



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y LOCALIZACIÓN PARA INTERIORES  
UTILIZANDO TELÉFONOS INTELIGENTES

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
MANUEL ALEJANDRO CÓRDOBA MALDONADO

TUTOR PRINCIPAL  
JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE, 2013

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Víctor Rangel Licea  
Secretario: Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón  
Vocal: Dr. Javier Gómez Castellanos  
1 er. Suplente: Dr. Miguel López Guerrero  
2 do. Suplente: Dr. Jorge Prado Molina

UNAM, Facultad de Ingeniería.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Javier Gómez Castellanos

-----  
**FIRMA**

*Dedicado a mi familia. Las palabras no me alcanzan para agradecer su apoyo que me permitió llegar a este punto en mi vida. En especial a mi mama Amparo, gracias por tus cuidados y preocupaciones. Te quiero mucho.*

# Agradecimientos

*A mi familia por sus consejos y cuidados. Sé que ustedes nunca me fallaran y me brindarán su apoyo en momentos difíciles.*

*A mis padres, Carlos Córdoba y Luz Maldonado por su apoyo incondicional en cada decisión que he tomado.*

*A mi abuela Bartola Salgado por sus consejos, preocupaciones y oraciones.*

*A mis hermanos por motivarme día a día a ser mejor persona.*

*A mis amigos por hacer más alegre mi vida.*

*A Ely por su apoyo, comprensión y cariño.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por brindarme una educación de calidad y formarme como profesional.*

*A los profesores que han cambiado mi forma de ver la vida.*

*A mi tutor, el Dr. Javier Gómez Castellanos por su confianza, apoyo, paciencia e interés mostrados en la realización de este trabajo.*

*A mis sinodales, Dr. Víctor Rangel Licea, Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón, Dr. Javier Gómez Castellanos, Dr. Miguel López Guerrero y Dr. Jorge Prado Molina por tomarse la molestia de revisar esta tesis.*

*A la Coordinación de Estudios de Posgrado (CEP) de la UNAM y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico en forma de becas para la realización de mis estudios.*

*Esta tesis se realizó en parte con el apoyo de los proyectos CONACyT 105117, PAPIIT IN106609 y PAPIIT IN114813.*

# Índice

Jurado asignado.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice.....	v
Índice de figuras.....	viii
Índice de tablas.....	xii
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xiv

## Capítulo 1      Introducción

1.1 Definición del problema y antecedentes.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Idea conceptual y contribución.....	2
1.4 Estructura de la tesis.....	2

## Capítulo 2      Estado del arte en sistemas de localización para interiores

2.1 Introducción.....	4
2.2 Sistema de Posicionamiento Global GPS.....	4
2.3 Sistemas de localización para interiores.....	6
2.3.1 Seguimiento de peatones con sensores inerciales montados en el pie.....	6
2.3.2 Aproximación de calibración para brújula digital de dos ejes en un sistema de navegación de bajo costo para peatones.....	7
2.3.3 Localización de robot móvil usando una brújula electrónica para ambiente de pasillo.....	8

2.3.4	Navegación garantizada con un robot ciego poco confiable.....	9
2.3.5	Aplicación de una brújula electrónica para robot móvil en Interiores.....	9
2.3.6	Sistema de navegación para usuario centrado en aplicaciones interiores.....	10
2.3.7	Posicionamiento en interiores usando teléfono móvil con acelerómetro y brújula digital integrados.....	11
2.3.8	FootPath: Mapa preciso basado en navegación en interiores utilizando teléfonos inteligentes.....	12
2.3.9	Nuevo enfoque de la navegación en interiores empleando estadísticas de movimiento...	13
2.3.10	Orientación basada en posicionamiento WiFi en el teléfono Google Nexus One.....	13
2.3.11	Red inalámbrica de sensores basada en seguimiento de usuarios móviles en Interiores en 3D.....	15
2.3.12	SpiderBat: Incrementar redes inalámbricas de sensores con información de distancia y ángulo.....	15
2.4	Análisis de sistemas de localización para interiores.....	16

### **Capítulo 3      Diseño del sistema de seguimiento y localización para interiores**

3.1	Introducción.....	20
3.2	Sistema de seguimiento y localización para interiores.....	20
3.3	Subsistema de seguimiento de trayectoria.....	21
3.4	Subsistema de detección de movimiento.....	22
3.5	Subsistema de detección de nodos.....	25
3.6	Subsistema de superposición de trayectorias.....	27

### **Capítulo 4      Implementación del sistema de seguimiento y localización para interiores sobre un entorno de desarrollo integrado**

4.1	Introducción.....	33
4.2	Teléfonos inteligentes.....	33

4.2.1 Sensores.....	34
4.3 Entorno de desarrollo integrado.....	37
4.4 Software para acceder a los sensores del teléfono.....	37
4.5 Implementación del sistema de seguimiento y localización para interiores.....	39
4.5.1 Implementación del subsistema de seguimiento de trayectoria.....	39
4.5.2 Implementación del subsistema de detección de movimiento.....	41
4.5.3 Implementación del subsistema de detección de nodos.....	46
4.5.4 Implementación del subsistema de superposición de trayectorias.....	49
<b>Capítulo 5 Pruebas de validación del sistema de seguimiento y localización para interiores</b>	
5.1 Introducción.....	52
5.2 Escenario en interiores.....	52
5.3 Escenario en exteriores.....	67
5.4 Error entre la trayectoria real y la obtenida por el sistema.....	74
5.5 Ejemplo de guiado.....	77
<b>Capítulo 6 Conclusiones.....</b>	<b>79</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>80</b>

# Índice de figuras

<b>Figura 2.1</b> Constelación de satélites GPS. Figura reproducida de [2].....	5
<b>Figura 2.2</b> Segmento de control del GPS distribuido alrededor del mundo. Figura reproducida de [2].....	5
<b>Figura 2.3</b> Ubicación de usuario por medio de triangulación de distancias. Figura reproducida de [3].....	6
<b>Figura 2.4</b> Wireless InertiaCube3 (derecha) y su receptor (izquierda). Figura reproducida de [4].....	7
<b>Figura 2.5</b> Sistema de navegación para peatones (PSN). Figura reproducida de [5].....	8
<b>Figura 2.6</b> Ambiente extremo en el cual el robot ciego navega exitosamente con el algoritmo propuesto. Figura reproducida de [7].....	9
<b>Figura 2.7</b> Datos tomados de una brújula electrónica en un ambiente con disturbios magnéticos. Figura reproducida de [8].....	10
<b>Figura 2.8</b> Aplicación mostrando la ruta que ha seguido el usuario. Figura reproducida de [9].....	11
<b>Figura 2.9</b> Flujo de información durante la navegación con FootPath. Figura reproducida de [11].....	12
<b>Figura 2.10</b> Teléfono Google Nexus One mostrando la interfaz de usuario. Figura reproducida de [13].....	14
<b>Figura 2.11</b> Red inalámbrica de sensores. Figura reproducida de [15].....	15
<b>Figura 2.12</b> Plataforma SpiderBat. Figura reproducida de [18].....	16
<b>Figura 3.1</b> Diagrama de flujo del algoritmo On / Off, indica si el usuario se encuentra en movimiento o en reposo .....	24
<b>Figura 3.2</b> Muestras de RSSI tomadas entre nodos móviles y nodos fijos en línea de vista y no línea de vista. Figura reproducida de [19].....	25
<b>Figura 3.3</b> Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos.....	27
<b>Figura 3.4</b> Trayectoria supuesta de un usuario A.....	28
<b>Figura 3.5</b> Trayectoria supuesta de un usuario B.....	28



<b>Figura 3.6</b> Unión de trayectorias A y B a partir de nodo en común.....	30
<b>Figura 4.1</b> Sensores en el teléfono HTC Nexus One.....	35
<b>Figura 4.2</b> Sistema coordinado del teléfono. Figura reproducida de [22].....	37
<b>Figura 4.3</b> Interfaz de la aplicación que obtiene, despliega y almacena datos de los sensores.....	38
<b>Figura 4.4</b> Diagrama a bloques del sistema de seguimiento y localización para interiores.....	39
<b>Figura 4.5</b> Forma del pasillo del recorrido de prueba.....	40
<b>Figura 4.6</b> Datos del sensor de orientación durante el recorrido de prueba.....	40
<b>Figura 4.7</b> Trayectoria del usuario obtenida por medio del sensor de orientación.....	41
<b>Figura 4.8</b> Datos de los sensores durante el recorrido; a) sensor de orientación; b) acelerómetro sobre el eje X; c) acelerómetro sobre el eje Y; d) acelerómetro sobre el eje Z.....	42
<b>Figura 4.9</b> Resultante de los datos del acelerómetro.....	43
<b>Figura 4.10</b> Histograma del número de muestras consecutivas en el intervalo off.....	43
<b>Figura 4.11</b> Valores del sensor de orientación después de aplicar el algoritmo On / Off.....	44
<b>Figura 4.12</b> a) Trayectoria del usuario antes del subsistema de detección de movimiento; b) después del subsistema de detección de movimiento.....	45
<b>Figura 4.13</b> Interfaz de la aplicación que descubre y guarda información de dispositivos que cuentan con bluetooth.....	46
<b>Figura 4.14</b> Plano del tercer piso del edificio Valdez Vallejo. Figura parcialmente reproducida de [19].....	47
<b>Figura 4.15</b> Resultados obtenidos de la implementación del bloque de detección de nodos.....	48
<b>Figura 4.16</b> Interfaz de la aplicación que descubre y guarda información de dispositivos que cuenten con bluetooth, además obtiene, muestra y almacena datos de los sensores integrados en el teléfono.....	49
<b>Figura 4.17</b> Recorrido de prueba para unión de trayectorias.....	50
<b>Figura 4.18</b> Trayectorias A (azul) y B (rojo) trazadas a partir del origen.....	51
<b>Figura 4.19</b> Unión de las trayectorias de ambos usuarios.....	51
<b>Figura 5.1</b> Plano del tercer piso del edificio Valdez Vallejo en el que se muestran los nodos estáticos del primer escenario.....	53

