE

Uno de los problemas de este tipo de sistemas es que es difícil diferenciar cuando el usuario está en una planta u otra, incluso cuando se utiliza la multilateración (con las distancias a 4 puntos de referencia). Es decir, es difícil determinar si la intensidad de señal recibida es débil porque uno está alejado de la fuente, o porque, en el caso de estar en una segunda planta, el beacon está situado en la planta inferior y la señal está atravesando el suelo.

Una posible solución sería colocar beacons en puntos clave, como en escaleras, para detectar cuando un usuario pasa de una planta a otra y, de esta manera, restringir el posicionamiento a una única planta.

Este modelo también podría extenderse, situando beacons en las entradas/salidas de habitaciones para restringir el posicionamiento a una zona mucho menor. La desventaja de esta mejora es que es necesario desplegar muchos más beacons.

Conclusiones

8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO

El sistema funciona bastante bien si la disposición de los beacons en el entorno es la correcta. Se ha comprobado de manera experimental que lo ideal es que la distancia entre beacons no sea superior a tres metros, ya que a partir de esta distancia el error en la estimación de la distancia (obtenida a partir del RSSI) comienza a ser bastante notable. También conviene que el usuario tenga varios beacons a su alrededor, es decir, que no tenga, por ejemplo, todos los beacons enfrente o detrás de él.

Respecto al rendimiento del Filtro de Kalman, se ha comprobado experimentalmente que funciona mejor que los filtros basados en medias deslizantes. Sobre todo, como ya se vió en los gráficos analizados con anterioridad, en casos en los que el usuario se está moviendo.

No obstante, el sistema puede mejorar bastante. Creemos que aplicando alguna de las soluciones vistas anteriormente [capítulo 7](#) pueden solucionarse varias de las deficiencias de este sistema. El principal problema que presenta actualmente es que, cuando se recibe un RSSI con mucho error, la trilateración provoca que la posición del usuario varíe en gran medida.

En definitiva, se ha demostrado que la trilateración ofrece una precisión más que aceptable, y que no es necesario acudir a otras técnicas más laboriosas como el fingerprinting.

8.2. VALORACIÓN PERSONAL

El desarrollo de este TFG ha sido una tarea que ha tenido varios altibajos. Ha habido momentos en los que ha sido difícil definir cuál era el siguiente paso a seguir o cual era el siguiente problema a abordar; esto unido a que en muchas ocasiones el esfuerzo realizado no mostraba los resultados esperados, ha supuesto que perdiera interés por la realización de este trabajo. No obstante, si ha habido momentos en los que he disfrutado con el desarrollo, sobre todo cuando había que analizar los datos recogidos.

Aunque en este TFG se propone un sistema con una precisión aceptable, creo que dado los recientes avances en este campo, supone un esfuerzo extra el desarrollar un sistema propio en vez de utilizar herramientas de terceros. Durante el desarrollo de este trabajo han surgido nuevas herramientas y se han mejorado otras tantas y, en mi opinión, a la hora de desarrollar un sistema de este tipo, es mucho más rápido optar por estas herramientas ya que, en teoría, se adaptan a cualquier entorno.

En cuanto al aprendizaje obtenido, creo que los conocimientos adquiridos tienen que ver más con la tarea investigadora realizada, más que con los conocimientos adquiridos de sistemas de posicionamiento en interiores. Ha sido necesario leer muchos trabajos de otros autores para, en momentos de bloqueo como se ha comentado anteriormente, saber cual era el siguiente paso a tomar.

Por último me gustaría realizar una pequeña reflexión. Creo que en la universidad uno no acaba de aprender a “fracasar”, es decir, en la universidad, si haces las cosas bien, casi en el 100% de los casos los resultados van a ser buenos. Con este TFG no ha ocurrido lo mismo. A menudo se han tomado buenas decisiones, pero los resultados que se han obtenido no han sido satisfactorios. Esto mismo ha provocado que perdiera motivación por momentos, por lo que quizás me falte por aprender que a veces uno, por mucho esfuerzo que ponga sobre una cosa, no significa que vaya a salir como uno espera, y que esto no es motivo para desilusionarse.

