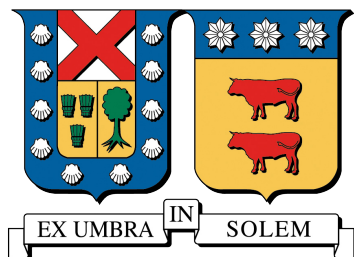


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
SANTIAGO - CHILE



ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO INDOOR

CARLOS IGNACIO CHESTA RIVAS

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INFORMÁTICO**

PROFESOR GUÍA: HERNÁN ASTUDILLO ROJAS
PROFESOR CORREFERENTE: RAÚL MONGE ANWANDTER

NOVIEMBRE 2017

Resumen

El posicionamiento *indoor* es cada vez más frecuente. Conocer la posición en ambientes donde no es posible usar la señal GPS se vuelve un desafío no trivial donde hay que tomar decisiones de qué tecnología utilizar conociendo sus costos de implementación, grado de precisión, escalabilidad, etc. En este trabajo se presenta un análisis de posicionamiento *indoor* entre las dos tecnologías más accesibles: WiFi y Bluetooth usando trilateración. Para esto se instalaron tres dispositivos Access Point para el caso de WiFi y tres Beacon para Bluetooth en puntos establecidos dentro del estacionamiento subterráneo del Campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María y se procedió la toma de datos variando la posición de estos dispositivos. Los resultados obtenidos indicaron que para un área de trabajo de $7,95[m^2]$ se presenta un error promedio de $8,12[m]$ para Bluetooth y $14,83[m]$ para Wifi, mientras que para un área de $118,37[m^2]$ se obtuvo un error promedio de $33,02[m]$ para Bluetooth y $26,22[m]$ lo que demuestra que hay diferencias de exactitud entre las tecnologías, cada una con sus ventajas y desventajas dependiendo de la configuración y distribución de los distintos Access Point y/o Beacons.

Abstract

Indoor positioning is becoming more frequent. To know the position in environment where there is no GPS signal it becomes a no trivial challenge where it has to make decisions about which technology to use knowing their implementation costs, degree of accuracy, etc. This work presents a *indoor* positioning analysis between the two most accessible technologies: WiFi and Bluetooth using trilateration technique. For this, three Access Point devices were installed for the case of WiFi and three Beacon devices for Bluetooth in established points on the Campus San Joaquín underground parking from the Federico Santa Maria Technical University, then the data measurement was taken by varying the position of these devices. The results indicated that for a work area of $7,95[m^2]$, an average error of $8,12[m]$ for Bluetooth and $14,83[m]$ for Wifi is presented; while for a area of $118,37[m^2]$, an average error of $33,02[m]$ was obtained for Bluetooth and $26,22[m]$. This shows that there are differences in accuracy between the technologies, each with its advantages and disadvantages depending on the configuration and distribution of the different Access Point and/or Beacons.

Glosario

Access Point. Término en inglés para punto de acceso inalámbrico. En una red de computadoras, es un dispositivo de red que interconecta equipos de comunicación inalámbricos, para formar una red inalámbrica que interconecta dispositivos móviles o tarjetas de red inalámbricas. Son dispositivos que son configurados en redes de tipo inalámbricas que son intermediarios entre una computadora y una red (Internet o local).

Android. Sistema operativo basado en el núcleo Linux, diseñado principalmente para teléfonos móviles inteligentes con pantalla táctil.

Beacon. Dispositivo de bajo consumo que emite una señal broadcast, y son suficientemente pequeños para fijarse en una pared o mostradores. Utiliza conexión bluetooth de bajo consumo (BLE) para transmitir mensajes o avisos directamente a un dispositivo móvil sin necesidad de una sincronización de los aparatos.

GPS. El Sistema de Posicionamiento Global (o en inglés Global Positioning System, GPS) es un sistema compuesto por una red de 24 satélites denominada NAVSTAR y unos receptores, que permiten la posición requerida en cualquier lugar del planeta.

Trilateración. Método matemático usado para determinar las posiciones relativas de objetos usando la geometría de triángulos. Para ello, se usa las localizaciones conocidas de dos o más puntos de referencia, y la distancia medida entre el sujeto y cada punto de referencia. Luego, para determinar la posición relativa única en el plano bidimensional, se necesitan generalmente al menos tres puntos de referencia.

Smartphone. Término comercial para el teléfono celular con pantalla táctil, que permite al usuario conectarse a internet, gestionar cuentas de correo electrónico e instalar otras aplicaciones y recursos a modo de pequeño computador.

Índice de Contenidos

Resumen	I
Abstract	II
Glosario	III
Índice de Contenidos	IV
Índice de Tablas	VII
Índice de Figuras	VIII
1. Introducción	1
2. Descripción del problema	3
2.1. Descripción del problema	3
2.2. Objetivos	4
2.2.1. Objetivo principal	4
2.2.2. Objetivos específicos	4
3. Estado del Arte	6
3.1. Geolocalización	6
3.2. Trilateración	8
	IV

3.3. Tecnologías que permiten la Geolocalización	11
3.3.1. Localización <i>outdoor</i>	11
3.3.1.1. GPS	11
3.3.1.2. Localización por antenas móviles (GSM)	12
3.3.2. Localización <i>indoor</i>	14
3.3.2.1. Wi-Fi	14
3.3.2.2. Bluetooth - Beacons	16
3.3.2.3. RFID	18
3.3.2.4. Localización por Magnetismo	21
4. Diseño del Estudio	22
4.1. Cualidades y costos de tecnologías	22
4.1.1. Wi-Fi	23
4.1.2. Bluetooth	25
4.1.3. RFID	27
4.1.4. Localización por magnetismo	29
4.1.5. Resumen de tecnologías	30
4.2. Lugar del estudio	31
4.3. Diseño de la Aplicación	32
5. Implementación y ejecución del estudio	34
5.1. Software utilizado	34
5.2. Hardware utilizado	42
5.3. Consideraciones	44
5.4. Ejecución	45
6. Resultados	48

6.1. Resultados obtenidos	48
6.2. Análisis de Resultados	56
6.2.1. Análisis cuantitativo de resultados	56
6.2.2. Análisis cualitativo de resultados	59
7. Conclusiones	61
Bibliografía	64

Índice de Tablas

3.1. Descripción de tipos de RFID pasivos.	19
4.1. Rango de señal Wi-Fi según el protocolo 802.11.	24
4.2. Características de productos ofrecidos por Estimote.	26
4.3. Resumen de costos de tecnologías de posicionamiento.	30
5.1. Especificaciones técnicas del modelo AirStation WHR-HP-G54	43
5.2. Especificaciones técnicas de antenas utilizadas	43
5.3. Especificaciones técnicas de Beacon Estimote Proximity	44
6.1. Resumen de resultados obtenidos.	55

Índice de Figuras

3.1. Los puntos celestes representa la ubicación donde la intensidad de señal han sido medidas. Las líneas negras representan posibles rutas. Fuente: Asito University.	7
3.2. La posición del usuario será aquella celda donde la lectura de señal sea mayor.	7
3.3. Representación gráfica del posicionamiento por triangulación.	8
3.4. Representación gráfica de trilateración usando tres círculos intersectados.	9
3.5. Representación del posicionamiento a través de Cell-ID.	13
3.6. Representación gráfica de FSPL.	15
3.7. Beacon de la empresa Estimote.	17
3.8. Funcionamiento de un sistema RFID.	20
4.1. Componentes básicos del RFID UHF. Fuente: RFID Insider.	28
4.2. Plano del lugar de experimentación.	31
5.1. Plano del estacionamiento en la aplicación.	36
5.2. Agregando dispositivos.	37
5.3. Descripción del dispositivo seleccionado.	38
5.4. Ingreso de distancias entre Access Points o Beacons.	39
5.5. Pantalla de la aplicación que representa que la ubicación está activa.	40
5.6. Distancia entre la posición real y calculada.	41

5.7. Referencia del área formada por la unión de los dispositivos.	46
6.1. Posiciones relativas calculadas por el sistema para un área de $7,95[m^2]$.	49
6.2. Errores de distancia para un área de $7,95[m^2]$	49
6.3. Posiciones relativas calculadas por el sistema para un área de $25,09[m^2]$	50
6.4. Errores de distancia para un área de $25,09[m^2]$	50
6.5. Posiciones relativas calculadas por el sistema para un área de $27,64[m^2]$	51
6.6. Errores de distancia para un área de $27,64[m^2]$	52
6.7. Posiciones relativas calculadas por el sistema para un área de $84,52[m^2]$	53
6.8. Errores de distancia para un área de $84,52[m^2]$	53
6.9. Posiciones relativas calculadas por el sistema para un área de $118,37[m^2]$	54
6.10. Errores de distancia para un área de $118,37[m^2]$	55
6.11. Resumen gráfico de resultados obtenidos.	56

Capítulo 1

Introducción

La geolocalización hace referencia al posicionamiento con el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen) en un sistema de coordenadas determinado. En las últimas décadas, junto con la revolución de Internet, la geolocalización ha tomado un papel cada vez más fundamental en distintas áreas. Es un concepto utilizado fuertemente en el sector militar e industrial, con éste último mediante el control de flotas en tiempo real. No obstante, la geolocalización adquiere fuerza con la penetración y la popularidad que están adquiriendo los smartphones, debido a que en estos se facilita la tarea de geo-localizarse, ya sea usando GPS, las torres de redes móviles cercanas, o la red wifi a la que se conectan, con cualesquiera de estos datos se puede obtener la ubicación exacta o aproximada del teléfono móvil. Se estima que para fines del año 2016 hay un poco más de 2 mil millones de Smartphones activos en el mundo ([Liu, 2015](#)), por lo que potencialmente la utilidad de la geolocalización es bastante accesible.

La georreferencia se divide en dos tipos: la exterior basada en GPS -u otros sistemas satelitales equivalentes-, antenas de telefonía; y la interior (o indoor) basada en posicionamiento por WiFi, Bluetooth, entre otros. La principal diferencia entre ambos tipos es que en el primero es usado para localizaciones sobre la superficie, es decir, al aire libre o

en el mundo exterior, en cambio para el segundo tipo se usa principalmente para interiores de edificios, túneles, niveles bajo tierra, etc, donde se dificulta la conexión satelital del GPS. En esta memoria se centrará en el segundo tipo, esto es, la geolocalización indoor.

En la presente memoria se abordará la problemática que surge en conocer la posición de un objeto en lugares donde prácticamente no existe una comunicación directa con los satélites GPS y por tanto imposibilitar la geolocalización que éstos nos ofrece. Este problema plantea la necesidad de buscar otras soluciones que permitan satisfacer la necesidad de saber dónde está cierto objeto tomando en cuenta las limitaciones físicas del lugar en cuestión.

Este trabajo posee la siguiente estructura: en el capítulo 2 se describe el problema a tratar dando el contexto de la memoria y del porqué de ésta. Luego el capítulo 3 se realiza un estado del arte especificando conceptos claves como la geolocalización, formas y métodos de posicionamiento, además se indica cuáles son las tecnologías actuales con que es posible la geolocalización, tanto de manera externa (*outdoor*) como interna (*indoor*) y cómo operan éstas. El capítulo 4 se centra en la formulación de una propuesta para determinar cuál de estas tecnologías es más factible dependiendo de las necesidades (ya sea costos, precisión, mantención, entre otros). Luego, en el capítulo 5 se detalla la forma del estudio, es decir, cómo se realizará el estudio incluyendo el hardware y el software usado. En el capítulo 6 se señalan los resultados obtenidos luego de las mediciones hechas. Finalmente, en el capítulo 7 se tendrán las conclusiones pertinentes basados en los resultados obtenidos de la experimentación de la propuesta señalada.

Capítulo 2

Descripción del problema

En el presente capítulo se describe la problemática y su contexto en el que se basa la presente memoria.

2.1. Descripción del problema

En la actualidad el posicionamiento de objetos se vuelve cada vez más importante en ciertas áreas tanto empresariales como de investigación ya que su utilidad y alcance es bastante amplio. Esto se hace en su gran mayoría mediante el sistema *Global Positioning System* ([Kaplan y Hegarty, 2005](#)) (GPS, por sus siglas en inglés), el cual mediante la triangulación de satélites permiten obtener la posición de un determinado objeto o sistema con una gran precisión, del orden de centímetros a tres metros de error.

No obstante, esto presenta una serie de problemas y limitantes. La primera y la más importante es que el artefacto debe estar en ambientes *outdoor*, es decir, debe estar en lo ideal en la superficie sin haber mayor interferencia entre el dispositivo con GPS con el como techos de concreto o entre otros; otra limitancia es la necesidad de contar con un sensor GPS, que si bien últimamente cada vez más dispositivos cuentan con él aun así

no es barato de obtener; entre otras limitancias.

Lo anterior provoca un gran problema en el posicionamiento en ambientes *indoor* donde al estar bajo tierra o bajo una cantidad considerable de capas de concreto la señal GPS no funciona en su totalidad por lo que no es posible obtener la posición del dispositivo a través de esta tecnología. Este problema no es trivial para sectores como la minería donde se requiere monitorear en tiempo real dónde van sus camiones y sus trayectos.

Es por esto que se propone trabajar en un análisis comparativo de sistemas de posicionamiento indoor con el cual se pueda, a partir de una serie de estudios de factibilidad de diversas tecnologías que permitan saber en qué posición está cierto dispositivo móvil, identificar cuál es la tecnología que se adapte mejor a diversos ambientes y contextos en específico, además del costo de implementación, sus grados de error, entre otros. Esto sería de gran utilidad para la evaluación de proyectos a futuro o la mejora de sistemas que necesiten saber con exactitud y en tiempo real la posición de un determinado objeto, dispositivo o artefacto.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo principal

Determinar los *trade-offs* entre exactitud y costo para tecnologías de posicionamiento indoor.

2.2.2. Objetivos específicos

- Identificar las tecnologías actualmente que permiten conocer la posición en ambientes *indoor*.

- Conocer los atributos de calidad (precisión, gasto energético, mantención, tasa de errores, fuerza de la señal, entre otros) de soluciones actuales.
- Identificar posibles escenarios donde sea posible implementar las soluciones

Capítulo 3

Estado del Arte

3.1. Geolocalización

La geolocalización se define como la identificación de la ubicación geográfica real de un objeto en cuestión ([Wellenhof et al., 1992](#)). El término en sí posee varias aristas. Por un lado puede referirse a la consulta de una ubicación en específico o también para conocer cuál es la posición absoluta de cierto objeto o cuerpo.

La posición física de un dispositivo se puede conocer mediante diversas metodologías. Éstas pueden ser mediante el reconocimiento de patrones o *fingerprints*, posicionamiento basado celdas de origen, triangulación, y trilateración.

El reconocimiento de patrones consiste en registrar las intensidades de señales de varias estaciones base localizados predefinidamente ([Yang et al., 2012](#)). Se almacenan una cantidad considerable de estos datos, se procesan y luego son mapeados al lugar en cuestión. Finalmente, para el posicionamiento, el usuario que desea conocer su posición mide las intensidades de señales de las estaciones base cercanas y compara los datos obtenidos con los datos previamente registrados. La figura [3.1](#) muestra un ejemplo de posicionamiento por *fingerprints*.

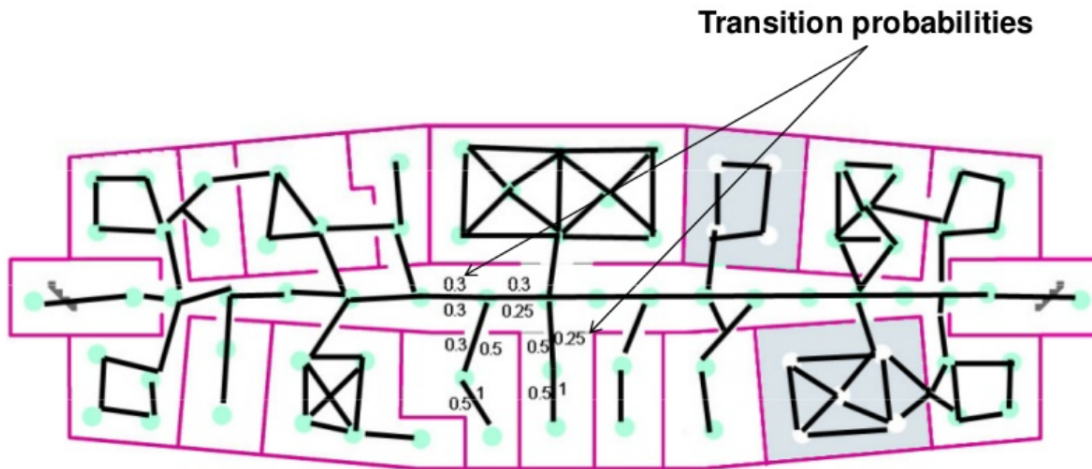


Figura 3.1: Los puntos celestes representa la ubicación donde la intensidad de señal han sido medidas. Las líneas negras representan posibles rutas. Fuente: Asito University.