<b>Figura 5.2</b> Interfaz de la aplicación final para el seguimiento de usuarios.....	54
<b>Figura 5.3</b> Formato en el que se almacenan los datos para su posterior procesamiento.....	55
<b>Figura 5.4</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 1.....	56
<b>Figura 5.5</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 2.....	56
<b>Figura 5.6</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 3.....	57
<b>Figura 5.7</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 4.....	57
<b>Figura 5.8</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 5.....	58
<b>Figura 5.9</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 6.....	58
<b>Figura 5.10</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 7.....	59
<b>Figura 5.11</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 8.....	59
<b>Figura 5.12</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 9.....	60
<b>Figura 5.13</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 10.....	60
<b>Figura 5.14</b> Rutas juntas antes de aplicar el algoritmo de unión de trayectorias.....	61
<b>Figura 5.15</b> Traslación y rotación de la trayectoria 1 con respecto a la trayectoria base.....	62
<b>Figura 5.16</b> Traslación de la trayectoria 3 con respecto a la trayectoria base.....	63
<b>Figura 5.17</b> Traslación y rotación de la trayectoria 4 con respecto a la trayectoria base.....	63
<b>Figura 5.18</b> Traslación y rotación de la trayectoria 5 con respecto a la trayectoria base.....	64
<b>Figura 5.19</b> Traslación y rotación de la trayectoria 6 con respecto a la trayectoria base.....	64
<b>Figura 5.20</b> Traslación de la trayectoria 7 con respecto a la trayectoria base.....	65
<b>Figura 5.21</b> Traslación y rotación de la trayectoria 8 con respecto a la trayectoria base.....	65
<b>Figura 5.22</b> Traslación de la trayectoria 9 con respecto a la trayectoria base.....	66
<b>Figura 5.23</b> Traslación de la trayectoria 10 con respecto a la trayectoria base.....	66
<b>Figura 5.24</b> Rutas juntas después de aplicar el algoritmo de unión de trayectorias.....	67
<b>Figura 5.25</b> Conjunto sur de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en Ciudad Universitaria. Figura obtenida de [24].....	68
<b>Figura 5.26</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario A.....	68

<b>Figura 5.27</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario B.....	69
<b>Figura 5.28</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario C.....	69
<b>Figura 5.29</b> Recorrido y trayectoria obtenida del usuario D.....	70
<b>Figura 5.30</b> Rutas de los 4 usuarios antes de la unión de trayectorias.....	70
<b>Figura 5.31</b> Antes y después de la traslación de la trayectoria del usuario B.....	71
<b>Figura 5.32</b> Antes y después de la traslación de la trayectoria del usuario C.....	72
<b>Figura 5.33</b> Antes y después de la traslación de la trayectoria del usuario D.....	72
<b>Figura 5.34</b> Rutas juntas después de aplicar el algoritmo de unión de trayectorias en el escenario exterior.....	73
<b>Figura 5.35</b> Comparación entre los recorridos seguidos por los usuarios y las trayectorias obtenidas por el sistema.....	73
<b>Figura 5.36</b> Comparación entre las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema de los usuarios 1 y 2.....	74
<b>Figura 5.37</b> Comparación entre las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema de los usuarios 3 y 4.....	75
<b>Figura 5.38</b> Comparación entre las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema de los usuarios 5 y 6.....	75
<b>Figura 5.39</b> Comparación entre las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema de los usuarios 7 y 8.....	76
<b>Figura 5.40</b> Comparación entre las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema de los usuarios 9 y 10.....	76
<b>Figura 5.41</b> Unión de trayectorias final del escenario en interiores.....	77
<b>Figura 5.42</b> Trayectorias 9 (naranja) y 6 (negro).....	78

## Índice de tablas

<b>Tabla 2.1</b> Tecnologías usadas en sistemas de localización para interiores.....	18, 19
<b>Tabla 4.1</b> Valores de umbral superior e inferior.....	43
<b>Tabla 4.2</b> Valores de entrada del algoritmo On / Off.....	44
<b>Tabla 5.1</b> Información de los nodos estáticos en cada trayectoria.....	62
<b>Tabla 5.2</b> Error en cada una de las trayectorias del escenario en Interiores.....	77

# Resumen

En esta tesis se muestra el diseño e implementación de un sistema de seguimiento y localización para interiores que está basado en el uso del sensor de orientación, acelerómetro y radio bluetooth, de un teléfono inteligente. El sistema da seguimiento al teléfono con la finalidad de rastrear al usuario de éste, siempre y cuando el usuario siempre tenga consigo el teléfono inteligente. El sistema se subdivide en cuatro subsistemas, seguimiento de trayectoria, detección de movimiento, detección de nodos y por último superposición de trayectorias. El subsistema de seguimiento de trayectoria utiliza los datos del sensor de orientación para detectar cambios en el recorrido del teléfono inteligente y con éstos traza la trayectoria del usuario. El subsistema de detección de movimiento utiliza los datos del acelerómetro para detectar si el dispositivo está o no en movimiento y discriminar los datos del sensor de orientación. El subsistema de detección de nodos hace uso del radio bluetooth para detectar puntos de encuentro con otros usuarios del sistema. El subsistema de superposición de trayectorias utiliza los nodos para unir los recorridos de los usuarios. En esta tesis se muestra la implementación de cada subsistema por separado, para finalmente probar el sistema completo tanto en el interior como en el exterior de un edificio y presenta un ejemplo de guiado. Este sistema pretende ser la base para realizar guiado en interiores.

# Abstract

This thesis shows the design and implementation of a tracking and localization system for indoors based on orientation and accelerometer sensors and bluetooth radio in a smartphone. The smartphone is tracked by the system in order to keep track of the smartphone's user. The system has four subsystems, path tracking subsystem, motion detection subsystem, node detection subsystem and path overlap subsystem. The path tracking subsystem uses orientation sensor data to detect changes in the route of the smartphone, and with this information plots the path of the user. The motion detection subsystem uses accelerometer data to detect if the smartphone is moving or not and discriminate the orientation sensor data. The node detection subsystem uses the bluetooth radio to detect points of encounter with other users of the system. The path overlap subsystem connects the paths of all users of the system using the path nodes. This thesis describes the implementation of each subsystem and shows how they are integrated in both indoors and outdoors environments. It also shows an example of guidance. This system tries to be base for indoors guidance.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Definición del problema y antecedentes

En la actualidad el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*) es muy utilizado por casi cualquier persona, ya sea para desplazarse desde su casa a la oficina, ubicar hospitales, bancos o cualquier sitio de interés para el usuario. Este sistema funciona triangulando la señal transmitida por satélites que es recibida por el dispositivo GPS [2]. Como resultado se obtiene un área donde se encuentra el usuario. Este sistema tiene una precisión aproximada de unos 5 [m], y en algunos casos esta precisión puede ser menor dependiendo del tipo de GPS utilizado. La triangulación del dispositivo GPS requiere línea de vista ya que éste es un sistema satelital, lo que provoca que su uso en interiores sea prácticamente imposible.

Existen diferentes propuestas para la localización en interiores, algunas bajo el mismo principio que el GPS (triangulación de señales). Lo que proponen este tipo de sistemas es de alguna manera triangular la señal de diferentes puntos de acceso para encontrar al usuario, pero existen diferentes limitaciones de una señal inalámbrica en interiores como lo son las trayectorias múltiples y las pérdidas por trayectoria debidas a paredes o mobiliario. Ante estas limitantes proponen caracterizar los lugares por medio de mediciones de intensidad de la señal de RF [12], [13], [14], [15], [16], utilizando grandes bases de datos que se tienen que actualizar en caso de que cambie el mobiliario o la forma del edificio. En otras propuestas dan seguimiento al usuario colocando sensores en él, con la limitante que las plataformas son aparatosas y limitan los movimientos del usuario [4], [5].

Los dispositivos móviles como los llamados teléfonos inteligentes son una constante en la sociedad en la que hoy vivimos. Este tipo de dispositivos brindan servicios como telefonía móvil, datos y cuentan con un sinnúmero de aplicaciones que contribuyen a que los usuarios nunca se separen de éstos. Además, este tipo de dispositivos cuentan con una variedad de sensores [22], que pueden ser utilizados para localizar a un usuario dentro de un edificio [9], [10], [11], [13].