Agradecimientos

En estos momentos uno suele acordarse de su familia y amigos, y suele haber unas personas que acaban pasando desapercibidas y que, sin embargo, tienen gran culpa de que, como otros de mis compañeros, hayamos alcanzado esta pequeña meta. Son los profesores y maestros que han pasado por nuestras vidas, aquellos que fueron capaces (los que pudieron) de plantar la semilla de curiosidad en cada uno de nosotros y hacer que nos apasionemos por cosas que de otro modo hubieran pasado inadvertidas ante nuestros ojos. Pero sobre todo siento especial predilección por aquellos que me enseñaron cosas que no vienen en los libros. Aquellos que me enseñaron a levantarme después de cada pequeño fracaso; los que me enseñaron que los sacrificios normalmente suelen dar sus frutos; los que me enseñaron que las metas que quedan más lejos suelen traer más satisfacción que las que están más cerca; y los que me mostraron que la vida a veces solo se puede comprender en retrospectiva, por lo que hay que seguir hacia adelante pase lo que pase; que escoger mal una carrera no es el fin del mundo. Quizás por esto último es por lo que haya encontrado algo a lo que me quiero dedicar el resto de mi vida, ¿no es este uno de los mayores logros que puede conseguir una persona?

Por supuesto, no podía terminar sin agradecer todo a mis compañeros de laboratorio, que son los que me han padecido. Muchas gracias a Pery, Guillermo, Marcos, Julio, Víctor, Alberto, Edurne, Jacobo y Alejandro. Gracias por aguantarme.

Y por supuesto, gracias a dos personas que, para mí, han sido de los mejores profesores que he tenido en mi vida. En primer lugar a Juan, por el que siento gran admiración. Ojalá mi curiosidad por este mundo dure tanto como la que siente él. Y por otro lado a Quique, que además de mi profesor ha sido mi mentor, y del que atesoro numerosos consejos que me ha dado, por mucho que él se piense que caen en saco roto. Gracias a los dos por haberos cruzado en mi vida.

Datos usados para la multilateración en Wolfram Mathematica

Tabla A.0.1: Datos de las circunferencias de la [figura 5.1.3a](#)

trilateration2DExact2		
X	Y	Distance
0	0	1.41421
1	0	1
0	1	1

	Estimate	Standard Error	Confidence Interval
x_0	1.	$4,23052 \times 10^{-15}$	{1., 1.}
y_0	1.	$4,23052 \times 10^{-15}$	{1., 1.}

Tabla A.0.2: Ajuste generado asociados a la [figura 5.1.3a](#)

Tabla A.0.3: Datos de las circunferencias de la [figura 5.1.3b](#)

trilateration2DExact3		
X	Y	Distance
1	1	5
1	3	5
8	8	6.36
2	2	3.9

	Estimate	Standard Error	Confidence Interval
x_0	5,8993	0,000483764	{5,89839, 5,90021}
y_0	1.	0,00085449	{1,99559, 1,99881}

Tabla A.0.4: Ajuste generado asociados a la [figura 5.1.3b](#)

Tabla A.0.5: Datos de las circunferencias de la [figura 5.1.5](#)

trilateration2DInexact2			
X	Y	Distance	
0	0	1	
-5	5	4	
-5	-5	4	

	Estimate	Standard Error	Confidence Interval
x_0	-2,4582	2,2754	{-9,4613, 4,5445}
y_0	$-1,6781 \times 10^{-11}$	2,1438	{-6,5978, 6,6598}

Tabla A.0.6: Ajuste generado asociados a la [figura 5.1.5a](#)

	Estimate	Standard Error	Confidence Interval
x_0	-2,4582	2,2754	{-31,3703, 26,4538}
y_0	$-1,6781 \times 10^{-11}$	2,1438	{-27,2393, 27,2393}

Tabla A.0.7: Ajuste generado asociados a la [figura 5.1.5b](#)