Para el caso del posicionamiento basado en celdas de origen, simplemente se usa la ubicación de una estación base para determinar la localización del usuario. La posición del usuario está determinado por la intensidad de señal de diferentes estaciones, la cual se asumirá que está en la celda de la estación con la que obtuvo una mayor intensidad de señal. Finalmente el dispositivo terminal envía el ID de la estación más cercana a un servidor y éste le retorna la posición de dicha estación (Castro, Luis, 2015). Este método es usado para la localización en algunas redes GSM. La figura 3.2 representa este método de posicionamiento.

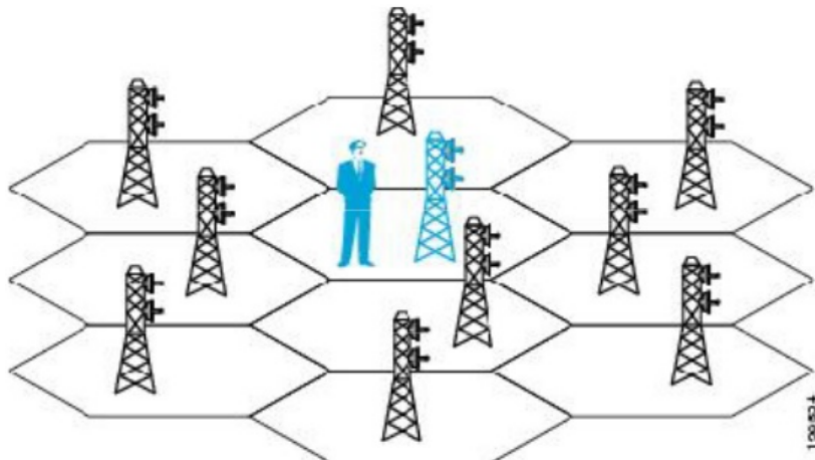


Figura 3.2: La posición del usuario será aquella celda donde la lectura de señal sea mayor.

La triangulación corresponde al proceso de determinar un cierto punto midiendo los ángulos de distintos puntos conocidos. Las estaciones base miden el ángulo de llegada (*angle of arrival*, AoA) de la señal recibida por el terminal usuario, luego, la posición del terminal es computada usando ubicaciones conocidas de las estaciones base y AoA asociadas a ellas (Liu et al., 2007). La figura 3.3 muestra el posicionamiento por triangulación.

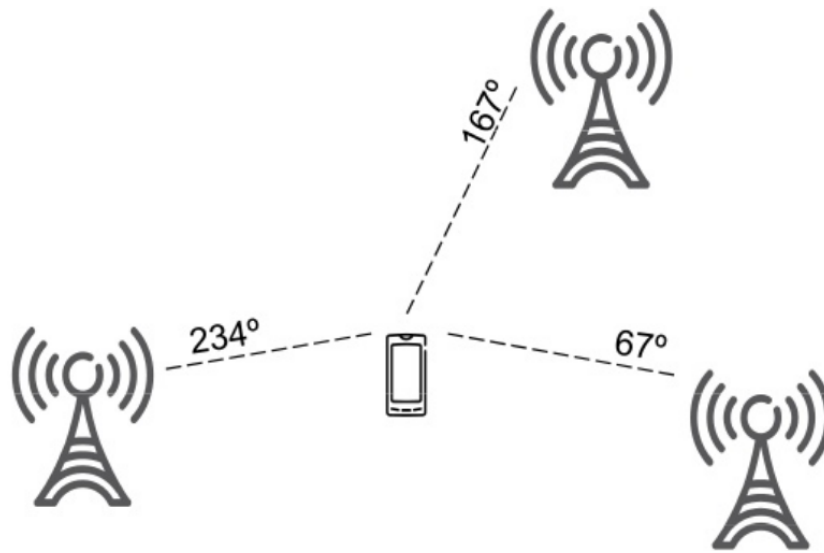


Figura 3.3: Representación gráfica del posicionamiento por triangulación.

Sin embargo, el tema de esta memoria no es abordar la localización de artefactos conectados a internet, triangulación ni de reconocimiento de patrones, por lo que no se enfocará más allá de lo señalado.

3.2. Trilateración

Para aquellos objetos que no necesariamente están conectados a la Red, la principal técnica es mediante la trilateración.

Éste es un método matemático para obtener las coordenadas espaciales de un punto

del que se ignora su posición a partir de la medición de distancias a puntos de coordenadas conocidas a priori. Para conocer la posición relativa exacta de un punto se necesita al menos tres puntos de referencias conocidos.

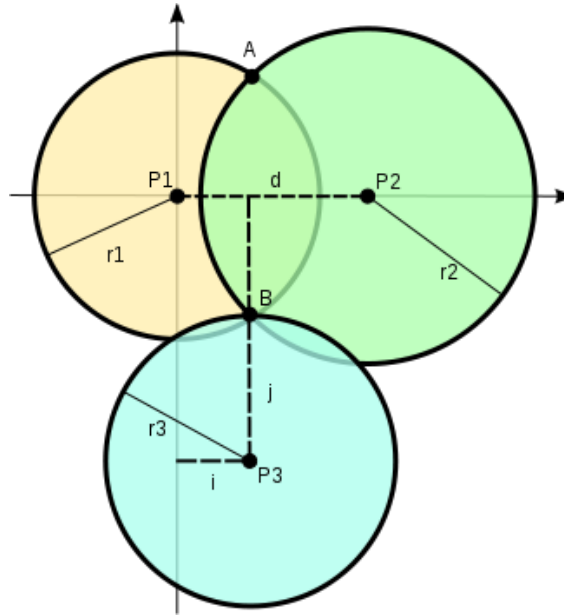


Figura 3.4: Representación gráfica de trilateración usando tres círculos intersectados.

En la figura 3.4 se desea saber la posición relativa de B en un plano bidimensional teniendo como referencia tres puntos: P_1 , P_2 , P_3 . Al medir r_1 se reduce a una circunferencia, si se mide r_2 se reduce a dos posibles puntos: A y B . Finalmente, al tener la medición de r_3 es posible obtener la posición del punto B . Es posible agregar más puntos de referencia para reducir posibles errores de estimación que puedan estar presentes al momento de obtener las mediciones.

Analíticamente se puede obtener la posición relativa mediante la ecuación de tres esferas. Para ello se toma como supuesto que la primera esfera está posicionado en el origen del sistema cartesiano, la segunda esfera posicionada en el eje x y finalmente que las tres esferas estén en el plano $z = 0$. Los centros de las esferas están en las posiciones $(0, 0, 0)$, $(d, 0, 0)$ y $(i, j, 0)$, con radios r_1 , r_2 , y r_3 , respectivamente.

Lo anterior analíticamente se resume en:

$$x^2 + y^2 + z^2 = r_1^2 \quad (3.1)$$

$$(x - d)^2 + y^2 + z^2 = r_2^2 \quad (3.2)$$

$$(x - i)^2 + (y - j)^2 + z^2 = r_3^2 \quad (3.3)$$

Luego de un poco de álgebra se obtiene el valor de las variables independientes x , y y z , las cuales poseen los siguientes valores:

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad (3.4)$$

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 - x^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x \quad (3.5)$$

$$z = \pm \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (3.6)$$

Como se señaló anteriormente, estos valores de x , y y z se obtienen suponiendo que las esferas están en ciertas posiciones favorables analíticamente. No obstante, es posible hacer el mismo análisis matemático para cualquier sistema de referencia haciendo una traslación correspondiente de los puntos de referencia para que calcen con los supuestos señalados anteriormente, luego obtenido los valores de x , y y z se hace una traslación inversa. De esta manera se obtiene las coordenadas relativas para cualquier punto en el espacio.

3.3. Tecnologías que permiten la Geolocalización

Actualmente hay diversas formas que aprovechan este método para obtener la posición global de un objeto. Éstos se dividen en dos grandes categorías: Localización *indoor* y *outdoor*. La diferencia de cada uno está en el ambiente de la ubicación del objeto, es decir, está determinado según la presencia de posibles objetos o niveles de terreno que impidan la comunicación efectiva con el exterior. Un ejemplo de lo anterior es la ubicación del objeto en una calle al aire libre, o la ubicación del objeto en una mina subterránea. En el primer caso sí es factible comunicar el dispositivo con el exterior (ya sea a través de señales GPS o Internet), mientras que para el segundo caso la comunicación se dificulta más debido a la gran interferencia o pérdida de ruido producto de la presencia de concreto u otro material, por lo que hay que recurrir a otras tecnologías y metodologías para conocer cuál es la posición de un objeto.

3.3.1. Localización *outdoor*

Para la localización *outdoor* existen diversos sistemas. El principal sistema satelital con un uso masivo es GPS. También existen otros tales como GLONASS¹, Galileo² y Beidou³. El funcionamiento de estos sistemas satelitales son similares.

3.3.1.1. GPS

Global positioning System (GPS) (Kaplan y Hegarty, 2005) es un sistema que permite determinar la ubicación de un objeto con una gran precisión del orden de centímetros a unos pocos metros. Para ello se cuenta con 24 satélites que orbitan una altura de 20.200 km de la Tierra y la trilateración. Las trayectorias de estos satélites están sincronizados

¹<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM:l24205>

²http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/What_is_Galileo

³<http://en.beidou.gov.cn/>

de tal manera que al menos cuatro satélites de forma simultanea pueden cubrir todo punto de la superficie terrestre.

Mediante la trilateración es posible determinar la posición de un dispositivo mediante los siguientes pasos:

1. Cada satélite indica que el receptor se encuentra en un punto en la superficie de la esfera, con centro en el propio satélite y de radio la distancia que existe entre éste y el receptor.
2. Con la información de dos satélites queda determinada una circunferencia que resulta al intersectar dos esferas en algún punto donde se encuentra el receptor
3. Con la presencia de un tercer satélite se eliminan los inconvenientes de la falta de sincronización de los satélites. Con esto es posible obtener la localización geoespacial exacta.
4. Para una mayor precisión y con fin de eliminar posibles errores de exactitud, se cuenta con un cuarto o más satélites que también determinan la posición.

No obstante, para obtener esta posición se requiere que el receptor esté en una línea de comunicación casi directa a los satélites, esto es que no haya mayor interferencia entre el receptor y los satélites. Es por esto que esta tecnología, si bien funciona bien en espacios abiertos, resulta casi inútil para espacios cerrados y/o bajo el suelo.

3.3.1.2. Localización por antenas móviles (GSM)

El sistema global para las comunicaciones móviles (GSM, por sus siglas en inglés) (Mouly et al., 1992) es el estándar de comunicación de telefonía móvil digital más utilizado en el mundo, presente en la gran mayoría de dispositivos móviles. A diferencia de otros estándares móviles, la tecnología GSM utiliza tarjetas SIM para comunicarse

con las torres de telefonía, lo que permite al usuario poder cambiar su dispositivo móvil sin interrumpir el servicio.

La localización a través de GSM funciona a través de triangulación. En la actualidad existen varios métodos para obtener la ubicación de un dispositivo GSM: Cell of Origin, E-OTD, Tiempo de llegada, Ángulo de llegada y Estimación mejorada de la diferencia de tiempo; siendo los dos primeros los más utilizados.

Cell of Origin basa su búsqueda en la inclusión del ID de célula (Cell ID, en inglés) e ID de célula mejorada (Enhanced Cell ID, en inglés). Mediante la técnica Cell ID, la ubicación del móvil queda determinada por la célula en que se encuentra. Esta célula es conocida por todo momento dentro del sistema GSM. No obstante, hay una diferencia de tamaños entre las células por lo que la precisión de este sistema queda limitado al orden de los 150 metros en zonas urbanas y a 4 kilómetros aproximados en zonas rurales. El método de ID de célula mejorada hace posible obtener una mejor exactitud, en especial el zonas rurales donde reduce el radio al orden de los 500 metros aproximadamente.

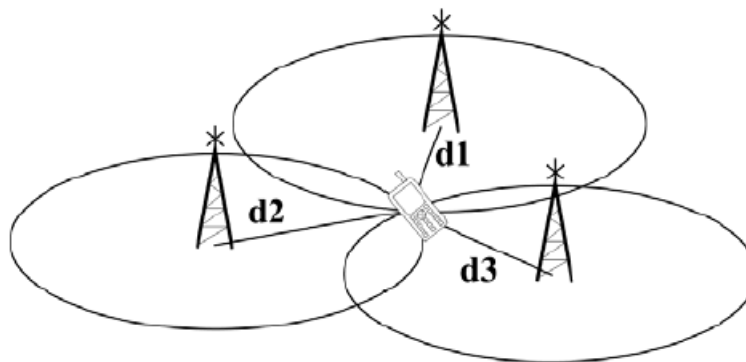


Figura 3.5: Representación del posicionamiento a través de Cell-ID.

Por otra parte, el método E-OTD (Enhanced-Observed Timed Difference, por sus siglas en inglés) logra aumentar la precisión al orden de los 50 a 200 metros por cada tres estaciones base, dependiendo del número de LMU (Unidad de medida de localización)

3.3.2. Localización *indoor*

Para obtener la posición en ambientes indoor se necesitan técnicas como la trilateración. Para ello se cuentan con varias tecnologías que permiten conocer -con distintos grados de exactitud- en qué posición se encuentra ubicado un dispositivo móvil u otro artefacto. Estas tecnologías se mencionan a continuación.

3.3.2.1. Wi-Fi

Red de área local inalámbrica (WLAN, por sus siglas en inglés)([Crow et al., 1997](#)) es un sistema de comunicación de información que transmite y recibe datos a través de ondas electromagnéticas entre dispositivos dentro de un área del orden de los 20 a 100 metros. Los sistemas WLAN actuales están basados en los estándares IEEE 802.11 (conocidos como Wi-Fi). El estándar actual es el IEEE 802.11ac que opera sobre la banda de 2.4 GHz con soporte también en bandas de 5 GHz.

Los dispositivos con la tecnología Wi-Fi pueden conectarse a una red local y a internet a través de un punto de acceso de red inalámbrica.

Para una conexión efectiva a través de Wi-Fi se requiere de dos elementos:

- Tarjetas Wi-Fi en dispositivos clientes conectadas a antenas capaces de detectar señales Wi-Fi y poder conectarse a ellas.
- Punto de acceso (AP) que da el servicio a los clientes, gestionando así los paquetes recibidos desde un enrutador y enviándolos al cliente destino.

Para el posicionamiento basado en redes inalámbricas Wi-Fi está basado en las mediciones de Free-space path loss (FSPL). FSPL es la pérdida de la fuerza de una señal electromagnética en un espacio abierto, como el aire. Matemáticamente, el FSPL se define como:

$$FSPL = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (3.7)$$

donde f es la frecuencia en hertz de la señal, d es la distancia desde el transmisor (en el caso de señales WiFi corresponde al Access Point) en metros y c es la velocidad de la luz en el vacío.

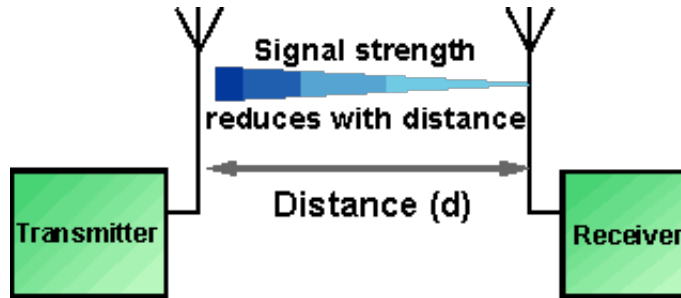


Figura 3.6: Representación gráfica de FSPL.

La ecuación 3.7 se puede expresar de forma conveniente en términos de decibeles, esto es:

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - K \quad (3.8)$$

donde K es una constante que depende de las unidades que se expresan las variables d y f . Para d y f en metros y megahertz, respectivamente, la constante K toma el valor de $-27,55$.

Finalmente, de la ecuación 3.8 se obtiene que la distancia desde el receptor al transmisor de la señal es:

$$d = 10^{\frac{1}{20}(27,55 - 20\log(f) + FSPL)} \quad (3.9)$$

3.3.2.2. Bluetooth - Beacons

Bluetooth ([Prabhu y Reddi, 2004](#)) es un estándar de comunicación inalámbrica que permite la comunicación entre diversos dispositivos con una conexión estándar de ondas de radio inalámbricas de corto alcance usando la banda de 2.4 GHz. Las ventajas de Bluetooth es que posee una arquitectura de baja complejidad pero a la vez robusta, de bajo consumo, de bajo costo, además permite la transmisión de voz y datos, y la accesibilidad de una conexión a Internet de manera local. Se estima que en el año 2016 había más de 4 mil millones de dispositivos activos con Bluetooth ([Powell, 2014](#)).