## 1.2 Objetivo

Diseñar e implementar un sistema de seguimiento y localización para interiores utilizando teléfonos inteligentes, basado en los sensores y las capacidades de conectividad que éstos tienen integrados. Dar seguimiento a usuarios mediante el rastreo de los dispositivos.

## 1.3 Idea conceptual y contribución

La idea principal de este trabajo es dar seguimiento a usuarios de teléfonos inteligentes siempre y cuando los usuarios lleven consigo estos dispositivos. Para dar seguimiento al usuario se toman los datos del sensor de orientación a fin de obtener la trayectoria que siguió el teléfono inteligente y por ende del usuario que lo utiliza, suponiendo que éste se mueve a una velocidad constante. Adicionalmente se establecen nodos a lo largo de la trayectoria por medio de bluetooth, dichos nodos representan puntos de encuentro con otros usuarios. Con estos datos se podrán superponer las trayectorias de los usuarios del sistema en un plano. El sistema de seguimiento y localización para interiores está dividido en los siguientes subsistemas:

- **Subsistema de seguimiento de trayectoria:** Por medio de la brújula digital se detectarán los cambios en la dirección de desplazamiento del usuario. Con estos datos se obtendrá la trayectoria de éste.
- **Subsistema de detección de movimiento:** Por medio del acelerómetro se detectará cuando el teléfono inteligente esté o no en movimiento.
- **Subsistema de detección de nodos:** Por medio del bluetooth se identificará cuando se encuentren otros dispositivos en la cercanía de la trayectoria del usuario.
- **Subsistema de superposición de trayectorias:** Utilizando los nodos se superpondrán las trayectorias de los usuarios en un plano.

La principal contribución de este trabajo, es que para dar seguimiento al usuario no se necesita conocer su posición inicial. Ya que una vez superpuestas las trayectorias de los diferentes usuarios, éstos se podrán localizar mediante el seguimiento de las diferentes rutas desde los puntos de intersección.

## 1.4 Estructura de la tesis

El resto del contenido de esta tesis se describe a continuación:



## **Capítulo 2**

El segundo capítulo presenta el resumen de diferentes propuestas que pretenden dar solución al problema que representa la localización en interiores, para posteriormente identificar las diferentes tecnologías utilizadas en estas propuestas.

## **Capítulo 3**

El tercer capítulo presenta el diseño conceptual del sistema de seguimiento y localización para interiores, el cual se divide en cuatro subsistemas, éstos son: seguimiento de trayectorias, detección de movimiento, detección de nodos y superposición de trayectorias.

## **Capítulo 4**

El cuarto capítulo presenta la implementación del sistema diseñado en el capítulo 2 sobre Android, por ser la plataforma de teléfonos inteligentes más utilizados en la actualidad.

## **Capítulo 5**

El quinto capítulo presenta los experimentos realizados con la aplicación final que validan el funcionamiento del sistema y además muestra los resultados alcanzados así como las limitantes encontradas.

## **Capítulo 6**

El sexto capítulo presenta las conclusiones del trabajo realizado.

## Estado del arte en sistemas de localización para interiores

### 2.1 Introducción

La localización se define como la acción y efecto de averiguar el lugar en el que se halla alguien o algo. En este sentido, el hombre ha buscado localizar personas y lugares a lo largo de toda su historia. Las civilizaciones antiguas usaban las estrellas para orientarse y llegar a un lugar específico, los exploradores utilizan brújulas y marcan árboles en el bosque para no perderse.

Este capítulo presenta el principio de funcionamiento del GPS y también algunas propuestas de sistemas de localización utilizados en interiores, a fin de ilustrar los tipos de sistemas que se ha desarrollado hasta este momento.

### 2.2 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

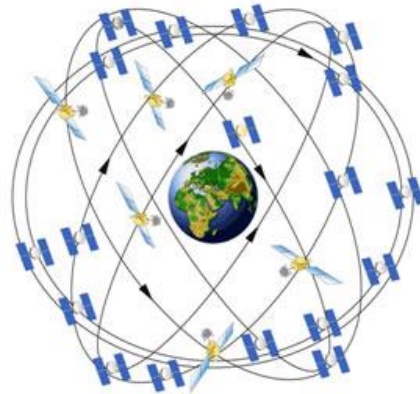
El GPS constituye el sistema de localización más utilizado en nuestros días, fue desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos para obtener información continua y precisa sobre posición, velocidad y tiempo.

Actualmente es mantenido y operado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Aunque en un principio su uso era exclusivamente militar, hoy en día es un sistema abierto, lo que significa que está disponible para cualquier persona que tenga un receptor GPS.

El sistema consiste en tres segmentos:

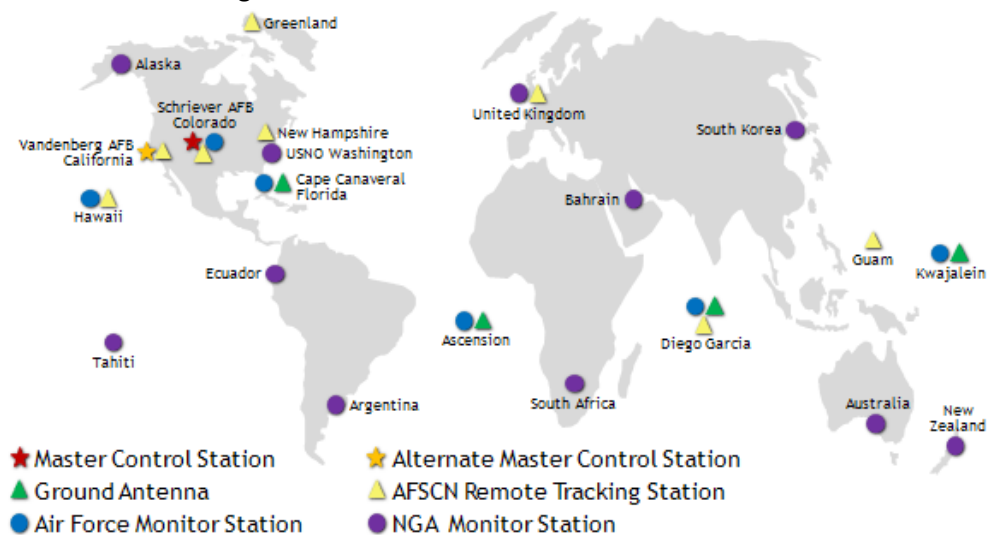
- **Segmento de Usuario:** Es el dispositivo receptor GPS que está en poder del usuario y que recibe las señales de los satélites y las utiliza para estimar posición, velocidad y tiempo. En la actualidad existen dispositivos receptores GPS para aviones, barcos, automóviles y personas. El dispositivo receptor GPS necesita recibir la señal de 4 satélites para calcular posición (coordenadas x,y,z) y tiempo.

- Segmento Espacial: Este segmento consiste de una constelación de satélites que transmiten señales de radio a los usuarios. La Fuerza Aérea de los Estados Unidos ha puesto en órbita 31 satélites y se asegura que al menos 24 de éstos estén disponibles el 95% del tiempo. Éstos se encuentran en 6 diferentes órbitas medias circulares a una altura de 20200 [km], ver figura 2.1. Existen 4 satélites en cada órbita y cada uno rodea la tierra dos veces al día.



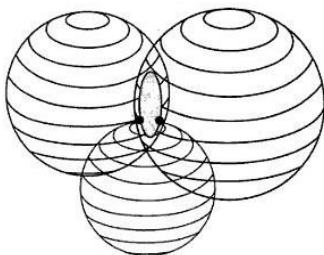
**Figura 2.1** Constelación de satélites GPS. Figura reproducida de [2].

- Segmento de Control: Este segmento está compuesto por una red de estaciones terrestres de seguimiento y control distribuidas por todo el mundo, ver figura 2.2. Incluye una estación maestra principal y una alternativa, 12 antenas de comando y control (4 de estaciones de monitorización y 8 de la Red de Control de Satélites de la Fuerza Aérea, AFSCN) y 16 sitios de monitorización (6 de la fuerza aérea y 10 de la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial, NGA). El fin del segmento de control es garantizar el funcionamiento del segmento espacial, monitoreando el estado del satélite y actualizando la información de navegación.



**Figura 2.2** Segmento de control del GPS distribuido alrededor del mundo. Figura reproducida de [2].

Las señales que envían los satélites son pseudoaleatorias en banda L que identifican inequívocamente a cada satélite, proporcionando la posición y la hora de éste. El dispositivo receptor GPS necesita recibir la señal de 4 satélites diferentes (aunque la mayor parte del tiempo recibe al menos 6) para medir el tiempo que tarda en llegar al usuario. Con esta medida obtiene la distancia a cada satélite y por medio de la triangulación de las distancias, ver figura 2.3, se obtiene la posición actual del usuario.