Tabla A.0.8: Datos de las circunferencias de la [figura 5.1.7](#)

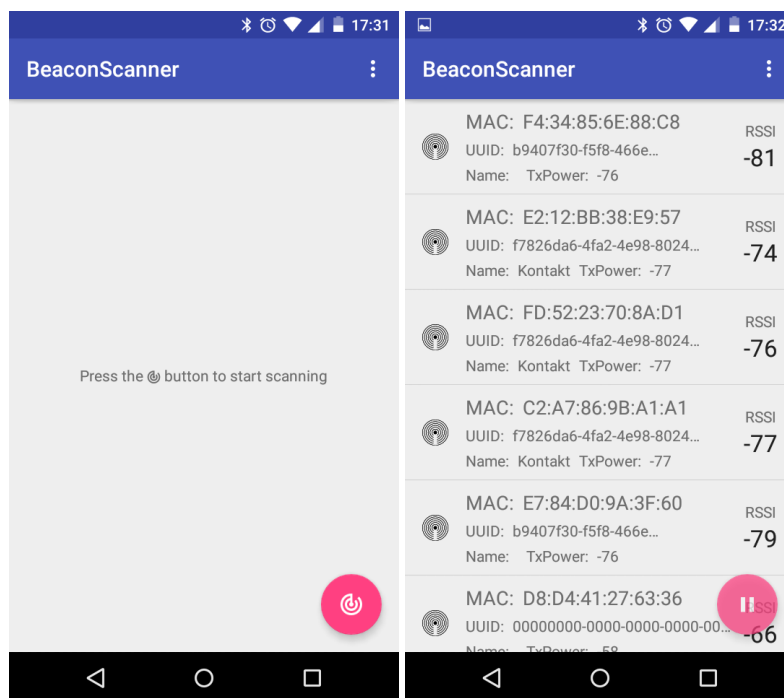
trilateration3DExact			
X	Y	Z	Distance
1	1	1	1
3	1	1	1
2	2	1	1
2.5	-1	1	2

Apéndice **B**

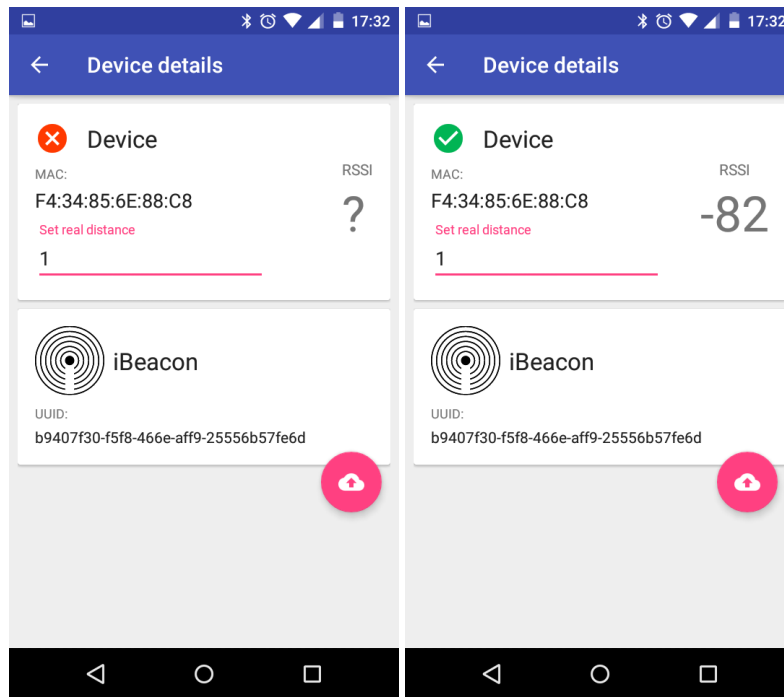
Aplicación utilizada para tomar las mediciones

En este anexo mostramos la aplicación que se ha desarrollado para obtener los datos que se han analizado durante el desarrollo de este proyecto.