El funcionamiento para el estándar Bluetooth consiste en dividir la banda de frecuencia de 2,4 GHz en 79 canales distintos de 1 Mbps. Luego, transmite la señal utilizando una secuencia de canales conocidos por ambos puntos de la conexión. Con el fin de evitar posibles interferencias con otros dispositivos que usan la misma frecuencia en su señal, el estándar Bluetooth cambia de canal a un ritmo de 1600 veces por segundo.

El modo de operación entre dos dispositivos conectados mediante Bluetooth está basado en el concepto de maestro/esclavo.

En el año 2010 se establecieron los estándares para el Bluetooth 4.0, conocido como Bluetooth Low Energy ([Decuir, 2010](#)). Este estándar incluye al clásico Bluetooth, a Bluetooth de alta velocidad y los protocolos de bajo consumo. Además, está ideado para el *Internet de las cosas* ([Atzori et al., 2010](#)) (IoT, por sus siglas en inglés).

Una de las grandes ventajas del Bluetooth 4.0 es su amplio rango de aproximadamente de 150 metros en un campo abierto, además de un consumo máximo de 15mA siendo que el Bluetooth clásico consume en promedio 25mA ([Decuir, 2010](#)). Además posee la ventaja de que está enfocado para el envío y recibo de pequeños datos de información que pueden gatillar eventos locales dentro del dispositivo. En este estándar los dispositivos conectados no necesariamente están conectados por el modelo maestro/esclavo, por lo que un dispositivo con Bluetooth 4.0 puede emitir información libremente que uno o

más clientes pueden leer sin problema alguno, dando la posibilidad de dar información única a cada dispositivo que conecte.

Entre los dispositivos con tecnología Bluetooth 4.0 que destacan son los denominados *Beacons* (Bfonics, 2010). Éstos son dispositivos de bajo consumo que emite una señal del tipo *broadcast* con un reducido tamaño del orden de 5 a 10 centímetros. Dado que poseen el estándar de Bluetooth 4.0 tienen la capacidad de transmitir mensajes directamente a un dispositivo sin la necesidad de una sincronización previa.



Figura 3.7: Beacon de la empresa Estimote.

Cada dispositivo Beacon posee una serie de características técnicas, entre las cuales destacan:

- **Potencia de Transmisión (Tx Power):** Los beacons transmiten una señal con una potencia constante (Tx Power). A medida que la señal se aleja del beacon va decayendo su valor. El valor Tx Power es inversamente proporcional a la distancia y directamente proporcional al consumo de batería.
- **Intervalo de emisión (Advertising Interval):** Es la frecuencia que un beacon emite una señal. El estándar común es de 100ms. Entre más alto el intervalo de emisión, menos batería consumirá, pero la capacidad del receptor disminuye.

Usando esta tecnología es posible saber la posición relativa de un dispositivo que cuente con Bluetooth 4.0 mediante la trilateración. Dado que cada beacon emite una señal Tx Power que va decayendo con la distancia, es posible determinar la distancia aproximada desde el dispositivo que recibió la señal y el Beacon, además de contar con

la lectura del valor RSSI, que corresponde al indicador de fuerza de señal recibida que indica la intensidad recibida. Matemáticamente, esto queda expresado como:

$$d = 0,89976 \cdot \left(\frac{RSSI}{txPower} \right)^{7,7095} + 0,111 \quad (3.10)$$

donde d es la distancia entre el Beacon y el dispositivo móvil y las constantes 0,89975, 7,7095 y 0,111 son valores obtenidos luego de hacer el mejor ajuste de curva de datos experimentales ([Dong y Dargie, 2012](#))

3.3.2.3. RFID

El sistema de Identificación por Radiofrecuencia (RFID, por sus siglas en inglés) es un método de identificación que almacena y recupera información de manera remota. El propósito fundamental de la tecnología RFID es transmitir el número de identificación (*tag* o etiqueta) mediante ondas de radiofrecuencia.

Dentro de los sistemas RFID es posible identificar tres grandes componentes ([Núñez Sobrino, 2009](#)):

1. Un lector de etiquetas (*tag*): Artefacto que tiene una o más antenas de instalación, que pueden ser fijas o móviles, que emiten y/o reciben ondas de radio que activan una etiqueta en el campo de lectura lo que provoca que ésta refleje su información al lector.
2. Una base de datos: Dentro de un ordenador se almacena y trabaja los datos leídos
3. Un transpondedor: tag electrónico que se compone de un microchip y de una antena. El microchip puede ser leído y escrito de manera remota a través de ondas de radio usando la antena que forma el RFID. Estos microchips son regrabables por lo que permiten modificar su información sin límites.

En esta solución se identifica dos categorías de RFID: Pasivo y Activo.

Los tag RFID pasivos funciona mediante un lector RFID que envía ondas de radiofrecuencia a un chip o tag adherido al objeto que se desea identificar despertándolo para que transmita de vuelta al lector un código digital único grabado en su memoria. La forma más común de tag es una etiqueta de plástico o papel que se simplemente se adhiere al objeto. Todos los tag tienen un chip electrónico conectado a una antena generalmente impresa sobre una lámina de plástico. Este conjunto se llamado inlay RFID y se provee con o sin adhesivo. Este tipo de tag se conoce como tag pasivo porque no requiere baterías para funcionar. Dependiendo del tamaño de la etiqueta, específicamente la antena del tag y la potencia del lector RFID, el alcance puede variar entre unos algunos centímetros y poco más de 10 metros.

Los tag pasivos puede clasificarse en distintos tipos de acuerdo a su frecuencia de operación como se aprecia en tabla 3.1.

Tabla 3.1: Descripción de tipos de RFID pasivos.

Tipo	LF	HF	UHF
Frecuencia	125 kHz	13.5 MHz	915 MHz
Estándar	ISO11784/785	ISO15693, Mifare	ISO18000-6B/6C, EPC C1G2
Escritura	Sí	Sí	Sí
Alcance	<2.0 m	<1.0 m	>3.0 m
Aplicaciones	Identificación de animales, control de acceso	Monedero, Pasaporte, Tarjeta BIP, control de acceso	Logística, Retail, Caja, Pallet, Identificación de vehículos
Memoria	Identificación única	Identificación única, 4 kB	96 bit, 512 bit
Entorno Metálico	Sí	Sí	No
Penetración Líquidos	Alta	Media	Baja
Velocidad de lectura	Baja	Media	Alta
Lectura múltiples tag	Limitado	50 / s	>500 / s

Un tag activo en cambio, requiere una batería u otra fuente de energía propia y simplemente transmite una identificación a intervalos regulares, típicamente cada 10 segundos. En condiciones normales una pila pequeña, de tipo reloj, dura 5 años o más. La capacidad de almacenamiento de datos y el alcance son mucho mayores, varios kilobytes y 100 metros o más, respectivamente.

El funcionamiento de estos componentes funciona de la siguiente manera (Núñez Sobrino, 2009): El lector envía ondas de radiofrecuencia a los tags que hay presentes y éstos los captan a través de su antena interna; estas ondas activan al microchip interno que a través de la micro antena y la radiofrecuencia devuelven (sistema pasivo) o emiten (sistema activo) una señal al lector indicando cuáles son sus valores que están almacenados en su identificador interno.

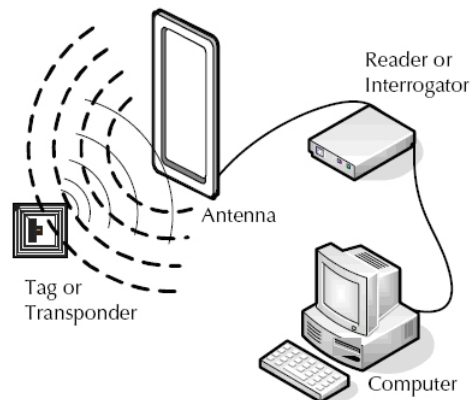


Figura 3.8: Funcionamiento de un sistema RFID.

A diferencia de las tecnologías señaladas anteriormente, el posicionamiento por RFID se hace mediante la identificación de posicionamiento por cercanía a un sensor RFID. Esto es, que el sistema detecta que cerca de un cierto sensor RFID está presente el objeto en cuestión, por lo que se manda una señal al sistema dando el aviso de que se detectó dicho objeto. Luego, al tener los sensores RFID en posiciones conocidas de antemano es posible saber en qué posición aproximada está el objeto con sólo identificar qué sensor fue el que reconoció dentro de su radio de operación al objeto en cuestión. No obstante, esto sólo puede funcionar si el objeto que se desea conocer la posición

posee un transpondedor.

3.3.2.4. Localización por Magnetismo

La localización por Magnetismo ([Chung et al., 2011](#)) está basado en el campo magnético terrestre. Cada pieza de metal dentro de un edificio, como pilares o vigas, interfiere de manera única con el campo magnético de la Tierra por lo que es posible generar distintos patrones irrepetibles en el campo magnético en el que estamos sumergidos, por lo que basta tener una brújula programada de tal manera que permita detectar estas variaciones magnéticas generadas por los metales interiores y establecer una posición relativa con una precisión entre 10 centímetros y 2 metros.

Una ventaja de este método de localización es que no requiere la instalación de ningún componente físico dentro del espacio donde se quiere realizar la localización. Lo único que se necesita es un sensor magnético (presente prácticamente en cualquier smartphone).

La desventaja de este sistema es que se requiere previamente mapear el edificio completo y junto con todas sus dependencias para generar la base de datos con todas las interferencias detectadas, además de una conexión activa a Internet para subir y/o bajar la información de los servidores donde se encuentran estos mapas generados por este paso previo a la localización.

Un sensor magnético (presente en prácticamente cualquier smartphone) compara el campo magnético terrestre de la ubicación del usuario con una base de datos en la nube y registran en qué punto se encuentra.

Capítulo 4

Diseño del Estudio

El fin de la presente memoria es comprobar empíricamente qué tecnología de posicionamiento es más preferible que por sobre otras desde el punto de vista de la eficiencia, costo de implementación, entre otros. La motivación de este estudio es realizar una investigación que ponga a prueba en condiciones reales la factibilidad y operancia de cada tecnología que permite la geolocalización en ambientes interiores. Además, estudiar las técnicas y algoritmos de localización es importante a la hora de obtener los mejores resultados posibles.

En este capítulo se realizará una descripción de las tecnologías y elementos utilizados en el estudio, tanto hardware como software, y se detallará el estudio en sí.

4.1. Cualidades y costos de tecnologías

Por temas de factibilidad operacional se hará un análisis de las características y atributos que posee cada tecnología con el fin de facilitar la toma de decisiones con respecto a la elección final para el posicionamiento.

Los parámetros a escoger serán los siguientes: costos de infraestructura, consumo, factibilidad operacional y, si es que hay, rango de señal.

4.1.1. Wi-Fi

Los dispositivos que poseen la capacidad de proveer señal Wi-Fi son los llamados Access Point. En el mercado hay tantos según los gustos y necesidades del comprador, variando cada uno en diversos parámetros técnicos como la cantidad de estándares inalámbricos IEEE 802.11 que cumple (b, g, n, ac), cantidad y tipos de antenas, sensibilidad de la señal, potencia de salida, peso y dimensiones, etc.

Los rangos de precios varían en el mercado, pero es posible encontrar Access Points desde CLP\$17.990⁴- que corresponde al modelo TPLink N150 TL-WA701ND- hasta los CLP\$315.790⁵- correspondiente al modelo Ubiquiti AC1300 UAP-AC.

El rango de la señal Wi-Fi que emite un Access Point varía significativamente de dispositivo a dispositivo. Los principales factores que determinan el rango de un Access Point son: el protocolo específico IEEE 802.11 que ejecuta, la fuerza del transmisor, posibles obstrucciones físicas y/o radio interferencia en el área cercana al Access Point. La distancia a la que alguien puede conectarse a un Access Point varía dependiendo de la orientación de la antena. Por ejemplo, los usuarios de smartphones en particular, pueden ver su fuerza de conexión que aumenta o disminuye simplemente girando el dispositivo en ángulos diferentes. Además, algunos Access Point utilizan antenas direccionales que permiten un alcance más largo en áreas que la antena está apuntando, pero un alcance más corto en otras áreas.

⁴Revisado en PC Factory el día 26 de mayo de 2017

<https://www.pcfactory.cl/producto/10725-Access.Point.2.4.GHz.N150.TL-WA701ND>

⁵Revisado en PC Factory el día 26 de mayo de 2017

<https://www.pcfactory.cl/producto/17597-Access.Point.Dual-Band.PoE.AC1300.UAP-AC>

En la tabla 4.1, elaborado por el sitio web especializado Gecko&Fly⁶ se muestra las distancias según el estándar 802.11.

Tabla 4.1: Rango de señal Wi-Fi según el protocolo 802.11.

Protocolo 802.11	Frecuencia [GHz]	Banda ancha [MHz]	Rango indoor aproximado [m]	Rango outdoor aproximado [m]
a	3.7/ 5	20	35	120
b	2.4	20	35	140
g	2.4	20	50	140
n	2.4/5	20 - 40	70	250
ac	5	20/40/80/160	35	-

Hoy en día, prácticamente la mayoría de los Access Point a la venta cumplen con el estándar 802.11g y 802.11n por lo que el rango aproximado es de 50 a 70 metros en ambientes interiores y 140 a 250 metros en el exterior. Este último toma en cuenta ambientes donde no hay interferencia alguna provocada por infraestructura tales como murallas u otros objetos presentes.

Con respecto al consumo, éste varía nuevamente según cada dispositivo. No obstante, la potencia promedio varía entre 5[W] a 10[W], por lo que asumiendo una potencia promedio de 7,5[W] conectado las 24 horas, se tiene que consume 5,4[kWh] de energía durante un mes de 30 días. Según la distribuidora de energía eléctrica Enel⁷, el valor del kWh es de CLP\$112,36, por lo que al mes cada dispositivo gasta aproximadamente CLP\$607.

Para la factibilidad operacional no presenta problemas dado lo masivo que es este dispositivo y la facilidad de manipularlos. Lo único que hay que tener en cuenta es que dado que necesita corriente constante, estos dispositivos deben estar conectados a una

⁶<https://www.geckoandfly.com/10041/wireless-wifi-802-11-abgn-router-range-and-distance-comparison>

⁷<https://www.eneldistribucion.cl/preguntas-frecuentes/valor-kwh>

red eléctrica por lo que a la hora de la posible instalación se debe tener en cuenta las ubicaciones de enchufes y/o realizar instalaciones eléctricas previas.

4.1.2. Bluetooth

Existen varios protocolos Bluetooth, no obstante el utilizado para la geolocalización es la versión Bluetooth 4.0, más conocido como BluetoothLE (Bluetooth Low Energy), que tiene la característica que posee la capacidad de emitir señales del tipo broadcast que resulta ideal para la finalidad de esta memoria.

Los dispositivos Bluetooth que cumplen este protocolo y que son usados para fines similares son aquellos denominados *beacons*. En los últimos años ha habido un auge en la comercialización de estos dispositivos debido a sus múltiples aplicaciones, la cual la más utilizada dentro del rubro del comercio y retail es la detección de proximidad a un dispositivo compatible con Bluetooth 4.0.

Los precios de cada dispositivo varían dependiendo de sus capacidades, las que principalmente dependen de la distancia de emisión de señal Bluetooth y la autonomía de la batería, además de otros tipos de sensores que puedan estar presentes tales como sensor de temperatura, NFC, etc. El rango de señal varía desde los 5-7 metros hasta los 200 metros dependiendo de las capacidades.





La empresa Estimote⁸ es la empresa líder en el rubro de beacons ya que es la que más tipos de beacons vende, provee de un completo SDK, posee una gran comunidad de desarrolladores muy activa y ha sido premiada por diversos medios especializados.

En la tabla 4.2 elaborado por Estimote⁹ se muestran los detalles de los diferentes dispositivos que poseen a la venta.

⁸<https://estimote.com/>

⁹<https://estimote.com/#get-beacons>

Tabla 4.2: Características de productos ofrecidos por Estimote.