**Figura 2.3** Ubicación de usuario por medio de triangulación de distancias.  
Figura reproducida de [3].

La mayoría de las veces la precisión que pueden lograr los usuarios depende de factores que no tienen que ver con el operador, como lo son efectos atmosféricos, calidad de recepción, trayectorias múltiples y calidad del dispositivo receptor GPS.

En la página web oficial del gobierno de los Estados Unidos acerca del GPS [2], se menciona que, en el peor de los casos, el sistema GPS tendrá una precisión de 7.8 [m], aunque los dispositivos receptores GPS actuales tienen una precisión menor a 3 [m].

## 2.3 Sistemas de localización para interiores

El GPS es una solución para la localización en exteriores pero no es confiable en interiores debido a que la comunicación satelital requiere tener línea de vista. Debido a esta limitación la localización en interiores sigue siendo un reto. A continuación se presenta la investigación en el área de sistemas de localización para interiores en la que se han identificado algunas posibles técnicas y tecnologías que podrían resolver el problema.

### 2.3.1 Seguimiento de peatones con sensores inerciales montados en el Pie

El artículo [4], presenta un sistema de navegación llamado NavShoe, éste se puede utilizar tanto en interiores como en exteriores con o sin ayuda del GPS. El sistema se basa en un pequeño dispositivo (InertiaCube3) de alrededor de 13 [cm<sup>3</sup>], ver figura 2.4, que se monta en el pie del usuario.



**Figura 2.4** Wireless InertiaCube3 (derecha) y su receptor (izquierda). Figura reproducida de [4].

InertialCube3 cuenta con giróscopo, magnetómetro y acelerómetro. Estos tres sensores son triaxiales y son calibrados dentro del empaquetado para producir ejes sensibles alineados con éste. Este dispositivo es utilizado para obtener la orientación y desplazamiento del usuario, los datos son procesados en un EKF (*Extended Kalman Filter*) que permite una mejor aproximación de orientación y posición.

Las lecturas de la brújula presentan errores debido a perturbaciones externas, por ejemplo disturbios magnéticos que se pueden encontrar tanto en interiores como exteriores. Para tratar de evitar este tipo de errores toman sólo una medida de la brújula en el momento en que el usuario termina un paso. Cuando el GPS está disponible se usa un algoritmo de alineación que corrige la declinación magnética, mejorando la orientación del usuario.

Aunque se tiene la idea de usar NavShoe [4] con un PDA (*Personal Digital Assistant*), los datos en los experimentos fueron almacenados y procesados posteriormente en Matlab, se hicieron experimentos tanto en interiores como en exteriores. Los resultados mostrados en [4], indican que el error que tiene el sistema es del 0.3 % de la distancia viajada. Para los experimentos usando GPS en exteriores el autor menciona que se tiene una buena aproximación pero no la cuantifica.

### **2.3.2 Aproximación de calibración para brújula digital de dos ejes en un sistema de navegación de bajo costo para peatones**

El Sistema de Navegación para Peatones (PNS, *Pedestrian Navigation System*) [5], está compuesto por un GPS, una brújula digital de 2 ejes, y un acelerómetro triaxial. El acelerómetro y la brújula se utilizan para realizar un algoritmo de seguimiento (*Pedestrian Dead Reckoning Algorithm*, que es el proceso de estimación de la posición actual del usuario basándose en una posición anterior conocida) cuando no sea posible utilizar el GPS. El PNS se sujeta a la cintura del usuario y la antena del GPS se coloca en una gorra para tener línea de vista con los satélites, ver figura 2.5, los datos se guardan en una computadora para su posterior análisis.



**Figura 2.5** Sistema de navegación para peatones (PSN). Figura reproducida de [5].

El artículo aborda el problema de la calibración de la brújula digital de 2 ejes. Usando algoritmos de compensación para evitar errores que el autor clasifica como predecibles, como lo son la declinación magnética, la desalineación entre la plataforma y el usuario, efecto de hierro duro, efecto de hierro suave, inclinación de la plataforma y la oscilación del cuerpo al caminar.

Después de deducciones teóricas de estos errores, los autores llegan a un modelo que es complicado y sería ineficiente para calcular, para solucionar este problema de calibración mezclan los datos de la brújula con los del GPS a través de mínimos cuadrados para obtener las constantes de su modelo. La oscilación del cuerpo del usuario puede ser reducida por medio de un filtro de *Kalman*.

Los resultados muestran que el error cuadrático medio al utilizar el método de calibración se redujo de 127.1 [m] a 7.1 [m] después de caminar 932 [m]. Las pruebas realizadas en el artículo concluyen que el error después de 10 minutos de caminar sin señal del GPS es menor a 8 [m].

### **2.3.3 Localización de robot móvil usando una brújula electrónica para ambiente de pasillo**

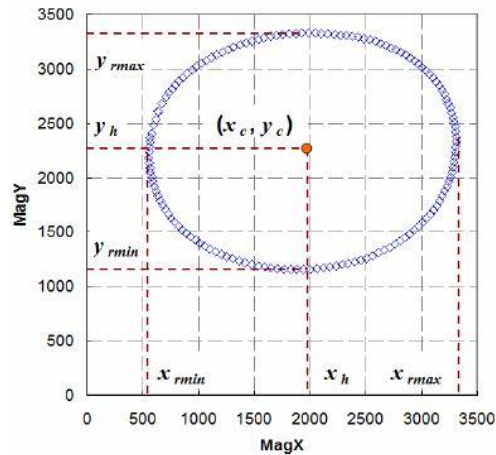
El artículo [6], presenta un método de localización utilizando una brújula electrónica de 2 ejes y un microcontrolador. En este trabajo se toma ventaja de las perturbaciones magnéticas que existen en el interior de un edificio y las convierten en una firma que puede ser leída por una brújula.

La brújula electrónica la colocaron sobre un robot utilizado para cargar comida, reportes médicos y otro tipo de cargas en hospitales. Sus pruebas fueron realizadas en un pasillo, el cual fue dividido en tres partes y en cada una se recolectaron datos de la brújula digital a fin de caracterizarla. Mientras el robot se desplaza se comparan los datos que se van recolectando con los almacenados previamente, si el error entre ambos es menor a un valor preestablecido, el robot determina su posición actual y su dirección.

Los resultados mostrados en el artículo indican que el robot pudo localizarse correctamente en cada parte del pasillo, el tiempo de cálculo fue rápido y el procesamiento sencillo. En el artículo se



Los valores medidos se ven afectados por interferencias magnéticas, como por ejemplo cableado o motores eléctricos. Al encontrarse en un ambiente con interferencias magnéticas, los datos forman una figura más parecida a una elipse que a un círculo, ver figura 2.7.



**Figura 2.7** Datos tomados de una brújula electrónica en un ambiente con disturbios magnéticos. Figura reproducida de [8].

El algoritmo de calibración traslada la figura al origen restándole una constante. Una vez que se tiene la figura en el origen se busca que el semieje mayor esté alineado con el eje más cercano, para esto se rota la figura un ángulo  $\theta$  y se calcula un factor de escala "s" para aplicarlo al semieje menor a fin de obtener una figura circular y posteriormente la figura se rota a su posición original. A cada lectura de la brújula se le sustrae la constante, después se rota y se le aplica el factor de escala "s" y finalmente se rota a su posición original para calcular el ángulo con el norte magnético.

La valoración de la aproximación la realizan mediante dos parámetros, la circularidad y el factor de distorsión. Los experimentos del artículo muestran que se obtuvieron errores de  $\pm 30^\circ$  en los peores casos, pero con la ayuda del factor de distorsión se pueden descartar ese tipo de datos erróneos.

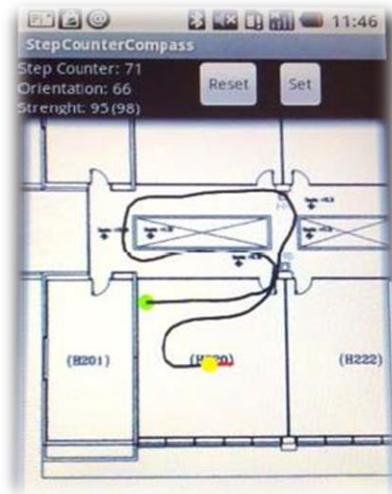
### 2.3.6 Sistema de navegación para usuario orientado a aplicaciones interiores

El sistema de navegación para interiores [9], hace uso del acelerómetro, la brújula y la cámara que están integrados en un teléfono inteligente, además de utilizar "*Dead reckoning algorithm*".

La posición inicial se obtiene mediante la cámara, en el momento en el que el usuario lee un código de barras de dos dimensiones (Datamatrix) posicionado en el edificio. El teléfono decodifica el código de barras y descarga el mapa para el piso específico de un servidor dedicado. La aplicación sigue el número de pasos que ha dado el usuario basado en los valores del acelerómetro, un paso es detectado cuando el valor obtenido por el acelerómetro es superior a un umbral alto y



sucesivamente inferior a un umbral bajo. La orientación se obtiene mediante la brújula. Cuando el usuario empieza a caminar la aplicación dibuja paso a paso su posición con una línea continua sobre el mapa que fue descargado, figura 2.8. Los autores mencionan errores debidos a la posición y a la detección de pasos pero no los cuantifican.