En la pantalla principal hay un botón en la esquina inferior derecha que debemos pulsar para comenzar el escaneo. En este momento, se muestran los dispositivos Bluetooth al alcance del dispositivo móvil.



Como podemos ver, se muestran los datos de los beacon escaneados junto con el RSSI recibido. Si pulsamos sobre algunos de ellos, se muestra una vista de detalle en la que podemos introducir la distancia real a la que se encuentra el beacon. Esto nos permitirá añadir este datos a la base de datos. Si en algún momento el beacon está fuera de rango, la aplicación lo indica mostrando una “?” donde debería aparecer el nivel de RSSI.



Finalmente, podemos pulsar el botón que se muestra en la anterior imagen para empezar a tomar las 50 medidas. Una vez tomadas, aparece un botón que nos permite almacenarlas a la base de datos.

◆ N...	Time	◆ RSSI
0	Thu Jun 15 17:32:48 CEST 2017	-88
1	Thu Jun 15 17:32:49 CEST 2017	-94
2	Thu Jun 15 17:32:51 CEST 2017	-88
3	Thu Jun 15 17:32:53 CEST 2017	-91
4	Thu Jun 15 17:32:55 CEST 2017	-87

◆ N...	Time	◆ RSSI
45	Thu Jun 15 17:34:38 CEST 2017	-92
46	Thu Jun 15 17:34:40 CEST 2017	-96
47	Thu Jun 15 17:34:42 CEST 2017	-96
48	Thu Jun 15 17:34:44 CEST 2017	-87
49	Thu Jun 15 17:34:48 CEST 2017	-87

Acrónimos

AoA Angle of Arrival 13

IPIN International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation 10

IPS Indoor Positioning System 13

IR Infrared 19

LBA Location Based Applications 10

LED Ligh-Emitting Diode 20

RSSI Received Signal Strength Indicator 13

TDoA Time Difference of Arrival 13

ToA Time of Arrival 13

ToF Time of Flight 14

VLC Visible Light Communication 20

WLAN Wireless Local Area Network 22

Referencias

ARTÍCULOS

- [1] R. Ma, Q. Gop, C. Hu, y J. Xue, “An improved wifi indoor positioning algorithm by weighted fusion”, *Sensors*, 2015. dirección: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4610424/>.
- [2] M. E. Rusli, M. Ali, N. Jamil, y M. M. Din, “An improved indoor positioning algorithm based on rssi-trilateration technique for internet of things (iot)”, en *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, 2016, pp. 72-77. DOI: [10.1109/ICCCE.2016.28](https://doi.org/10.1109/ICCCE.2016.28).
- [3] R. F. Brena, J. P. García-Vázquez, C. E. Galván-Tejada, D. Muñoz-Rodríguez, C. Vargas-Rosales, y J. Fangmeyer Jr., “Evolution of indoor positioning technologies: A survey”, *Journal of Sensors*, p. 21, 2017. dirección: <https://www.hindawi.com/journals/js/2017/2630413/>.
- [4] F. Adrion, N. Hammer, B. Rößler, J. Dagmar, A. Kpaun, y E. Gallman, “Development, function and test of a static test bench for uhf-rfid ear tags”, *LAND-TECHNIK*, 2015. dirección: <https://www.landtechnik-online.eu/ojs-2.4.5/index.php/landtechnik/article/download/2660/4457>.
- [5] D. J. Glasser, K. W. Goodman, y N. Einspruch, “Chips, tags and scanners: Ethical challenges for radio frequency identification”, *Ethics and Information Technology*, vol. 9, n.º 2, pp. 101-109, 2007, ISSN: 1572-8439. DOI: [10.1007/s10676-006-9124-0](https://doi.org/10.1007/s10676-006-9124-0). dirección: <http://dx.doi.org/10.1007/s10676-006-9124-0>.
- [6] L. Mainetti, L. Patrono, y I. Sergi, “A survey on indoor positioning systems”, pp. 111-120, 2014. DOI: [10.1109/SOFTCOM.2014.7039067](https://doi.org/10.1109/SOFTCOM.2014.7039067).