	 Locación	 Proximidad	 Sticker	 Video
Vida útil batería	Hasta 5 años	Hasta 2 años	Hasta 1 año	- (conectado por USB)
Rango	Hasta 200 metros	Hasta 70 metros	Hasta 7 metros	Hasta 10 metros
Grosor	24 mm	17 mm	6 mm	14 mm
Paquetes adicionales	Conectividad, telemetría, definido por usuario	Conectividad, telemetría,	Conectividad, nearable con telemetría	Conectividad, telemetría, definido por usuario
Sensores integrados	Movimiento, temperatura, luz ambiental, magnetómetro, presión	Movimiento, temperatura	Movimiento, temperatura	-
Tecnologías adicionales	Redes tipo malla, GPIO, RTC, LED, 1Mb EEPROM, NFC programable	NFC programable	-	WiFi, HDMI, USB, 1GB eMMC
Dispositivos en el kit	3 beacons	3 beacons	10 stickers	3 mirrors
Precio	USD\$99	USD\$59	USD\$99	USD\$99

Los beacons del tipo *Proximidad* son los más comunes dentro del mercado ya que poseen una buena relación precio/calidad y con ellos es posible realizar múltiples aplicaciones sin mayor costo. En todas las empresas especializadas del rubro de beacons cuentan con precios similares para este tipo de dispositivo.

Como los dispositivos beacons usan baterías internas intercambiables, no hay que contar con una instalación eléctrica previa como el caso de Access Point señalados en el punto anterior, por lo que su instalación es bastante sencilla. Las baterías que usan corresponde a pilas de litio del tipo CR2450. Estas pilas son 3 volt y cuentan con una capacidad de 620 mAh. En el mercado tienen como precio aproximado de CLP\$5.000 a CLP\$6.000 cada una. Tomando en cuenta que la duración de un beacon del tipo *Proximidad* es de 2 años, es posible calcular el gasto mensual con respecto a la batería con el fin de comparar con otras tecnologías. Esto da un valor aproximado mensual de CLP\$250 por dispositivo.

Los beacons poseen la gran ventaja que, al no necesitar una fuente de alimentación externa, son de fácil instalación. Sólo basta con adherir un beacon a una superficie dada. Además no necesitan una instalación previa para la mayoría de los casos por lo que es prácticamente "llegar y utilizar" (*Plug & Play*).

4.1.3. RFID

Como fue señalado en el capítulo 2, la tecnología RFID consta de tres grandes componentes para su funcionalidad: un lector de etiquetas (tag activo), una base de datos y un transpondedor (tag pasivo). Para este último, tal como lo señala la tabla 3.1 hay tres categorías: LF, HF y UHF.

Dado que los RFID del tipo UHF poseen un alcance superior a los dos metros, este tipo es el mejor candidato para usar en el posicionamiento indoor.

Según el blog RFID Insider, de Atlas RFID Store¹⁰, en todo sistema RFID UHF hay cuatro componentes básicos (cinco, si consideramos el sistema de base de datos):

- Lector RFID

¹⁰<http://blog.atlasrfidstore.com/basics-of-uhf-passive-rfid-tags>

- Cable de conexión
- Antena
- Tag RFID pasivo

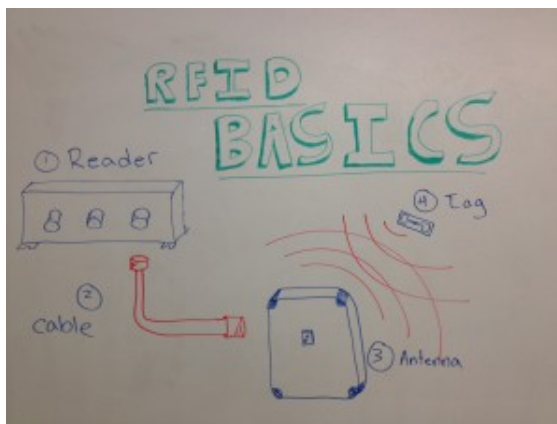


Figura 4.1: Componentes básicos del RFID UHF. Fuente: RFID Insider.

Por lo que para ver la factibilidad de esta tecnología para el posicionamiento hay que considerar estos cuatro elementos.

El precio de los lectores RFID UHF varía según su ratio máximo de lectura (tags por segundo), cantidad de puertos para antenas, dimensiones, etc. No obstante, los precios superan los USD\$450 para modelos de una entrada de antena. Por ejemplo, el lector con tres entradas de antenas de menor precio en Atlas RFID es el modelo Thingmagic Vega Ruggedized RFID Reader que tiene un precio de USD\$795¹¹.

A esto hay que sumarle el valor de cada antena. Para una antena con rango de recepción de 9 metros, el precio es de USD\$79¹².

Para conectar cada antena a un lector RFID es necesario contar con cables de conexión. El precio varía principalmente según el largo del cable, no obstante el precio ronda acerca de USD\$39 a USD\$114 para un largo de 2 a 10 respectivamente.

¹¹<https://www.atlasrfidstore.com/thingmagic-vega-ruggedized-rfid-reader/>

¹²<https://www.atlasrfidstore.com/laird-pa9-12-lp-outdoor-rfid-antenna-fcc/>

Finalmente se tiene el costo de cada Tag RFID pasivo. El precio por cada tag pasivo ronda entre USD\$0,50 a USD\$2.

Cada lector RFID tiene una potencia aproximada de 10[W] a 15[W], por lo que asumiendo una potencia de 12,5[W] estando cada uno conectado las 24 horas, se tiene que consume 9[kWh] de energía durante un mes de 30 días. Según la distribuidora de energía eléctrica Enel, el valor del kWh es de CLP\$112,36, por lo que al mes cada dispositivo gasta aproximadamente CLP\$1.011.

Para la factibilidad operacional hay que tener en cuenta ciertos detalles. El posicionamiento por RFID no es mediante trilateración, como sí lo es Wi-Fi y Bluetooth. Lo anterior provoca que la cantidad de antenas (y por consiguiente lectores RFID) dependa del grado de precisión que se requiera. Por ejemplo, si se requiere conocer la posición con un margen de error de 3 metros es necesario contar con antenas separadas a esta distancia por todo el lugar donde se desea determinar la localización, por lo que el costo aumenta considerablemente. Además hay que contar con un servidor central que monitoree y mapee todas las antenas por lo que también implica un costo adicional, aparte de la instalación apropiada tanto eléctrica como estratégica de estos dispositivos.

4.1.4. Localización por magnetismo

La localización por magnetismo aprovecha la intervención única que cada elemento de metal, como una viga o pilar, interactúa con el campo magnético terrestre. Para ello es necesario contar con una base de datos en un servidor central que mapee todas estas intervenciones causadas por los elementos metálicos presentes.

La gran desventaja de este tipo de localización es que su efectividad depende exclusivamente de componentes metálicos que puedan existir en el lugar, por lo que en ambientes tales como túneles mineros o ciertos estacionamientos subterráneos donde no hay una abundancia de metales puede presentar grandes problemas a la hora de

geolocalizarse.

4.1.5. Resumen de tecnologías

En la tabla 4.3 se resumen los costos y rangos de alcance de las tecnologías anteriormente descritas. Como fue descrito anteriormente, la localización por magnetismo no presenta costos asociados, pero sí depende fuertemente del lugar a localizarse por lo que su real efectividad se ve mermada a la hora de hacer decisiones de qué tecnologías usar, es por esto que se omite de la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Resumen de costos de tecnologías de posicionamiento.

Tecnología	Rango por dispositivo	Costo unitario	Costo mensual unitario
Wi-Fi	50 (802.11g) a 70 metros (802.11n)	Desde CLP\$17.990	CLP\$607
Bluetooth	70-200 metros	Desde CLP\$13.223* [†]	CLP\$250
RFID	Desde 5 metros	Desde CLP\$382.242* [‡]	CLP\$1.011

Si bien, tanto Wi-Fi como Bluetooth necesitan de al menos tres dispositivos para poder usar la trilateración con un costo total mínimo desde los CLP\$53.970 y CLP\$39.669 respectivamente, es inmensamente menor que el costo asociado para posicionamiento por RFID.

Dado el alto costo que entrega RFID se descarta de lleno usar esta tecnología para el estudio de la presente memoria.

Con respecto al uso de localización por magnetismo también se descarta para el presente uso, debido al lugar de realización del estudio que se detallará más adelante.

Finalmente, se harán pruebas usando dos tecnologías de posicionamiento: Wi-Fi y

*Dólar observado al día 2 de junio de 2017: CLP\$672,37. Fuente: Banco Central de Chile.

[†]Dado que se venden por paquetes de tres unidades, el monto mostrado es la división del total en tres.

[‡]Incluye lector RFID de una antena, una antena de recepción de 9 metros, cable de 2 metros y un RFID pasivo.

Bluetooth.

4.2. Lugar del estudio

Para comparar tecnologías en cuanto a costo/beneficio, se procedió a realizar distintas pruebas en un ambiente que sea propicio y que tenga características similares a ubicaciones donde pueda encontrarse los problemas de posicionamiento sin la tecnología GPS.

Para ello se eligió el estacionamiento subterráneo del Campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María, ubicado en Vicuña Mackenna 3939, comuna San Joaquín. Este espacio cuenta con 143 espacios para el estacionamiento de autos repartidos en una área de 144,75 metros por 36 metros, es decir, un área de 5.211 metros cuadrados.

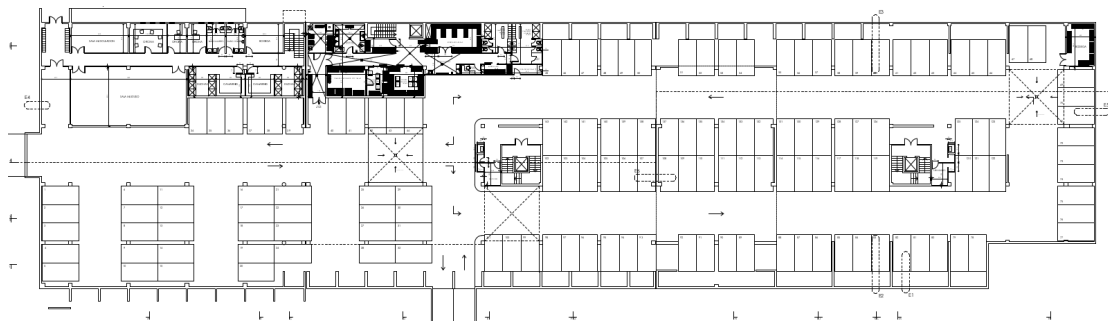


Figura 4.2: Plano del lugar de experimentación.

Este estacionamiento está formado en su mayoría por pilares de cemento por lo que al no haber una cantidad considerable de elementos metálicos como vigas se descartó el uso de localización por magnetismo.

4.3. Diseño de la Aplicación

Para hacer el estudio entre las tecnologías seleccionadas se construyó una aplicación en Android aprovechando que tiene ambas tecnologías en prácticamente cualquier teléfono móvil inteligente con este sistema operativo.

Android¹³ es un sistema operativo de fácil acceso y de libre desarrollo, ya que no requiere pagos extras por el derecho de ser desarrollador ni máquinas especiales requeridos, como otros sistemas operativos móviles.

La aplicación permite visualizar el mapa de experimentación y sobre éste mostrar en qué punto se encuentra el usuario empíricamente usando los algoritmos de localización. Además, para calcular los errores porcentuales, también se debe dar la opción de agregar un marcador donde se encuentra el usuario en forma real con el objetivo de que por cada periodo de tiempo calcule la distancia entre el marcador del usuario real y el marcador del posicionamiento calculado. Luego, en base a estas mediciones se procede a obtener las conclusiones apropiadas para finalmente dar un veredicto.

Para cumplir con la finalidad de esta memoria es que la aplicación en cuestión debe cumplir ciertas tareas o requerimientos funcionales tales como:

1. La aplicación debe mostrar el plano de la ubicación.
2. La aplicación debe permitir al usuario colocar marcadores de dispositivos Bluetooth o Wi-Fi.
3. La aplicación debe calcular la posición del usuario independiente del tipo de los dispositivos utilizados.
4. La aplicación debe permitir al usuario agregar un marcador de la ubicación real.

¹³<https://www.android.com/>

5. Si es que el usuario agregó un marcador de la ubicación real, la aplicación debe calcular la distancia entre éste y el marcador de la ubicación calculada.
6. La aplicación debe registrar las distancias en un archivo persistente.

Capítulo 5

Implementación y ejecución del estudio

5.1. Software utilizado

Una vez establecidas cuáles son los requerimientos, se procedió a la construcción de la aplicación móvil.

Para el desarrollo se usó el software Android Studio¹⁴ en su versión 2.3.1, IDE oficial para el desarrollo de aplicaciones en Android, basado en el IDE IntelliJ IDEA de JetBrains¹⁵ y publicado de forma gratuita a través de la Licencia Apache 2.0. Además, se usó el SDK de Android versión 24 que corresponde a la versión de Android 7.0 (Android Nougat).

Para el correcto desarrollo se requirió el uso de librerías externas. Éstas son:

- Google Play Services¹⁶ Requerido para la integración de mapas usando Google

¹⁴<https://developer.android.com/studio/>

¹⁵<https://www.jetbrains.com/idea/>

¹⁶<https://developers.google.com/android/guides/setup/>

Maps.

- Android Google Maps API v2 Add-ons¹⁷ Librería que extiende funcionalidades de Google Maps. Usado para el uso de mapas personalizados como el plano del estacionamiento.
- Bluetooth LE Library para Android¹⁸ Útil para el trabajo con dispositivos con Bluetooth 4.0 (o Bluetooth LE) como el caso de los dispositivos Beacons.
- OpenCSV¹⁹ Dado que se tienen que almacenar las distancias, se eligió hacerlo mediante archivos CSV (*Comma-Separated Values*, por sus siglas en inglés) por lo que esta librería facilita el trabajo con este tipo de archivos.

Para el primer requerimiento señalado en el punto anterior, se usó el software MapTiler²⁰ que permite convertir archivos de imagen o documento a archivos `.mbtiles` que es el formato estándar de archivos de almacenamiento de capas de mapas. Luego usando la primeras dos librerías señaladas se pudo incrustar el plano a la aplicación. Las imágenes de la figura 5.1 muestra el plano del lugar de prueba en la aplicación, por lo que el primer requerimiento se cumplió a cabalidad.

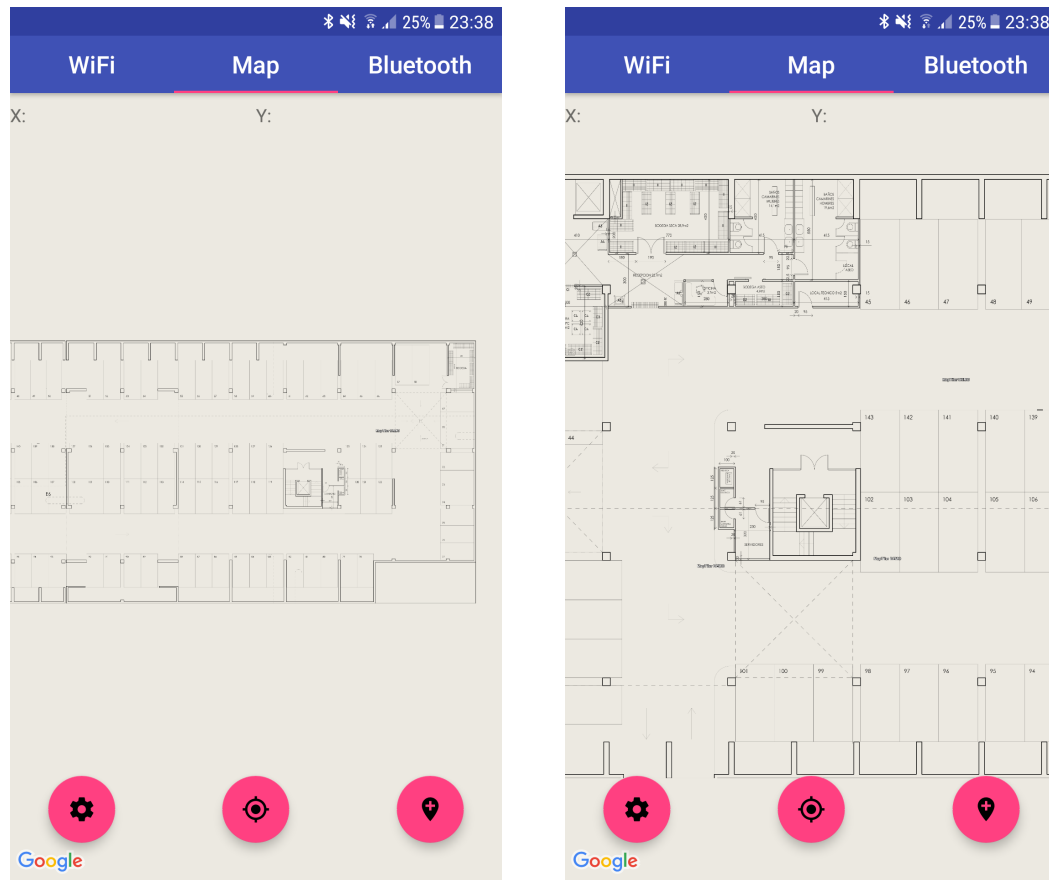
Como sistema de referencia se usó el sistema cartesiano usando la escala 1:1, es decir, el origen del sistema está en la esquina inferior izquierda del plano y la esquina superior derecha del plano corresponde al punto (144.75, 36) que corresponden a los valores del largo y ancho en metros, respectivamente, de éste.