**Figura 2.8** Aplicación mostrando la ruta que ha seguido el usuario. Figura reproducida de [9].

### 2.3.7 Posicionamiento en interiores usando teléfono móvil con acelerómetro y brújula digital Integrados

En el artículo [10], se propone localizar a un usuario dentro de un edificio utilizando un dispositivo móvil que está equipado con un acelerómetro y una brújula, con el acelerómetro se realiza la detección de pasos y con la brújula se obtiene la dirección de éstos. Además utiliza información de la arquitectura del edificio para mejorar la aproximación.

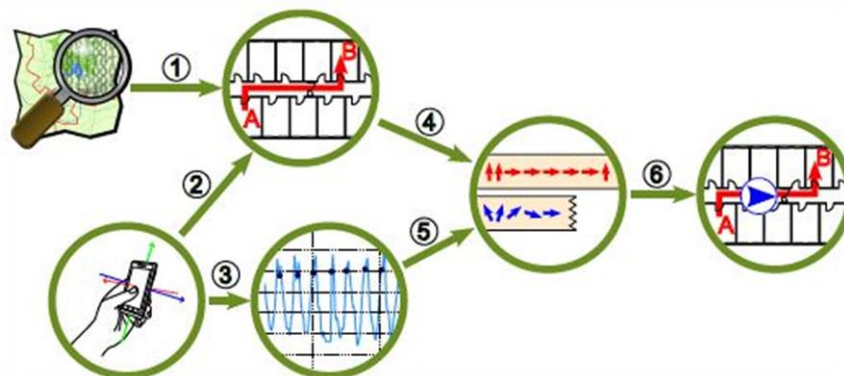
Para conocer la posición inicial del usuario se utiliza un GPS. La trayectoria se actualiza utilizando los pasos grabados y la longitud de paso promedio del usuario, para mejorar la aproximación se utiliza un mapa del edificio dividido por áreas (un corredor, una oficina, un laboratorio, etc.) con transiciones entre una y otra bien definidas (puertas). Si en cualquier tiempo un desplazamiento indica que se está pasando de un área a otra, el sistema verificará si existe una transición válida, si ésta existe se cambia de área, pero si no existe, el sistema buscará la posición más cercana donde se pudo haber dado ese paso y se corrige la posición del usuario. En este trabajo no se muestran realización de pruebas, y no presentan resultados de la precisión de su sistema.

### 2.3.8 FootPath: Mapa preciso basado en navegación en interiores utilizando teléfonos inteligentes

FootPath [11], es un sistema de localización para interiores basado en mapas que hace uso del acelerómetro y la brújula que se encuentran en un teléfono inteligente. Este sistema provee la ruta al usuario giro a giro para llegar a su destino y lo localiza durante todo su trayecto mediante una aplicación en un teléfono inteligente.

La forma en la que trabaja este sistema de navegación para interiores es la siguiente, figura 2.9:

- El sistema obtiene los mapas de OpenStreetMap que es un proyecto para crear y distribuir de forma libre datos geográficos (mapas de exteriores e interiores de edificios).
- El usuario selecciona su posición actual y el lugar al que desea llegar, por medio de la pantalla del teléfono inteligente, con esta información el teléfono calcula la mejor ruta para que el usuario llegue al destino deseado, y esta ruta se convierte en pasos esperados con direcciones específicas.
- El teléfono hace uso del acelerómetro para detectar los pasos del usuario, en el momento en el que se detecta un paso se graba la lectura de la brújula para conocer la dirección en la que se dio dicho paso.
- Para compensar la imprecisión en la detección de pasos y la estimación de la dirección, se alinea la dirección de los pasos detectados con la dirección de los pasos esperados que tiene en la ruta, usando un algoritmo de secuencia de alineamiento. Finalmente el usuario obtiene la realimentación de su posición en la ruta establecida por el sistema.



**Figura 2.9** Flujo de información durante la navegación con FootPath. Figura reproducida de [11].

El autor menciona haber obtenido una precisión de 1.6 [m] en pruebas realizadas en el interior de un edificio.

### **2.3.9 Nuevo enfoque de la navegación en interiores empleando estadísticas de movimiento**

El sistema [12], está basado en un método estadístico que estima la posición combinando posicionamiento por medio de WiFi (WPS, *WiFi Positioning System*) y navegación por medio de sensores. Los resultados experimentales verifican que este sistema tiene una precisión de 2 [m].

El WPS consiste en un modelo de propagación y un algoritmo de búsqueda, éste correlaciona los valores medidos por el WiFi de un dispositivo móvil, con una base de datos pre-generada de la simulación de un modelo de propagación para cada uno de los puntos de acceso en el edificio, para encontrar la posición más probable del usuario. La navegación con sensores utiliza el acelerómetro y la brújula del dispositivo móvil para determinar el cambio relativo en la posición, la brújula es utilizada para estimar la dirección en la que viaja el usuario y el acelerómetro para determinar la velocidad a la que se desplaza. Este sistema puede calcular el desplazamiento relativo con la localización previa como referencia.

Cuando se combinan los dos sistemas, la navegación con sensores mide qué tanto se ha desplazado el usuario desde la última medida del WPS. Los sensores utilizados tienen un error potencial en estas medidas, sobre todo en la medición de la velocidad, por lo que para ajustar la funcionalidad ajustaron una distribución gaussiana. La probabilidad de que un usuario se haya movido de un lugar a otro, está dada por la multiplicación de la probabilidad de ambas localizaciones. Para determinar el lugar más probable del usuario, se combina la probabilidad de que un usuario se haya movido de un lugar a otro, con la probabilidad del WPS y de esta manera se obtiene la probabilidad de que el usuario se encuentre en cierta posición.

Para la navegación un nodo es una habitación, un vestíbulo, unas escaleras, etc. Y los enlaces son los caminos que los conectan, de esta manera se utiliza el algoritmo de Dijkstra [17] para alcanzar el destino deseado por el usuario.

### **2.3.10 Orientación basada en posicionamiento WiFi en el teléfono Google Nexus One**

El sistema [13], está basado en el uso de redes inalámbricas de área local utilizando la brújula, el magnetómetro y el WiFi del teléfono Google Nexus One, ver figura 2.10. El autor menciona que el error de distancia promedio es de 1.82 [m] y se logró tener una precisión del 90% dentro de una región de 2.45 [m] de radio.

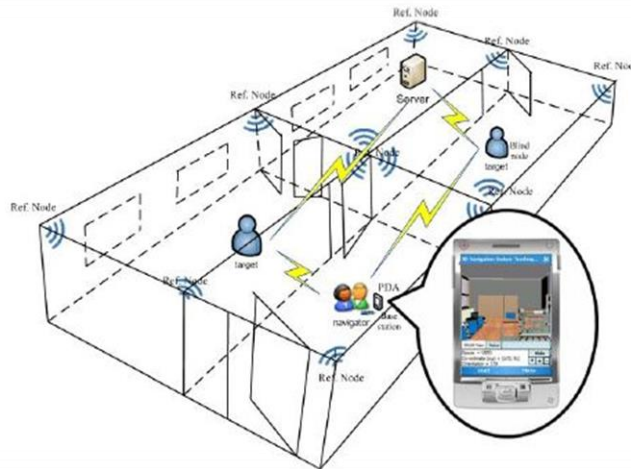


**Figura 2.10** Teléfono Google Nexus One mostrando la interfaz de usuario. Figura reproducida de [13].

El método hace uso de la “localización por medio de huellas digitales” (location-fingerprinting) que consiste en comparar la señal recibida por el dispositivo con una base de datos pregrabada de la señal recibida en distintos lugares del edificio de diferentes puntos de acceso, de esta manera se encuentra la localización más probable. El filtro de orientación hace uso de la brújula y del magnetómetro del teléfono para obtener la dirección en la cual se está desplazando el usuario, de esta manera se obtiene un área de desplazamiento que se utilizará para filtrar la base de datos con la cual se compara la señal recibida en el teléfono. Finalmente se hace uso del algoritmo de región de confianza de Newton para obtener la trayectoria del usuario en un área circular de manera iterativa.

### **2.3.11 Red inalámbrica de sensores basada en seguimiento de usuarios móviles en interiores en 3D**

El sistema descrito en [14 - 16], puede hacer el seguimiento de objetivos dentro del rango de monitorización de la red inalámbrica de sensores y mostrarlos a través de un PDA (Estación Base). Éste se encuentra equipado con un nodo TIP710CM, para recibir los datos mediante el protocolo IEEE 802.15.4, también conocido como ZigBee. El sistema utiliza nodos de referencia posicionados dentro del techo de cada piso del edificio (nodos CC2431 o nodos CC2420, estos nodos también utilizan ZigBee) que son utilizados para estimar la posición de los objetivos, mediante medidas de RSSI (Received Signal Strength Indicator). Los objetivos son equipados con nodos CC2431 (nodos ciegos) y una brújula digital, que manda información a la estación base para actualizar su ubicación cada cierto intervalo de tiempo, figura 2.11.