- [7] P. Davidson y R. Piché, “A survey of selected indoor positioning methods for smartphones”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, n.º 2, pp. 1347-1370, 2017, ISSN: 1553-877X. DOI: [10.1109/COMST.2016.2637663](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2637663).
- [8] S. H. Jung, G. Lee, y D. Han, “Methods and tools to construct a global indoor positioning system”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. PP, n.º 99, pp. 1-14, 2017, ISSN: 2168-2216. DOI: [10.1109/TSMC.2016.2626797](https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2626797).
- [9] S. He y S. H. G. Chan, “Wi-fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, n.º 1, pp. 466-490, 2016, ISSN: 1553-877X. DOI: [10.1109/COMST.2015.2464084](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2464084).
- [10] W. Xu, J. Wang, H. Shen, H. Zhang, y X. You, “Indoor positioning for multiphotodiode device using visible-light communications”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, n.º 1, pp. 1-11, 2016, ISSN: 1943-0655. DOI: [10.1109/JPHOT.2015.2513198](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2513198).
- [11] H. Lv, L. Feng, A. Yang, P. Guo, H. Huang, y S. Chen, “High accuracy vlc indoor positioning system with differential detection”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, n.º 3, pp. 1-13, 2017, ISSN: 1943-0655. DOI: [10.1109/JPHOT.2017.2698240](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2698240).
- [12] V. Varshney, R. K. Goel, y M. A. Qadeer, “Indoor positioning system using wi-fi bluetooth low energy technology”, en *2016 Thirteenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, 2016, pp. 1-6. DOI: [10.1109/WOCN.2016.7759023](https://doi.org/10.1109/WOCN.2016.7759023).
- [14] S. He y S. H. G. Chan, “Wi-fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, n.º 1, pp. 466-490, 2016, ISSN: 1553-877X. DOI: [10.1109/COMST.2015.2464084](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2464084).
- [15] R. Faragher, “Understanding the basis of the kalman filter via a simple and intuitive derivation [lecture notes].”, *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 29, n.º 5, pp. 128-132, 2012. dirección: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/spm/spm29.html#Faragher12>.
- [16] G. Welch y G. Bishop, “An introduction to the kalman filter”, Chapel Hill, NC, USA, inf. téc., 1995.
- [18] V. Ortiz, M. Nieto, y J. Castañeda, “Análisis y aplicación del filtro de kalman a una señal con ruido aleatorio”, *Scientia et Technica*, vol. 18, n.º 1, pp. 267-274, 2013. dirección: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/8241>.
- [21] M. Nabil, M. B. Abdelhalim, y A. AbdelRaouf, “A new kalman filter-based algorithm to improve the indoor positioning”, en *2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, 2016, pp. 236-242. DOI: [10.1109/ICMCS.2016.7905588](https://doi.org/10.1109/ICMCS.2016.7905588).

- [22] T. Guo, F. Qiao, M. Liu, A. Xu, Q. Liu, y N. Zhang, “An improved kalman filtering method for indoor location”, en *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2016, pp. 1747-1751. DOI: [10.1109/CompComm.2016.7925001](https://doi.org/10.1109/CompComm.2016.7925001).

ONLINE

- [13] T. U. o. G. J. Wilson. (). From barns to satellites: An introduction to the mathematics of global positioning systems, dirección: http://jwilson.coe.uga.edu/EMAT6680Fa05/Schultz/6690/Barn_GPS/Barn_GPS.html.
- [17] David. (2015). Observation matrix in kalman filter, dirección: <http://dsp.stackexchange.com/questions/27484/observation-matrix-in-kalman-filter/27488>.
- [19] S. D. Levy. (). The extended kalman filter: An interactive tutorial for non-experts, dirección: https://home.wlu.edu/~levys/kalman_tutorial/.
- [20] Dave. (2013). Explain process noise terminology in kalman filter, dirección: <http://stackoverflow.com/questions/19537884/explain-process-noise-terminology-in-kalman-filter>.