¹⁷<https://github.com/cocoahero/android-gmaps-addons>

¹⁸<https://github.com/alt236/Bluetooth-LE-Library---Android>

¹⁹<http://opencsv.sourceforge.net/>

²⁰<https://www.maptiler.com/>

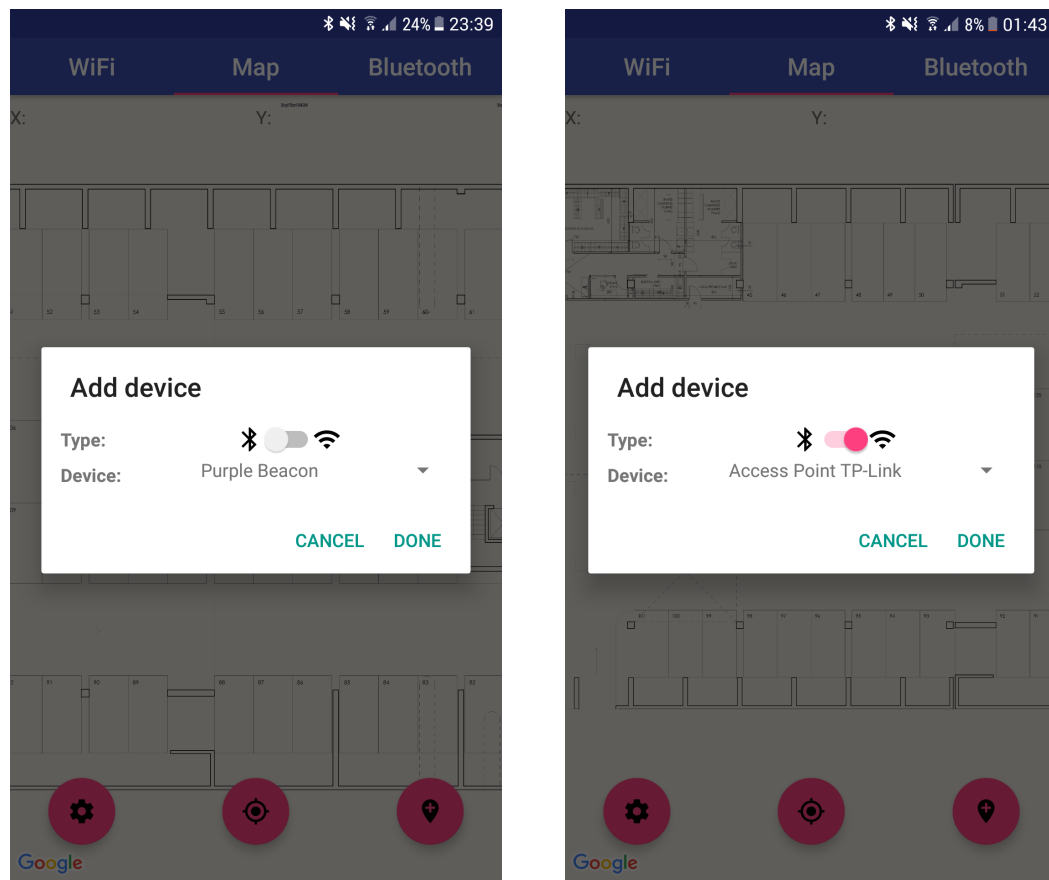


(a) Mitad del plano del estacionamiento.

(b) Parte central del plano.

Figura 5.1: Plano del estacionamiento en la aplicación.

Luego, tal como dice el segundo requerimiento, el sistema debe permitir que el usuario pueda ingresar dispositivos Bluetooth o Wi-Fi. Para ello, se representó estos dispositivos como marcadores dentro del Google Map con el fin de que puedan arrastrarse dentro del mapa, clicar y/o eliminar a voluntad.



(a) Dispositivo Bluetooth.

(b) Dispositivo Wi-Fi.

Figura 5.2: Agregando dispositivos.

La figura 5.2 muestra el cuadro que permite especificar qué tipo de dispositivo se desea agregar. Cuando se elige el tipo el sistema muestra una lista de dispositivos previamente registrados en la aplicación. Una vez añadidos al mapa, al ser representados mediante marcadores, es posible asignar a cada uno de éstos textos personalizados. Para este trabajo se usó una breve descripción mostrando el nombre, las posiciones x e y en metros, el tipo de dispositivo y su dirección MAC; tal como lo muestra la figura 5.3.

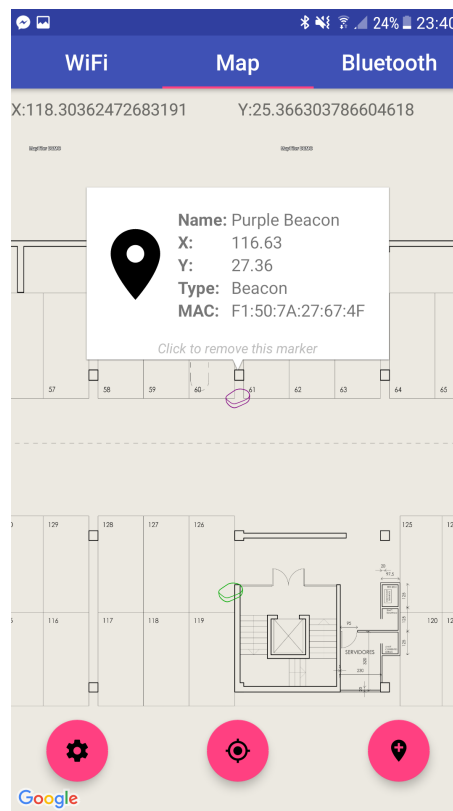


Figura 5.3: Descripción del dispositivo seleccionado.

El tercer requerimiento es permitir calcular la posición del usuario identificando previamente si los dispositivos agregados al mapa son Bluetooth o Wi-Fi ya que cada uno usa diferentes métodos para este cálculo.

Para identificar la posición es necesario conocer la distancia de al menos tres dispositivos debido a la trilateración. Si es que los dispositivos son del tipo Wi-Fi, es decir, son Access Point, el sistema calcula la distancia del usuario a un dispositivo usando la ecuación 3.9 usando los valores leídos de la frecuencia y el valor de FSPL. En cambio, para el caso de dispositivos Bluetooth, el sistema obtiene la distancia desde el usuario hasta un beacon usando la ecuación 3.10 a través de las lecturas de los valores de RSSI y txPower.

Debido a que es común la presencia de otros artefactos que puedan emitir señal

Wi-Fi y/o Bluetooth es que dentro de la aplicación se identificó las direcciones MAC de aquellos dispositivos con los que se trabajará. Lo anterior es con la finalidad de recibir y calcular sólo las distancias de los dispositivos que se usarán para el posicionamiento.

Para el cálculo de la posición usando trilateración es que se necesita definir las distancias entre los dispositivos agregados. Usando como referencia la figura 3.4, es necesario establecer las distancias d , i y j . Para ello una vez que se ingresan los marcadores el sistema calcula automáticamente estas distancias. De todas formas se habilitó un menu flotante para el ingreso manual de estos valores, tal como indica la figura 5.4.

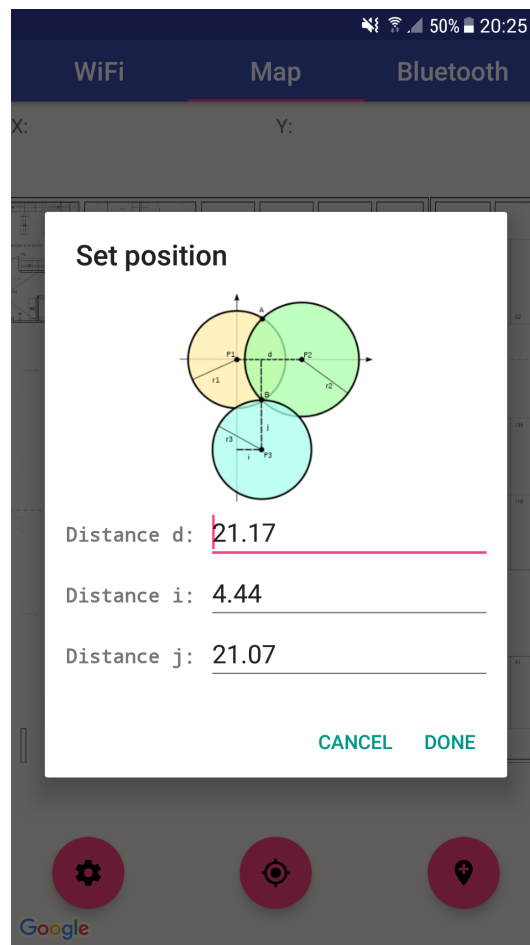


Figura 5.4: Ingreso de distancias entre Access Points o Beacons.

Luego, una vez establecidas las distancias entre dispositivos e identificadas las

distancias a los Access Points o Beacons registrados, se usa las ecuaciones 3.4 y 3.5 para obtener las coordenadas x e y respectivamente. Se usó un marcador con forma de una silueta de una persona transparente con un símbolo de localización en la parte inferior para identificar la posición calculada dentro del mapa. La figura 5.5 representa el marcador de la posición obtenida. Este marcador se moverá dentro del plano dependiendo de la posición que calcula el mapa en cada instante. Dentro de la aplicación se configuró para que se obtenga la distancia cada vez que actualiza los valores de distancia entre el usuario y los dispositivos registrados.

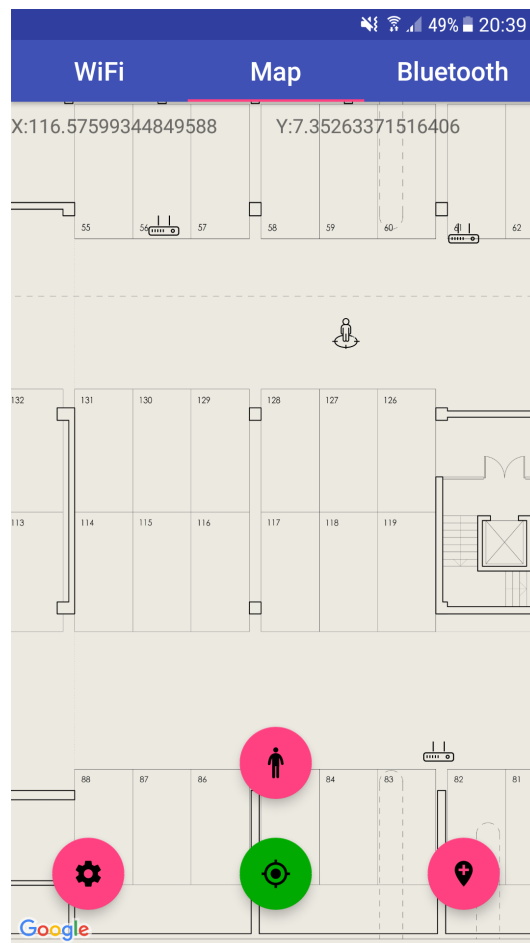


Figura 5.5: Pantalla de la aplicación que representa que la ubicación está activa.

La figura 5.5 muestra que el botón central de localización cambió de color de un fondo rosado a uno verde, simbolizando que la localización del usuario está activa.

Además, al estar activa la localización, el sistema muestra un nuevo botón en la parte superior al botón antes mencionado que permite el ingreso de un marcador que representa la ubicación real del usuario. Esto permite la realización del cuarto requerimiento. Si se selecciona este botón aparecerá un marcador simbolizado con una silueta de fondo negro de una persona. Este marcador debe ser arrastrado manualmente dentro del mapa a la posición real del usuario.

Lo anterior tiene como finalidad calcular la distancia entre el marcador de la ubicación real y aquella calculada por el sistema, y así cumplir con el quinto requerimiento. Esto queda representado por la figura 5.6.

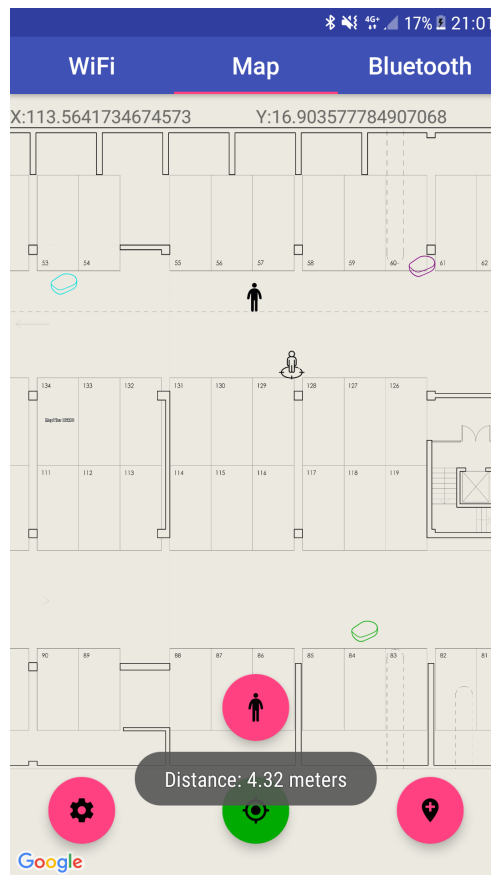


Figura 5.6: Distancia entre la posición real y calculada.

Finalmente, para el sexto y último requerimiento, el sistema registra en un archivo

CSV las distancias entre la ubicación real y la ubicación calculada. Estas distancias son registradas en cada momento en que el sistema actualiza la posición calculada. Para esto, el sistema registra este valor usando el siguiente formato: Timestap, tipo de dispositivo (Wi-Fi/Bluetooth), posición calculada (x_c, y_c) , posición real (x_R, y_R) y distancia entre posiciones.

El objetivo de contar con estos registros es poder hacer un posterior análisis gráfico para facilitar la toma de decisión y realizar las conclusiones pertinentes.

5.2. Hardware utilizado

Para llevar a cabo el estudio se usaron tres Access Point y tres dispositivos Beacons. El detalle de estos dispositivos se señala a continuación.

Wi-Fi

En el caso de la geolocalización por Wi-Fi se usaron tres dispositivos marca Buffalo modelo AirStation WHR-HP-G54. Este modelo puede considerarse como básico debido a que sus especificaciones no son sobresalientes dentro del mercado. Un ejemplo de lo anterior es que sólo cumple hasta el protocolo 802.11g, que es considerado medianamente desfasado bajo los estándares actuales.

Sus especificaciones oficiales son las señaladas en la tabla [5.1](#).

Tabla 5.1: Especificaciones técnicas del modelo AirStation WHR-HP-G54

Frecuencia de señal	2.4 GHz (2400-2483 MHz)
Protocolos Wi-Fi	802.11b, 802.11 b/g, 802.11g
Dimensiones	28 x 130 x 144 mm
Peso	277 gramos
Temperatura operacional	0°C a 40°C
Máxima humedad operacional	80 %
Voltaje de entrada	5V
Consumo de potencia	Hasta 6.5 Watts
Potencia nominal de salida	19dBm (802.11b), 16dBm (802.11g)

No obstante, para el estudio se usaron antenas omnidireccionales distintas a las que venían de fábrica. La razón es para facilitar la extensión y la claridad de la señal que emite cada punto de acceso.

Las especificaciones de cada antena están presentes en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Especificaciones técnicas de antenas utilizadas

Modelo	TL-ANT2408CL
Frecuencia	2.4 GHz
Impedancia	50 Omnios
Rendimiento	8 dBi
Radiación	Omnidireccional
VSWR(MAX)	1.92:1
Ancho de Haz HPOL	360°
Ancho de Haz VPOL	15°
Temperatura de Operación	-40°C a 65°C
Humedad de Operación	Hasta 90 %

Bluetooth

Para el caso de dispositivos Bluetooth, se usaron tres dispositivos Beacons de tipo *Proximidad* de la empresa Estimote.

La tabla 5.3 muestran las características oficiales de este tipo de Beacon.