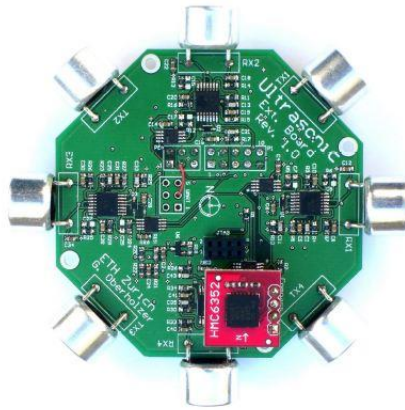
**Figura 2.11** Red inalámbrica de sensores. Figura reproducida de [15].

El sistema utiliza un modelo de RSSI, por medio de este modelo el nodo ciego puede calcular la distancia a los nodos de referencia, la señal RSSI previamente se suaviza por medio de un filtro para obtener mejores resultados. Una vez que se tienen las distancias a los nodos de referencia se utiliza un modelo de triangulación que requiere al menos de 3 distancias del nodo ciego a distintos nodos de referencia para obtener su posición, mientras más medidas se tengan se puede obtener una mejor aproximación de la posición. Los datos se pueden mostrar mediante un ambiente virtual en 3D, mapas 2D y un servicio que brinda información acerca del rastreo de los objetivos y de ciertos lugares de interés en el edificio.

Los experimentos realizados con este sistema muestran que se tiene un error en el posicionamiento entre 1.8 [m] y 2.2 [m], sin embargo se dice que obtienen mejores resultados si el usuario camina a velocidad constante.

### **2.3.12 SpiderBat: Incrementar redes inalámbricas de sensores con información de distancia y ángulo**

SpiderBat [18], es una plataforma para redes de sensores, está compuesta por un microcontrolador, una brújula, 4 transmisores y 4 receptores ultrasónicos que operan a 40 [kHz] con un ancho de banda de 1 [kHz]. Los transmisores y receptores están posicionados alrededor de la plataforma alternadamente de modo que se tiene un patrón omnidireccional que permite medir distancias y detectar ángulos relativos entre nodos, que se transforman en ángulos absolutos con los datos que proporciona la brújula, ver figura 2.12. Esta plataforma se conecta a un nodo de una red de sensores.



**Figura 2.12** Plataforma SpiderBat. Figura reproducida de [18].

Para medir las distancias entre plataformas SpiderBat, se envía un paquete de radio seguido de un pulso ultrasónico, se mide el tiempo entre la recepción de ambos pulsos y se multiplica por la velocidad de propagación del pulso. La señal ultrasónica puede llegar a cualquiera de los 4 receptores en la plataforma, el ángulo de recepción se calcula mediante la diferencia de tiempos de recepción de dos receptores. Un algoritmo de posicionamiento utiliza las distancias, los ángulos medidos y la posición conocida de ciertos nodos, para asignar coordenadas a los demás.

Pruebas realizadas por el autor hechas con cuatro nodos en un ambiente interior, muestran que el error al medir la distancia es menor a 5.7 [cm], aunque la máxima distancia que se puede medir es de 15 [m]. En un ambiente exterior el error es menor de 52 [cm]. Por otro lado el error en la medición del ángulo es menor a 5°.

## 2.4 Análisis de Sistemas de Localización para Interiores

Los sistemas presentados son variados y cada uno propone una solución diferente al reto que presenta la localización en interiores, muchos de ellos tienen elementos en común como el uso de la brújula, aunque cada uno la utiliza de manera diferente. Las brújulas electrónicas sufren de perturbaciones magnéticas que son inherentes a interiores ya que son causadas por el cableado eléctrico, el material del cual está hecho el edificio, computadoras, aparatos electrodomésticos, etc. En algunos casos se menciona que se obtienen mejores resultados después de calibrar la brújula [4], [5], [8], [11], [12], en otros no se menciona que se haya calibrado [6], [7], [9], [10], [13], [14], [15], [16], [18] y en otros casos se restringe la posición en la que debe estar la brújula [6], [7], [8], [14], [15], [16], [18] y por ende el usuario.

Otro aspecto en el que difieren muchos, es cómo obtener la posición inicial del usuario, algunos la obtienen por medio del GPS [10], otros la obtienen en el momento en el que se descarga el mapa [9], otros prefieren que el usuario la indique [11], unos prefieren solamente indicar en que espacio está contenido el usuario [12] y finalmente otros utilizan mediciones de intensidad de la señal de RF

[12], [13], [14], [15], [16]. Una correcta posición inicial es un aspecto muy importante dado que de no ser así, ésta se reflejará en un error antes de aplicar cualquier algoritmo de seguimiento.

Uno de los problemas principales de usar señales inalámbricas para la localización es que se necesita de grandes bases de datos pregrabadas de la señal a lo largo de todo el edificio para que pueda funcionar correctamente. Aparte de que si la arquitectura del edificio es cambiante, las bases de datos pregrabadas se vuelven obsoletas y se tienen que cambiar también. El proceso de toma de datos para caracterizar cada lugar del edificio lleva mucho tiempo en lugares no tan grandes, como laboratorios de universidades por ejemplo, lo que lo hace impráctico para implementarse en un edificio del tamaño de un centro comercial. La necesidad del uso de infraestructura pre-establecida en el edificio en este tipo de métodos de localización [14], [15], [16] es otra desventaja, ya que la precisión se ve reflejada en el costo del sistema. Otro aspecto a tomar en cuenta es que no siempre es posible utilizar señales inalámbricas dado que éstas pudieran interferir con equipos de vital importancia, por ejemplo equipo médico [6].

El uso del acelerómetro como contador de pasos es muy constante [9], [10], [11] debido a que la oscilación del cuerpo al caminar se refleja en una alta variación de las lecturas de éste y por ende en un gran error en el momento de medir velocidad y distancia.

Un sistema de localización para interiores debe permitir el libre desplazamiento del usuario, sin limitaciones en los movimientos que debe o no de hacer. Finalmente el algoritmo de seguimiento debe de ser sencillo, dado que si éste es complejo se reflejará en un uso masivo de recursos para realizar cálculos y también en un retardo en la muestra de resultados al usuario.

La localización en interiores continúa siendo un reto difícil de enfrentar, tanto que en ninguno de los sistemas de localización para interiores mostrado se habla de que ya esté comercialmente disponible para usarse en museos, centros comerciales o universidades. Con la investigación realizada en este capítulo se han identificado tecnologías que son utilizadas para la localización en interiores, éstas se presentan en la tabla 2.1.

Sistema	GPS	Brújula	Acelerómetro	Otro	Error	Forma de uso
NavShoe [4] (I/E)	Usado para calibración	Una medida cada paso (giróscopo y magnetómetro triaxial)	Detecta velocidad de paso	Análisis posterior	0.3% de la distancia viajada	PDA y pie de usuario
AN ADAPTIVE CALIBRATION APPROACH FOR A 2-AXIS DIGITAL COMPASS IN A LOW-COST PEDESTRIAN NAVIGATION SYSTEM [5] (I/E)	Usado para la calibración de la brújula	Calibración por mínimos cuadrados	Obtener desplazamiento	Análisis posterior	Error cuadrático medio 7.1 [m]  Después de 10 minutos sin GPS error de 8 [m]	Computadora y electrónica sujeta a la computadora del usuario
MOBILE ROBOT LOCALIZATION USING AN ELECTRONIC COMPASS FOR CORRIDOR ENVIRONMENT [6] (I)	-----	Caracteriza perturbaciones magnéticas en un pasillo	-----	Localización no exacta, solo indica parte del pasillo	El robot pudo localizarse correctamente en el experimento	Plataforma posicionada sobre el robot
GUARANTEED NAVIGATION WITH AN UNRELIABLE BLIND ROBOT [7] (I)	-----	Orientación del robot para algoritmo de transición entre esquinas	-----	Sensor de contacto  Mapa	El algoritmo cumplió su cometido	Plataforma posicionada sobre el robot
APPLICATION OF ELECTRONIC COMPASS FOR MOBILE ROBOT IN AN INDOOR ENVIRONMENT [8] (I)	-----	Calibración en el dominio magnético  Orientación del robot	-----	Con factor de distorsión se pueden descartar orientaciones erróneas	Circularidad  Factor de distorsión  Peor caso 30 ° de error	Plataforma sobre el robot
INERTIAL NAVIGATION SYSTEM FOR USER – CENTRIC INDOOR APPLICATIONS [9] (I)	-----	Orientación del usuario	Detección de pasos	Cámara (posición inicial) Algoritmo para mejorar posición inicial	No cuantifica error	Teléfono inteligente
INDOOR POSITIONING USING A MOBILE PHONE WITH AN INTEGRATED ACCELEROMETER AND DIGITAL COMPASS [10] (I)	Utilizado para obtener posición inicial	Dirección de pasos del usuario	Detección de pasos	Arquitectura del edificio (división en áreas)	No muestran pruebas ni resultados	Teléfono inteligente
FootPath [11] (I)	-----	Dirección de pasos del usuario	Detección de pasos Comparación con pasos esperados	Posición Inicial y final indicada por el usuario  Teléfono perpendicular a la dirección de desplazamiento  OpenStreetMap	Error de 1.6 [m]	Teléfono inteligente