Tabla 5.3: Especificaciones técnicas de Beacon Estimote Proximity

Protocolo	Bluetooth 4.2 LE
MCU	ARM Cortex M0 32-bit, 256 KB flash, 64KB RAM
Frecuencia	2400 MHz - 2483.5 MHz
Rango	Hasta 70 metros
Sensibilidad	-96 dBm
N° de canales	40
Antena	PCB, Monopolo
Ganancia Antena	0 dBi
Sensores	Movimiento y temperatura
Alimentación	Pila de litio CR2450 de 3V reemplazable
Temperatura de Operación	0°C a 60°C
Humedad de Operación	Hasta 80 %
Dimensiones	55 x 38 x 18 mm
Peso	30 gramos

5.3. Consideraciones

Para el estudio se tomaron en cuenta una serie de consideraciones previas. Debido a que el trabajo de esta memoria consiste en el cálculo de la posición usando trilateración, se usó la mínima cantidad de dispositivos posibles que permiten utilizar esta técnica de posicionamiento. De esta manera no se pudo cubrir el área completa del estacionamiento

en cuestión, sino que sólo se trabajó en una sección de éste donde la señal que emitía cada dispositivo fuese leído en el smartphone de prueba. La principal razón de esto es por costos monetarios y por la facilitación de la aplicación realizada a la hora de hacer cálculos de posicionamiento.

Otra consideración importante previa a la experimentación es la instalación de los Access Points. Estos dispositivos necesitan una alimentación de corriente eléctrica por lo que su ubicación depende exclusivamente de la presencia de fuentes de electricidad que existan en el lugar de prueba. Para este caso, el lugar de prueba contaba con pocos enchufes por lo que hubo que posicionar estos puntos de acceso en base a estos enchufes mediante el uso de extensores de corriente como cables alargadores.

5.4. Ejecución

Antes de señalar cómo fue llevado a cabo la experimentación, es importante señalar cómo fue elaborado en grandes rasgos el algoritmo de localización. En vez de que la posición del marcador se actualizara cada vez que detectara un nuevo dato, lo que se hizo fue usar el método de mitigación llamado *ventana deslizante*, el que consiste en luego de cinco datos leídos la posición del marcador que señala la posición calculada dentro del mapa se actualizara usando el promedio de estos últimos cinco datos obtenidos. Lo anterior con el fin de mitigar en cierta forma la alta fluctuación de los datos. Como se explicará en la sección 6.2, el algoritmo de localización juega un papel importante a la hora de apaciguar la inestabilidad de los datos.

Debido a que uno de los principales factores de precisión y exactitud entre las tecnologías usadas en esta memoria es la distancia, es que se procedió a dividir la experimentación en distintas etapas basados en la distancia que existe entre el experimentador y los dispositivos que emiten las señales, ya sean los Beacon o Access Point.

Para esto se tomó en cuenta el área triangular formada por los tres dispositivos activos, tal como la muestra la figura 5.7. Las áreas de medición fueron $7,95[m^2]$, $25,09[m^2]$, $27,64[m^2]$, $84,52[m^2]$ y $118,37[m^2]$.

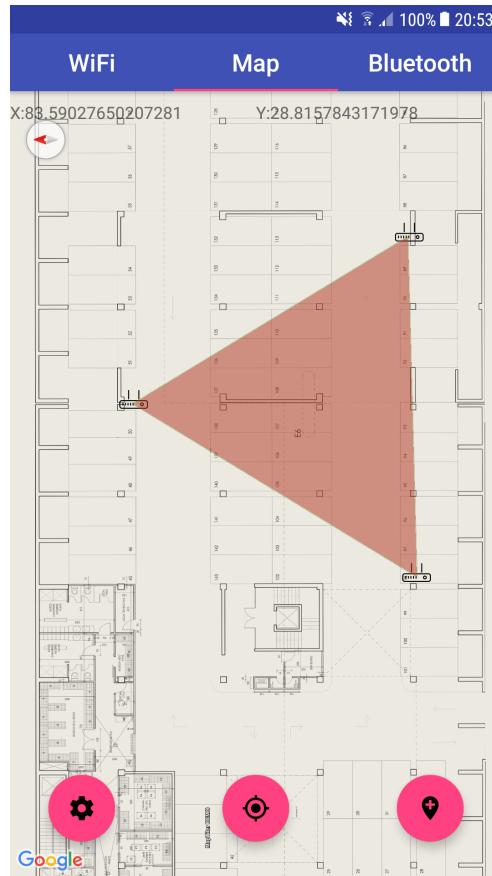


Figura 5.7: Referencia del área formada por la unión de los dispositivos.

Como fue mencionado anteriormente en el punto de Consideraciones, se escogió ubicar los dispositivos en una zona cercana a las tomas de corriente eléctrica debido a que los Access Point necesitan de alimentación externa ya que no poseen baterías internas como sí las poseen los Beacon. Debido a que el cable de alimentación de cada Access Point posee una corta longitud para efectos del posicionamiento de estos dispositivos, es que fue necesario contar con una serie de extensores o alargadores para poder ubicarlos correctamente.

El *modus operandi* de las mediciones fue la siguiente: primero se ubican los dispositivos en ciertas posiciones estratégicas dentro del plano; luego, con la aplicación se realizan los ajustes necesarios, esto es configurar los marcadores de los dispositivos dentro del mapa; y finalmente iniciar la localización estando el experimentador al centro geométrico aproximado del triángulo formado por los tres dispositivos activos en dicho instante. Dentro de cada toma de datos se obtuvo cerca de 200 mediciones en un tiempo aproximado de 2 minutos.

Capítulo 6

Resultados

6.1. Resultados obtenidos

Luego de la toma de datos en las distintas configuraciones antes señaladas, se procedió a procesar los datos obtenidos en un procesador de hojas de cálculo con el fin de obtener gráficos para una fácil visualización de los datos. Para ello, para cada toma de datos se produjo dos gráficos: el primero corresponde a un gráfico de dispersión que simula el plano cartesiano donde el origen de éste representa la posición real del usuario y el dato presente en el gráfico representa la posición calculada por el sistema; mientras que el segundo gráfico corresponde a un gráfico de líneas donde muestra cómo varía a lo largo del tiempo la diferencia en metros entre la posición real y la calculada por el sistema -que en el gráfico se muestra como *error*-. Los gráficos obtenidos se muestran a continuación.

Para el caso de la toma de datos con una configuración de área de $7,95[m^2]$ se obtuvo la figura 6.1.

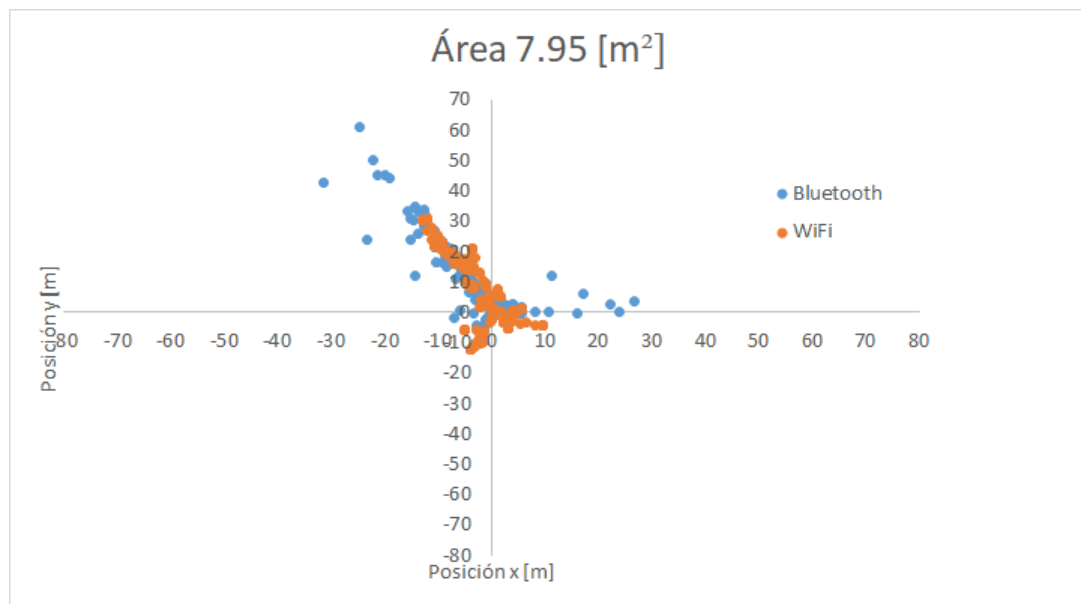


Figura 6.1: Posiciones relativas calculadas por el sistema para un área de $7,95[m^2]$

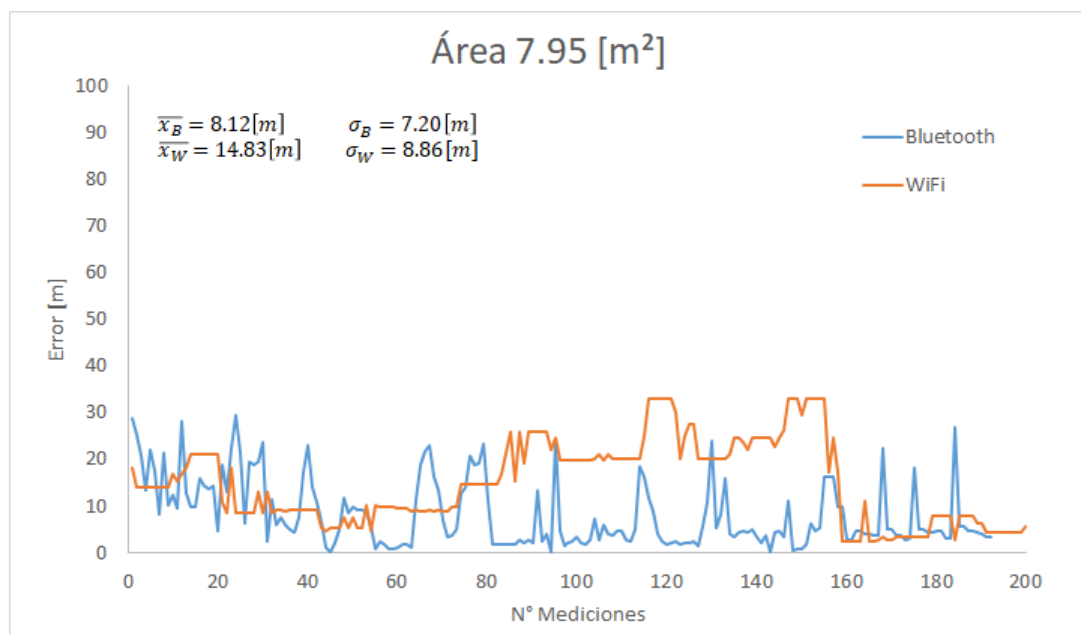


Figura 6.2: Errores de distancia para un área de $7,95[m^2]$

La figura 6.2 muestra el comportamiento de los datos en ambas tecnologías. El promedio de error en metros para Bluetooth es de $\bar{x}_B = 8,12[m]$ con una desviación estándar de $\sigma_B = 7,20[m]$, mientras que las mediciones hechas con WiFi poseen un

promedio de $\bar{x}_W = 14,83[m]$ y una desviación estándar de $\sigma_W = 8,86[m]$.

Luego, para la segunda configuración de experimentación se tiene la figura 6.3.

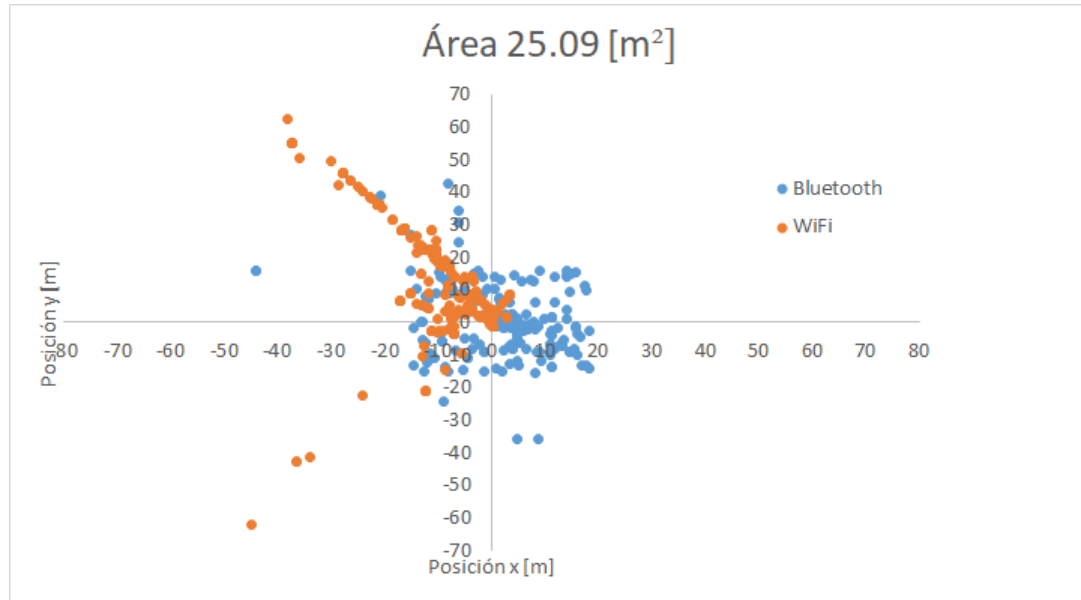


Figura 6.3: Posiciones relativas calculadas por el sistema para un área de 25,09[m²]

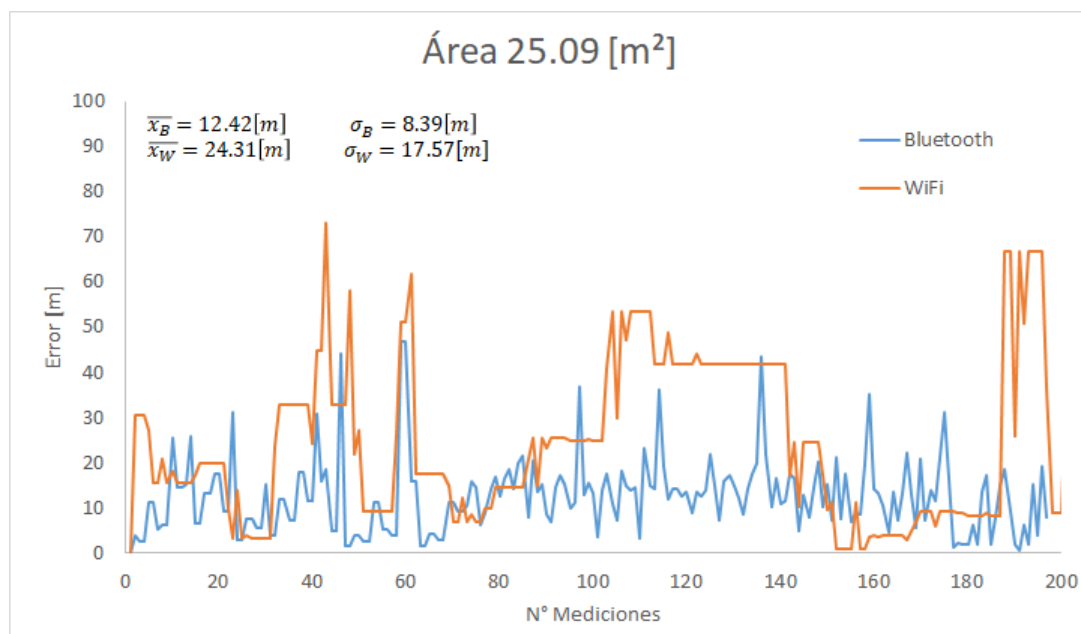


Figura 6.4: Errores de distancia para un área de 25,09[m²]

La figura 6.4 señala que para el caso de la toma de datos en un área de $25,09[m^2]$ se tiene un promedio para el caso de Bluetooth de $\bar{x}_B = 12,42[m]$ con una desviación estándar de $\sigma_B = 8,39[m]$, y para el caso de WiFi posee un promedio de $\bar{x}_W = 24,31[m]$ y una desviación estándar de $\sigma_W = 17,57[m]$.

Para un área de $27,64[m^2]$ se obtiene la figura 6.5.

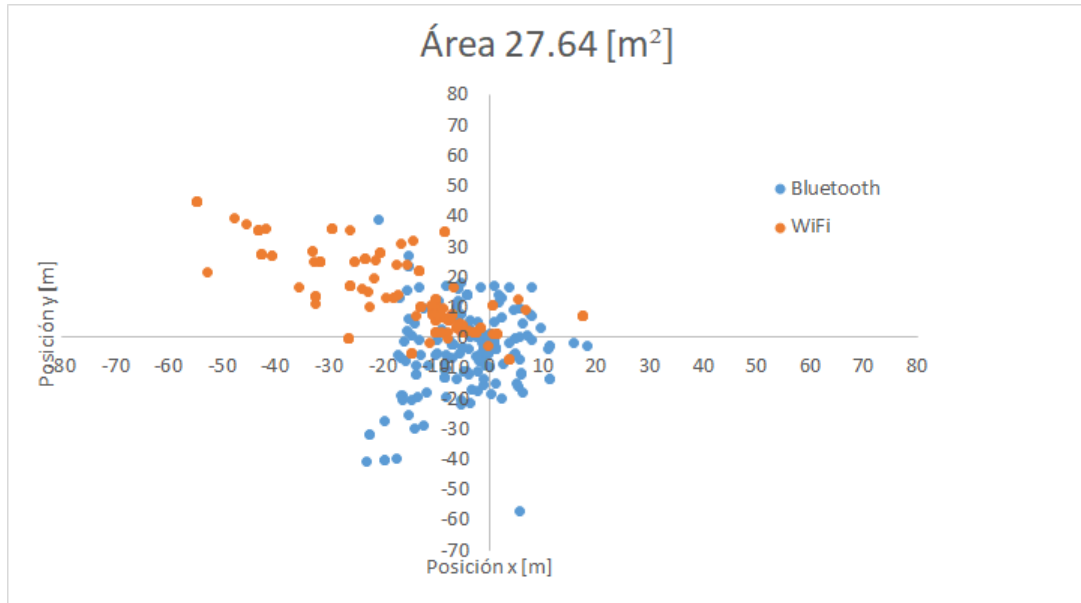


Figura 6.5: Posiciones relativas calculadas por el sistema para un área de $27,64[m^2]$

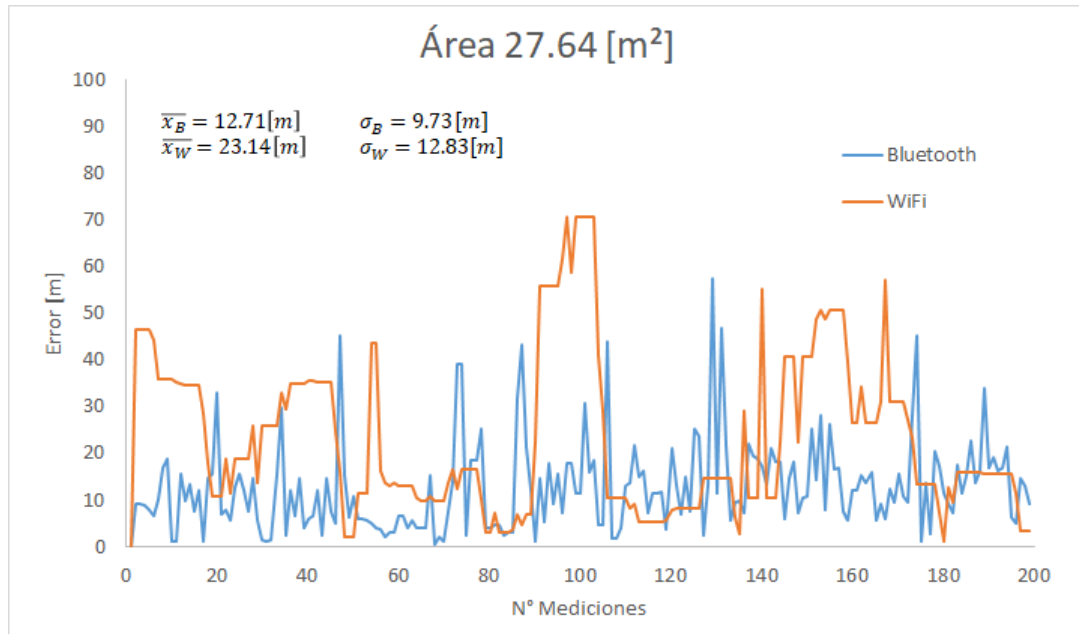


Figura 6.6: Errores de distancia para un área de 27,64[m²]

Ahora, para la figura 6.6 muestra que el promedio de la tecnología Bluetooth es de $\bar{x}_B = 12,71[m]$ con una desviación estándar de $\sigma_B = 9,73[m]$. Para la tecnología WiFi se tiene que el promedio posee un valor de $\bar{x}_W = 23,14[m]$ y una desviación estándar de $\sigma_W = 12,83[m]$.

Luego, para un área de 84,52[m²] se tiene la figura 6.7.

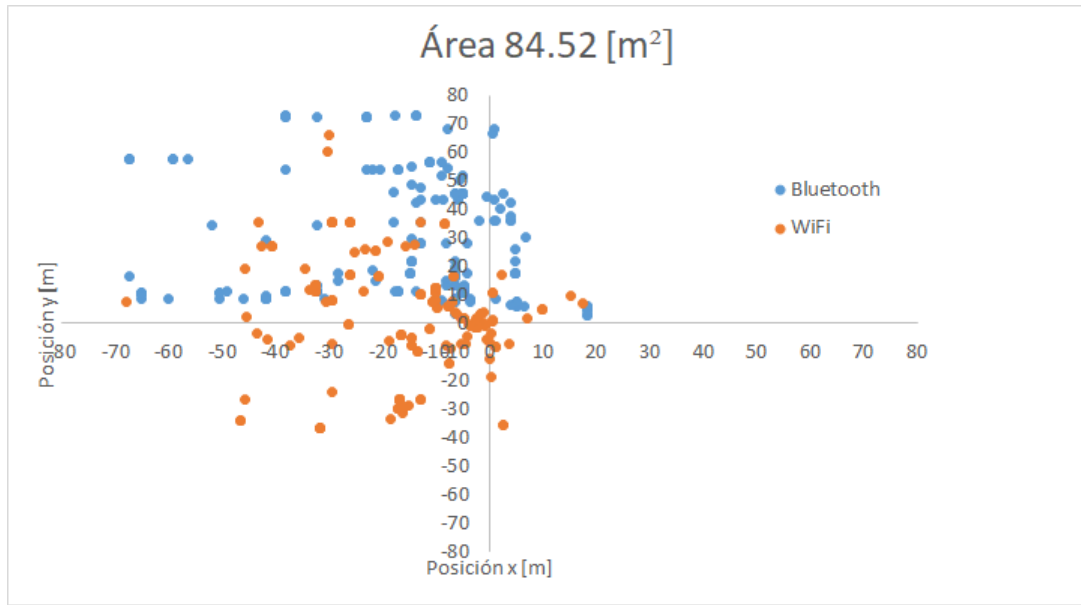


Figura 6.7: Posiciones relativas calculadas por el sistema para un área de $84,52[m^2]$

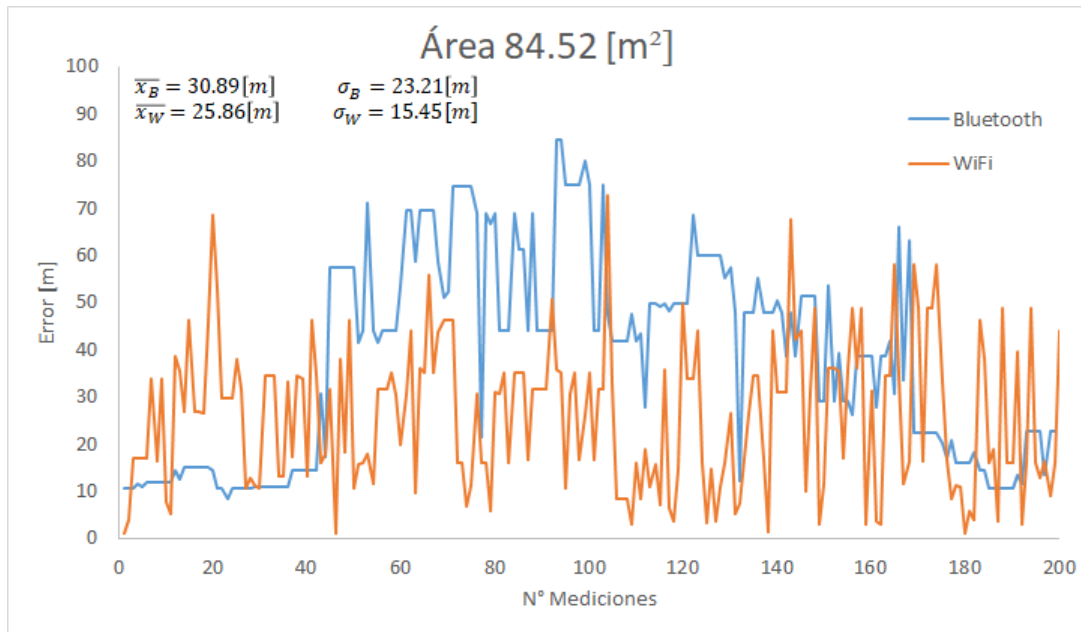


Figura 6.8: Errores de distancia para un área de $84,52[m^2]$

En el caso de una área de 84,52 metros cuadrados, se tiene la figura 6.8. En ella se obtiene que el promedio para la toma de datos usando Bluetooth es de $\bar{x}_B = 30,89[m]$ con una desviación estándar de $\sigma_B = 23,21[m]$, mientras que las mediciones hechas

con WiFi poseen un promedio de $\bar{x}_W = 25,86[m]$ y una desviación estándar de $\sigma_W = 15,45[m]$.

Finalmente, para la última configuración se obtiene el gráfico mostrado por la figura 6.9.

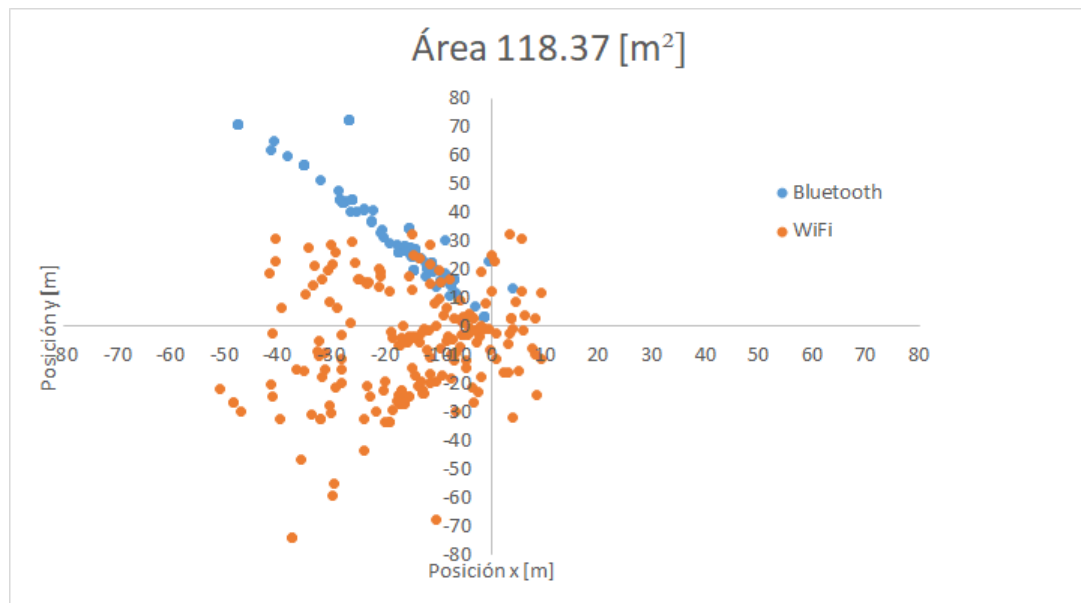


Figura 6.9: Posiciones relativas calculadas por el sistema para un área de $118,37[m^2]$

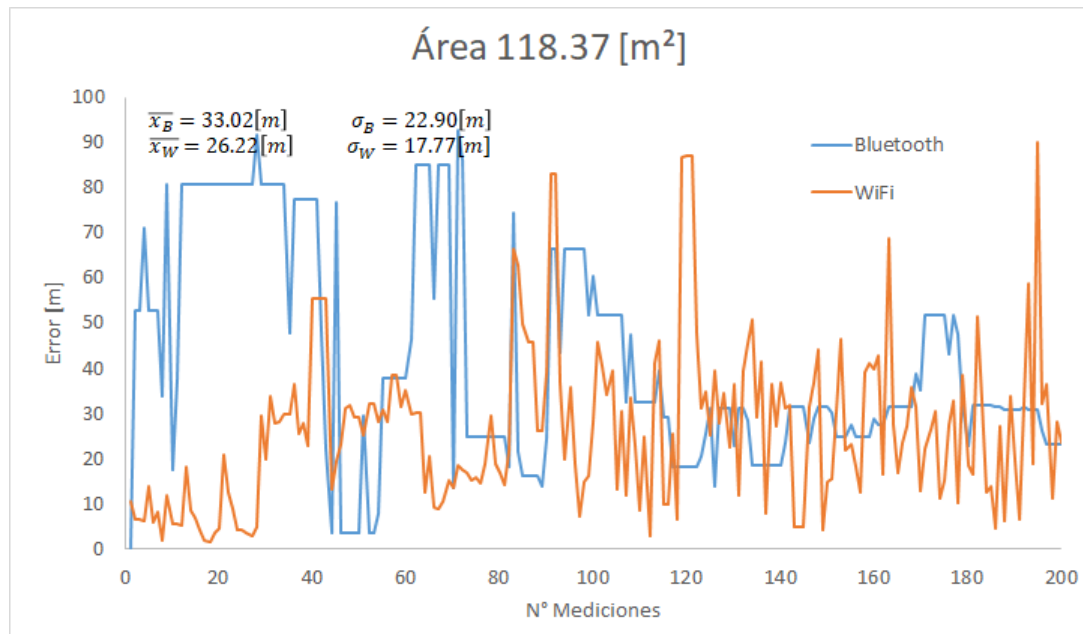


Figura 6.10: Errores de distancia para un área de 118,37[m²]

Finalmente, de la figura 6.10 se obtiene que para el caso de Bluetooth el promedio es de $\bar{x}_B = 33,02[m]$ con una desviación estándar de $\sigma_B = 22,90[m]$, mientras que las mediciones hechas con WiFi poseen un promedio de $\bar{x}_W = 26,22[m]$ y una desviación estándar de $\sigma_W = 17,77[m]$.

Los resultados anteriores se puede resumir en la tabla 6.1

Tabla 6.1: Resumen de resultados obtenidos.

Área [m ²]	7,95		25,09		27,64		84,52		118,37	
Tecnología	Bluetooth	WiFi	Bluetooth	WiFi	Bluetooth	WiFi	Bluetooth	WiFi	Bluetooth	WiFi
Promedio [m]	8,12	14,83	12,42	24,31	12,71	23,14	30,89	25,86	33,02	26,22
Desv. estándar [m]	7,20	8,86	8,39	17,57	9,73	12,83	23,21	15,45	22,90	17,77

Gráficamente, la tabla 6.1 queda representado en la figura 6.11.

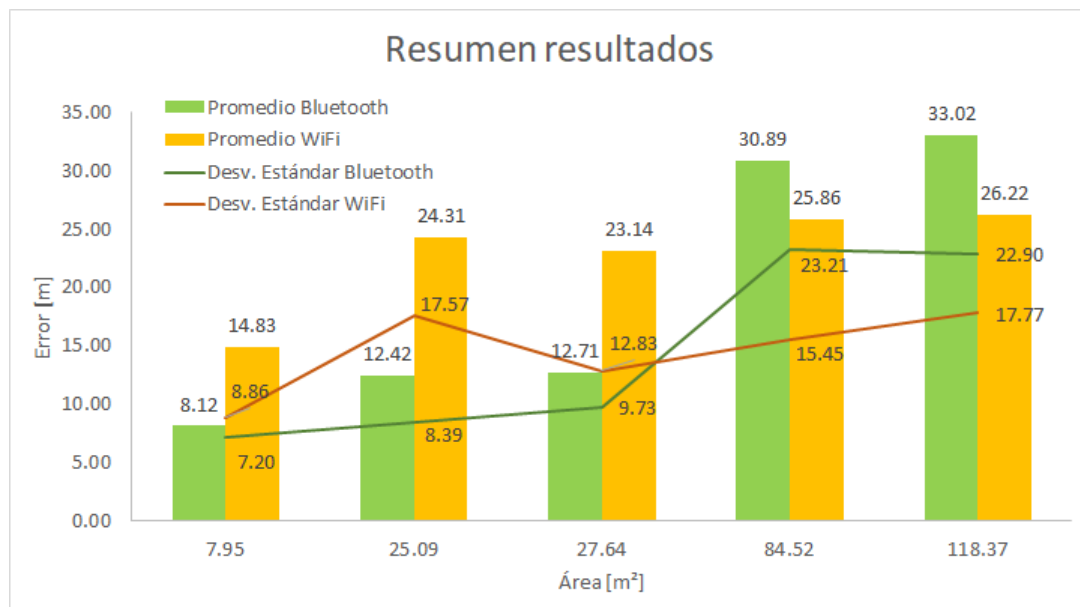


Figura 6.11: Resumen gráfico de resultados obtenidos.

6.2. Análisis de Resultados

6.2.1. Análisis cuantitativo de resultados

En las figuras 6.1, 6.3, 6.5, 6.7 y 6.9 se tiene la posición relativa calculada en base a la triangulación con respecto a la la posición real del experimentador. Se observa que en todos ellos, salvo la figura 6.1 se tiene una alta dispersión de los datos, es decir, los datos no presentan una precisión ni exactitud alguna. En el caso de la experimentación para el área de 7,95[m²] se aprecia una mayor precisión en los datos, sin embargo, una gran cantidad de ellos se alejan considerablemente del origen por lo que su exactitud al valor de posición real no es buena.

En la figura 6.1 se tiene que, si bien hay unos pocos datos de la medición con Bluetooth que se alejan visiblemente del centro, la mayoría de ellos se encuentran cercanos al origen en comparación a la medición con WiFi. Lo anterior se confirma

con el valor de la media de Bluetooth $\bar{x}_B = 8,12[m]$ es menor a la media de WiFi $\bar{x}_W = 14,83[m]$. Para el caso de la figura 6.3 se observa que las posiciones relativas calculadas para Bluetooth presentan una mejor precisión que WiFi ya que una gran concentración de datos se encuentra parcialmente en el origen del gráfico, mientras que para WiFi presentan una cantidad considerable de datos alejados del centro lo que significa un aumento relevante del promedio de error, los cuales son $\bar{x}_B = 12,42[m]$ frente a un $\bar{x}_W = 24,31[m]$ para Bluetooth y Wifi, respectivamente. Un caso similar se presenta en la figura 6.5 correspondiente al área de $27,64[m^2]$ donde los datos leídos para Bluetooth presentan una mejor precisión en comparación a WiFi. Luego, para el gráfico de la figura 6.7 que representa a la toma de datos para el área $84,52[m^2]$, la precisión de los datos para ambas tecnologías se ve mermada con respecto a las mediciones anteriores, sin embargo, para el caso de Bluetooth, además de un alto promedio de error ($\bar{x}_B = 30,89[m]$), posee también una alta desviación estándar ($\sigma_B = 23,21[m]$) que representa más de dos tercios del valor de su promedio. Finalmente, para la figura 6.9 se visualiza que la precisión de los datos es diferente para ambas tecnologías: en el caso de WiFi la precisión es casi nula, mientras que para Bluetooth se tiene que la gran mayoría de los datos leídos se encuentran en posiciones relativas dentro del mismo cuadrante del gráfico, casi formando una clara línea de tendencia. Esto se explica además viendo la figura 6.10 donde se tiene una gran cantidad de datos contiguos que marca el mismo valor, lo que provoca un efecto visual de parecer un gráfico de barras ya que al tener valores adyacentes iguales y luego cambia a otros valores adyacentes iguales provoca registros visualmente *rectangulares*.

Por otro lado, en las figuras 6.2, 6.4, 6.6, 6.8 y 6.10 se observa que durante cada toma de datos el valor de los errores varían ampliamente entre sí mostrando de esta manera que la precisión de los datos no es la adecuada.

Lo anterior se confirma numéricamente analizando el valor de la desviación estándar, que representa qué tan dispersos están los datos de la media. En las cuatro mediciones se tiene que la desviación estándar representa más de la mitad del valor de la media,

incluso en algunos casos llegando a ser cercana a éste, tal como el caso de la medición correspondiente al área de $7,95[m^2]$ donde el promedio es de $8,12[m]$ y la desviación estándar es de $7,20[m]$. En la práctica, esto significa que en un cierto instante el sistema diga que se está en una cierta posición y al instante siguiente -que puede ser una fracción de segundo después- el sistema calcule que el usuario se encuentra en otra posición a varios metros de distancia. Son pocos los casos donde los datos arrojaron valores estables, como el caso del gráfico de la figura 6.2 entre la medición 100 y 115 aproximado; en este intervalo si bien muestra un error cercano a los 20 metros, corresponde a un valor que no varía considerablemente con respecto al resto de los datos medidos.

También en las cinco toma de datos se aprecia que existen varios *peaks* de valores, y que este comportamiento está más frecuente en las tomas de mediciones que corresponden a áreas superiores tal como el caso de la figura 6.10, donde para ambas tecnologías existe una cantidad importante de saltos significativos entre un dato y otro.

Este comportamiento se explica debido a las ecuaciones de distancia -de WiFi 3.9 y Bluetooth 3.10- entre un dispositivo (Access Point y/o Beacon, respectivamente) al usuario. En ambas ecuaciones se tiene que la intensidad de señal decae de manera potencial con la distancia, por lo que a medida que un usuario se aleja de uno de estos dispositivos la presencia de errores se vuelve cada vez más significativa. A modo de ejemplo, en el caso de Bluetooth se tiene que el valor del *Tx Power* -que corresponde a la potencia de transmisión de un Beacon- posee una relación cercana a

$$distancia \propto \frac{1}{TxPower^{7,7095}} \quad (6.1)$$

Por lo que el factor de decaimiento del *TxPower* a medida que aumenta la distancia es alto. Es por esta razón que en las figuras 6.8 y 6.10 los valores promedio de Bluetooth son superior a los valores promedio de WiFi ya que para el caso de WiFi no decae a una razón tan alta.

Para el caso de WiFi, la razón entre distancia y la potencia de señal recibida por un Access Point posee una razón logarítmica por lo que la potencia recibida no varía de forma considerable en espacios abiertos para una distancia de 5 metros a una distancia de 30 metros, como sí lo hace el Bluetooth. Es por esta razón que en las cuatro tomas de datos posee valores promedio cercanos entre sí, a pesar de que están distanciados por varios metros al experimentador.

6.2.2. Análisis cualitativo de resultados

En general, se cumple que el posicionamiento en interiores por Bluetooth es más efectivo que el posicionamiento por WiFi en áreas de trabajo reducidas, mientras que esta última tecnología presenta errores de distancia más estables independiente del área de trabajo; por lo que para distancias medias, la tecnología WiFi presenta mejores resultados tomando en cuenta, eso sí, el valor de error de distancia no despreciable que presenta. Lo anterior se demuestra en los casos de estudio donde el valor promedio de error de posición no varía significativamente para el caso de WiFi, como sí lo hace para el caso de Bluetooth. Específicamente, la diferencia entre el valor promedio más alto y el más bajo para WiFi y Bluetooth es de $\Delta\bar{x}_W = 11,38[m]$ y $\Delta\bar{x}_B = 25,00[m]$, respectivamente; mientras que la diferencia de la desviación estándar más alta y la más baja es de $\Delta\sigma_W = 8,91[m]$ y $\Delta\sigma_B = 19,41[m]$, respectivamente. Los valores de promedio y desviación estándar máximos y mínimos coinciden con el caso de estudio del área mayor (figura 6.10) y menor (figura 6.2), correspondientemente.

Como fue señalado al comienzo de la sección 5.4, el algoritmo de localización es trascendental a la hora de bajar los niveles de fluctuaciones entre los datos. El algoritmo usado en esta experimentación consistió en establecer un promedio de los últimos 5 datos leídos para luego entregar la posición calculada por el sistema. Además, para evitar *peaks* de alto valor, se implementó otra medida de mitigación que consistió en ignorar mediciones que sobrepasaban los 100 metros de diferencia con respecto a la

última posición calculada, es por esto que en los gráficos antes señalados se aprecia que ningún valor sobrepasa el centenar de metros de error.

En un comienzo de la fase de experimentación se realizaron mediciones sin los métodos de mitigación antes mencionados, esto es, que la posición se actualice de inmediato al leer un nuevo dato. No obstante, tras los resultados visiblemente paupérrimos dentro de la aplicación, la experimentación tuvo que ser interrumpida para proceder a usar las medidas antes señaladas.

Otro factor importante a la hora dentro de la experimentación fue la numerosa presencia de otras señales de red inalámbricas, ya sean tanto redes WiFi como Bluetooth, que al ser una gran cantidad -del orden de 20 a 25 señales WiFi detectadas al momento de la experimentación- produce interferencias ya sean del tipo constructivas y en particular destructivas ya que las ondas de radio emitidas por cada Access Point presente dentro de las cercanías del lugar de experimentación usan en orden de magnitud la misma frecuencia que los Access Point usados para la presente memoria, es decir, todas ellas usan la frecuencia 2,4 GHz²¹. Además, como fue señalado en la subsección 3.3.2.2, la frecuencia que utiliza la tecnología Bluetooth también corresponde a la de 2,4 GHz; por lo que ambas tecnologías se vieron afectadas en cierta medida por este motivo y finalmente afectó a los resultados finales. Sin embargo, dado que la presencia de estas señales está fuera de la manipulación del experimentador, no fue posible realizar la fase de experimentación sin estas señales activas por lo que no es posible evaluar en qué grado afectó finalmente a los valores registrados.

²¹Las redes inalámbricas WiFi se encuentran distribuidas dentro de 14 canales, separadas entre sí por una frecuencia de 5 MHz para los protocolos 802.11b/g/n.

Capítulo 7

Conclusiones

En las últimas décadas el posicionamiento ha cobrado una importancia relevante, ya sea para conocer dónde se encuentra cierto objeto en tiempo real, la navegación terrestre, marítima y aérea, topología, etc. Sin embargo, la gran mayoría de estas aplicaciones de posicionamiento requiere estar en ambientes abiertos ya que al funcionar con un sistema satelital -principalmente GPS- no es posible la transmisión de datos al interior de edificios o túneles subterráneos, por lo que las aplicaciones satelitales actuales son incapaces de posicionar a un objeto en estas situaciones.

De este modo, la localización en interiores es un problema que no está resuelto del todo. En la literatura se han postulado soluciones aproximadas usando diferentes métodos siendo la trilateración la principal de ellas. Para ello, es posible usar este método de localización mediante diferentes tecnologías, tales como GSM, Bluetooth, WiFi, entre otras. En esta memoria se realiza un estudio usando estas dos últimas tecnologías dado que son las dos más accesibles hoy en día con el auge de los smartphones ya que están presentes en prácticamente todos ellos.

Sin embargo, para implementar la localización *indoor* se requiere de una infraestructura previa en la zona que se desea ubicar. Lo anterior conlleva a la siguiente pregunta:

¿qué tecnología es más precisa y cuáles son los costos asociados?

En esta memoria se realizó un estudio donde se implementó una aplicación móvil en Android con el cual se puso a prueba la localización por Bluetooth y WiFi. El lugar de experimentación fue el estacionamiento subterráneo del Campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María. Luego de la experimentación variando el área triangular de los dispositivos de triangulación (ya sea Access Point o Beacon), se demostró empíricamente que en un área reducida de operación la tecnología Bluetooth entrega mejores resultados que WiFi, no así en un área de trabajo mayor donde el posicionamiento por WiFi presenta resultados favorables con respecto a Bluetooth. No obstante, como se demostró en el capítulo 6, los datos obtenidos demuestran que el margen de error es ampliamente superior al sistema GPS -donde éste posee un error desde a unos centímetros a un par de metros- en comparación a un margen de error promedio de 8,12[m] obtenido con Bluetooth y 14,83[m] con WiFi en una área de medición de 7,95[m²]. Por tanto, se concluye que la precisión del posicionamiento en interiores depende principalmente de la densidad de dispositivos usados para la triangulación: A mayor cantidad de dispositivos instalados estratégicamente en el lugar, mayor será la precisión; no obstante, esto conlleva a un costo de inversión mayor.

Dado lo anterior, se concluye que si para el posicionamiento en interiores se requiere una precisión considerable, necesariamente se debe tener contar con Beacon que provean la localización usando Bluetooth y además de realizar una inversión significativa en la compra de éstos si el área de operación es extensa ya que se debe contar con una cantidad considerable de estos dispositivos.

Por el contrario, si se requiere contar una localización donde la exactitud del posicionamiento no juega un papel fundamental es posible usar tanto Beacon como Access Point para ello, sin embargo, estos últimos dispositivos presentan resultados mejores cuando se ubica los Access Point a una distancia mediana entre ellos.

Otra conclusión obtenida es que el algoritmo de localización es importante a la

hora de mitigar las fluctuaciones del posicionamiento calculado por el sistema. En un comienzo de la fase de experimentación, la posición era actualizada cada vez que un nuevo dato era leído a partir de los Access Point o Beacon, sin embargo, los resultados fueron visiblemente negativos. Para reducir la inestabilidad de la ubicación es que en el presente trabajo se escogió usar el valor de la posición como el promedio de los cinco últimos datos leídos.

Dado que la localización en interiores se realiza mayoritariamente mediante triangulación, como trabajo futuro se podría hacer un estudio más exhaustivo de la localización variando la forma de cómo el smartphone lee el valor de distancia desde éste a un Beacon o Access Point ya que, como se vio en las ecuaciones 3.4 y 3.5, el valor de la coordenada (x, y) calculada depende del cuadrado del valor de la distancia, por lo que cualquier error de medición afecta al cuadrado, y por tanto un error considerable en la posición calculada. Otro trabajo futuro sería probar la localización vía magnetismo, ya que debido a la falta de elementos metálicos considerables -como vigas- no fue posible hacer un mapeo previo del lugar de experimentación, y por tanto, no fue posible hacer el posicionamiento a través del magnetismo.

Como conclusión final, el posicionamiento *indoor* todavía es un campo abierto a estudio que no ha llegado a un grado de calidad y exactitud comparable al posicionamiento *outdoor*. Es por esto es que hay que tomar decisiones tomando en cuenta los costos de implementación y operación versus el grado de precisión y exactitud que se desea.

Bibliografía

Atzori, Luigi; Iera, Antonio; y Morabito, Giacomo (2010). The internet of things: A survey. *Computer networks*, 54(15), 2787–2805. [3.3.2.2](#)

Bfonics (2010). What is beacons? <http://bfonics.com/what_is_beacon.php> [consulta: 10 junio 2016]. [3.3.2.2](#)

Castro, Luis (2015). Qué es geolocalización. <http://aprenderinternet.about.com/od/Glosario/g/Que-es-geolocalizacion.htm/>. [Acceso Junio 2016]. [3.1](#)

Chung, Jaewoo; Donahoe, Matt; Schmandt, Chris; Kim, Ig-Jae; Razavai, Pedram; y Wiseman, Micaela (2011). Indoor location sensing using geo-magnetism. [3.3.2.4](#)

Crow, Brian P; Widjaja, Indra; Kim, Jeong Geun; y Sakai, Prescott T (1997). Ieee 802.11 wireless local area networks. *IEEE Communications magazine*, 35(9), 116–126. [3.3.2.1](#)

Decuir, Joe (2010). Bluetooth 4.0: low energy. *Cambridge, UK: Cambridge Silicon Radio SR plc*, 16. [3.3.2.2](#)

Dong, Qian y Dargie, Waltenegus (2012). Evaluation of the reliability of rssi for indoor localization. In *Wireless Communications in Unusual and Confined Areas (ICWCUCA), 2012 International Conference on* (pp. 1–6).: IEEE. [3.3.2.2](#)

Kaplan, Elliott y Hegarty, Christopher (2005). *Understanding GPS: principles and applications*. Artech house. [2.1](#), [3.3.1.1](#)

Liu, Cindy (2015). *Worldwide Internet and Mobile Users*. Technical report, eMarketer. [1](#)

Liu, Hui; Darabi, Houshang; Banerjee, Pat; y Liu, Jing (2007). Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6), 1067–1080. [3.1](#)

Mouly, Michel; Pautet, Marie-Bernadette; y Foreword By-Haug, Thomas (1992). *The GSM system for mobile communications*. Telecom publishing. [3.3.1.2](#)

- Núñez Sobrino, María Ángeles (2009). Sistema de localización en redes wi-fi basado en fingerprint. [3.3.2.3](#), [3.3.2.3](#)
- Powell, Mark (2014). *Bluetooth SIG 2014 Annual Report*. Technical report, Bluetooth Special Interest Group. [3.3.2.2](#)
- Prabhu, C.S.R. y Reddi, A.P. (2004). *BLUETOOTH TECHNOLOGY: AND ITS APPLICATIONS WITH JAVA AND J2ME*. PHI Learning. [3.3.2.2](#)
- Wellenhof, B Hofmann; Lichtenegger, Herbert; y Collins, James (1992). *Global positioning system: theory and practice*. Springer. [3.1](#)
- Yang, Zheng; Wu, Chenshu; y Liu, Yunhao (2012). Locating in fingerprint space: wireless indoor localization with little human intervention. (pp. 269–280). [3.1](#)