<b>A NOVEL INDOOR NAVIGATION APPROACH EMPLOYING MOTION STATISTICS [12] (I)</b>	-----	Orientación del usuario	Utilizado para medir velocidad	Dijkstra Posicionamiento WiFi (modelo de propagación) Uso de probabilidades	Error de 2[m]	Teléfono inteligente
<b>ORIENTATION-BASED WI-FI POSITIONING ON THE GOOGLE NEXUS ONE [13] (I)</b>	-----	Región de orientación de desplazamiento	-----	Filtro de orientación Región de confianza de Newton Fingerprinting con varios puntos de acceso	Error de 1.82 [m]	Teléfono inteligente
<b>WSN BASED 3D MOBILE INDOOR MULTIPLE USER TRACKING [14] [15] [16] (I)</b>	-----	Orientación del usuario	-----	Velocidad constante VRML, algoritmo de dibujado Triangulación de la señal Nodos Zigbee TIP710CM CC2431 CC2420	Error entre 1.8 [m] y 2.2 [m]	PDA Resultados en 3D, 2D, datos.
<b>SpiderBat [18] (I/E)</b>	-----	Ángulo entre nodos	-----	Rx y Tx ultrasónicos Transmisión broadcast y ultrasónica Nodos contenidos en un plano	Menor a 5.7 [cm] en interiores y 52[cm] en exteriores Distancia máxima 15 [m] Ángulo menor a 5°	Red de sensores inalámbrica
<b>Sistema diseñado en esta Tesis</b>	-----	Utilizado para conocer la dirección de desplazamiento	Utilizado para detectar movimiento. Algoritmo On / Off	Uso de bluetooth para detectar puntos de encuentro con otros usuarios (nodos). Unión de trayectorias	Error de 3.29 [m]	Teléfono inteligente

**Tabla 2.1** Tecnologías usadas en sistemas de localización para interiores.

# Capítulo 3

## Diseño del sistema de seguimiento y localización para interiores

### 3.1 Introducción

En el capítulo anterior se presentaron algunas propuestas de sistemas de localización para interiores, por medio de éstas se identificaron las tecnologías utilizadas, ver tabla 2.1, siendo una constante la utilización de la brújula digital.

En este capítulo se presenta el diseño conceptual del sistema de seguimiento y localización para interiores utilizando brújula digital, acelerómetro, y bluetooth; características que cualquier teléfono inteligente posee.

### 3.2 Sistema de seguimiento y localización para interiores

El sistema de seguimiento y localización para interiores desarrollado en esta tesis hará uso de los sensores que tiene integrado un teléfono inteligente, dado que hoy en día este tipo de dispositivos son muy populares y los usuarios no se separan de éstos en ningún momento, se considera que es una buena solución para dar seguimiento a una persona sin limitar de manera importante los movimientos que puede o no realizar.

La idea principal de nuestro sistema es utilizar la brújula digital para detectar cambios en la dirección de desplazamiento del usuario y de esta forma obtener su trayectoria, el acelerómetro para detectar movimiento y el bluetooth para detectar puntos de encuentro con otros dispositivos y por ende

otros usuarios. Con los datos obtenidos se podrán superponer todas las trayectorias obtenidas, por medio de los puntos de encuentro. Si además, esta información puede ser entregada a los diferentes usuarios del sistema, una persona puede localizar a otra por medio de los nodos en su trayectoria o en otras.

Una vez explicado lo anterior se puede dividir el sistema de seguimiento y localización en los siguientes subsistemas:

- **Subsistema de seguimiento de trayectoria:** Por medio de la brújula digital se detectará el cambio de dirección en el desplazamiento del usuario y con esto se obtendrá la trayectoria del usuario.
- **Subsistema de detección de movimiento:** Por medio del acelerómetro se detectará cuando el teléfono está o no en movimiento.
- **Subsistema de detección de nodos:** Por medio de bluetooth se identificará cuando se encuentren otros dispositivos en la cercanía de la trayectoria del usuario.
- **Subsistema de unión de trayectorias:** Utilizando los nodos se superpondrán las trayectorias de los usuarios del sistema en un plano.

### 3.3 Subsistema de seguimiento de trayectoria

La aguja de una brújula indica en donde se encuentra el norte magnético, idealmente apunta en todo momento al mismo punto, suponiendo que un usuario tiene una brújula en la mano y está caminando hacia el norte magnético, la aguja apunta hacia enfrente; al dar un giro a la derecha, cambia  $-\alpha^\circ$  la dirección de desplazamiento, pero la aguja tiene que seguir apuntando al norte magnético por lo que esta giraría en dirección contraria  $\alpha^\circ$ .

Suponiendo que el usuario que trae consigo la brújula camina a una velocidad constante, podemos calcular incrementos en un plano coordenado  $xy$  con las siguientes ecuaciones:

$$\Delta x = v_{promedio} * \Delta t * \cos(-\alpha) \dots \dots \dots (3.1)$$

$$\Delta y = v_{promedio} * \Delta t * \sin(-\alpha) \dots \dots \dots (3.2)$$

Donde:

- $v_{promedio}$ : Es la velocidad de desplazamiento del usuario en [m/s].
- $\Delta t$ : Es el intervalo de tiempo entre dos muestras consecutivas en [s].
- $\alpha$ : Es el ángulo medido por la brújula normalizado al primer valor tomado.

Si aplicamos las ecuaciones 3.1 y 3.2 a una serie de valores de la brújula digital, es posible trazar la trayectoria que sigue un usuario en un plano coordenado xy, siempre y cuando también se mida el intervalo entre muestras.

La limitante de este subsistema es que el usuario no siempre se está desplazando y se deben de discriminar las muestras que se tomaron mientras el usuario estaba en reposo, el encargado de dicha tarea es el subsistema de detección de movimiento.

### 3.4 Subsistema de detección de movimiento

El acelerómetro es un sensor que mide la aceleración aplicada al teléfono inteligente, este sensor entrega tres valores correspondientes a los tres ejes del dispositivo. En [9], [10], [11] el acelerómetro es usado como contador de pasos, pero este método tiene errores debido al estilo de caminar y la longitud de paso que tiene cada persona, estos errores se ven reflejados en el momento de medir velocidad y distancia. Por tal razón, en el desarrollo de este sistema se supondrá que todos los usuarios caminan a una velocidad promedio.

Cuando el dispositivo se encuentra en estado de reposo el acelerómetro está midiendo únicamente la aceleración de la gravedad, por lo cual la resultante de las tres componentes debe de ser aproximada al valor de ésta, que es aproximadamente 9.81 [m/s<sup>2</sup>]. Cuando el usuario se mueve, el dispositivo se ve sometido a aceleraciones provocadas por la oscilación del cuerpo al caminar provocando que la resultante varíe.

Como se dijo anteriormente, en estado de reposo la resultante debe de ser aproximada al valor de la gravedad 9.81 [m/s<sup>2</sup>]. En la figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo On / Off, éste utiliza una tolerancia alrededor del valor de la gravedad, seleccionando un umbral superior y un umbral inferior. El algoritmo toma los valores entregados por el acelerómetro en un tiempo dado *TiempoActual* para calcular la resultante, ecuación 3.3.

$$a_{resultante} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 \dots \dots \dots} \quad (3.3)$$

Donde:

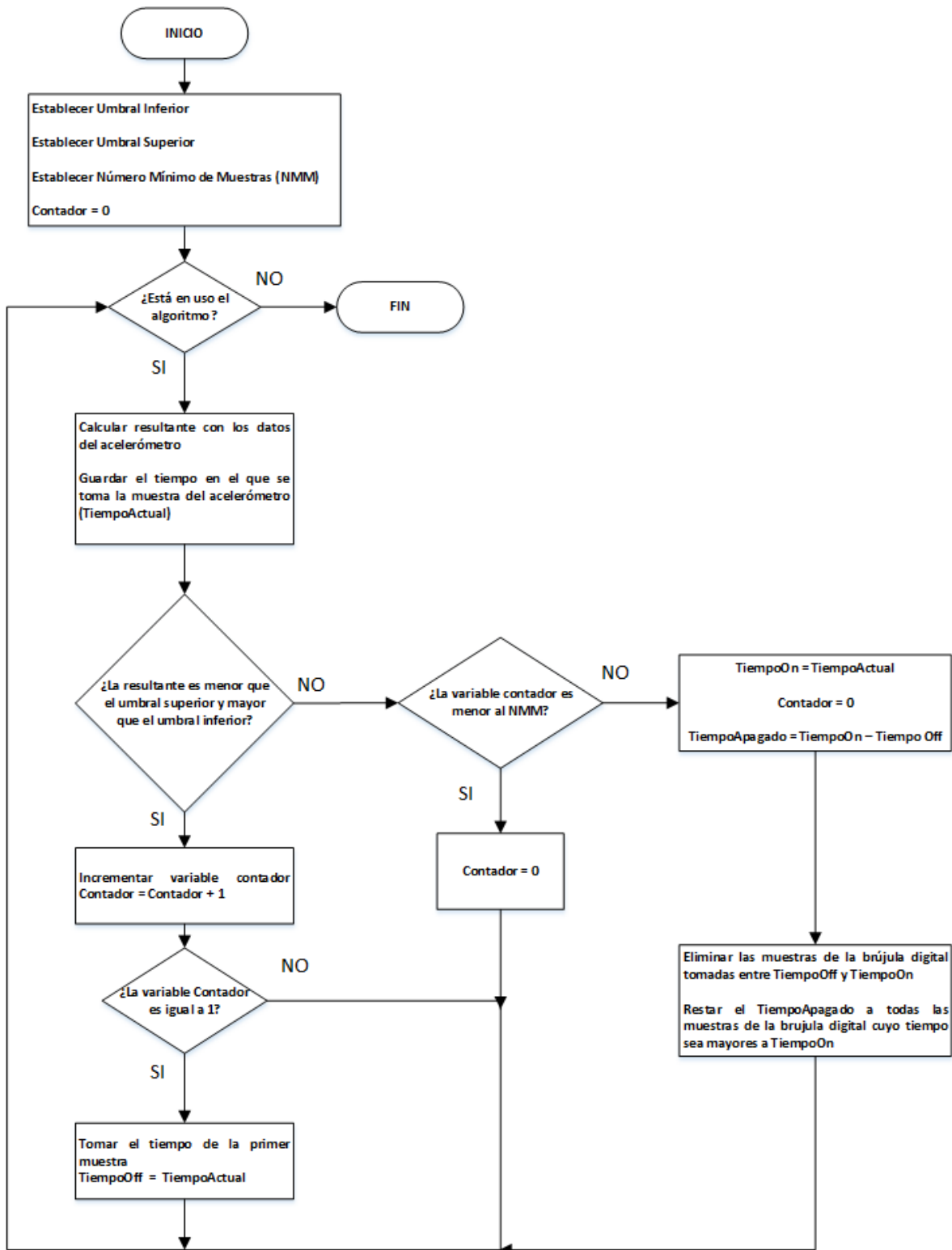
- $a_{Resultante}$ : Es el módulo de la resultante en [m/s<sup>2</sup>].
- $a_x, a_y$  y  $a_z$ : Son los valores entregados por el acelerómetro en un tiempo dado.

Si el teléfono inteligente se encuentra en estado de reposo,  $a_{resultante}$  tendrá valores entre el umbral inferior y el umbral superior, en caso contrario tendrá cualquier valor positivo incluyendo los valores que tiene en estado de reposo, por tal razón se establece un número mínimo de muestras consecutivas ( $NMM$ ) entre los umbrales que se deben cumplir para decir que el dispositivo está en estado de reposo.

El algoritmo On / Off compara de manera iterativa el valor  $a_{resultante}$  con el umbral superior y el umbral inferior y cuenta el número de veces consecutivas que  $a_{resultante}$  se encuentre entre ambos umbrales, obteniendo los siguientes posibles resultados:

- Si el valor de  $a_{resultante}$  se encuentra entre el umbral inferior y el umbral superior, se incrementa la variable contador, almacenando el tiempo de las muestras del acelerómetro cuando la variable contador es igual a uno (*TiempoOff*).
- Si el valor de  $a_{resultante}$  está fuera del intervalo de los umbrales y la variable contador es menor que el  $NMM$ , la variable contador se hace igual a cero.
- Si el valor de  $a_{resultante}$  está fuera del intervalo de los umbrales y la variable contador es mayor que el  $NMM$ , la variable contador se hace igual a cero y se guarda el tiempo de las muestras con las que se calculó la última resultante (*TiempoOn*). Se eliminan las muestras de la brújula digital entre las variables *TiempoOff* y *TiempoOn* y se resta la diferencia entre *TiempoOn* y *TiempoOff* a todas las muestras de la brújula digital cuyo tiempo sea mayor a *TiempoOn*.

Una vez discriminadas las muestras por medio del algoritmo On / Off, se tiene una mejor aproximación del recorrido que sigue el usuario. Para superponer todas las rutas del sistema, se tienen que detectar los puntos de la trayectoria en los cuales se vieron a otros dispositivos, el encargado de esta tarea es el subsistema de detección de nodos.

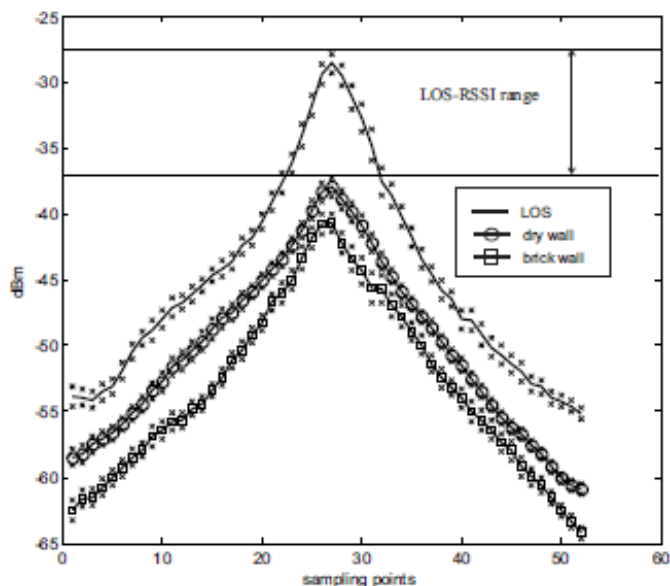


**Figura 3.1** Diagrama de flujo del algoritmo On / Off, indica si el usuario se encuentra en movimiento o en reposo.

### 3.5 Subsistema de detección de nodos

La detección de nodos es basada en la idea que utiliza [19], que es un método capaz de detectar condiciones de línea de vista entre nodos, usando sólo medidas de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*, Indicador de Potencia de Señal Recibida) y nodos móviles.

En [19] utilizan el hecho de que el valor de RSSI decrece mientras que la distancia entre los nodos aumenta y que la señal tiene atenuación adicional cuando se ve obstruida. De tal manera que el RSSI del enlace alcanza su máximo valor cuando la distancia entre dos nodos es mínima y no existe obstáculo entre éstos. Para definir el intervalo de RSSI en el que dos nodos se encuentran en línea de vista, se analiza el comportamiento de los valores de RSSI en interiores. Realizan experimentos en los que un nodo móvil (un usuario cargando una laptop) recorre un corredor en el que se encuentra un nodo fijo en línea de vista, mientras el nodo móvil recorre el corredor toma muestras de RSSI del nodo fijo aproximadamente cada segundo. Después repiten el mismo experimento; pero con la diferencia de que el nodo fijo ya no se encuentra en línea de vista, éste se encuentra primero detrás de una pared falsa y después detrás de una pared de ladrillo. Al comparar los datos obtenidos en los tres experimentos, figura 3.2, muestran que el valor del RSSI aumenta conforme la distancia decrece y es máximo cuando la distancia entre los nodos es mínima. También muestran que existe un intervalo de valores de RSSI en línea de vista (LOS-RSSI range) que no pueden ser alcanzados por los casos en los que no existe línea de vista, esto les permite distinguir entre condiciones de línea de vista y de no línea de vista.



**Figura 3.2** Muestras de RSSI tomadas entre nodos móviles y nodos fijos en línea de vista y no línea de vista. Figura reproducida de [19].

En [19] utilizan tarjetas inalámbricas que usan Wi-Fi (802.11g) para la conexión inalámbrica y crean redes ad hoc entre los nodos. Los teléfonos inteligentes, aunque cuentan con Wi-Fi no cuentan con soporte para redes ad hoc. Dado que la transferencia de archivos entre estos dispositivos generalmente se hace a través de bluetooth, este protocolo será el utilizado para detectar otros dispositivos a lo largo de las trayectorias.

El subsistema de detección de nodos utilizará bluetooth para encontrar a otros teléfonos a lo largo de la trayectoria. Al igual que en [19] se harán pruebas que determinen cuándo un teléfono está en línea de vista y cuándo no, encontrando el umbral de decisión de tal manera que:

- Existe línea de vista cercana si se cumple que:

$$RSSI_{medido} \geq UmbralRSSI \dots \dots \dots (3.4)$$

- No existe línea de vista cercana si se cumple que:

$$RSSI_{medido} < UmbralRSSI \dots \dots \dots (3.5)$$

El algoritmo de detección de nodos, figura 3.3, hace uso de la las ecuaciones 3.4 y 3.5 para determinar si existe o no línea de vista cercana con otros dispositivos. El algoritmo funciona de la siguiente manera:

- Se debe establecer por medio de experimentos similares a los de [19] un umbral (*UmbralRSSI*) para detectar si existe o no línea de vista.
- Se buscarán dispositivos bluetooth, cada vez que se encuentre uno se obtendrá su información básica:
  - Nombre.
  - MAC.
  - RSSI.
  - Tiempo en el que fue encontrado.
- Si el RSSI del dispositivo encontrado es igual o superior al *UmbralRSSI*, se guardarán los datos obtenidos al momento de su descubrimiento.
- En caso contrario se seguirán buscando dispositivos.



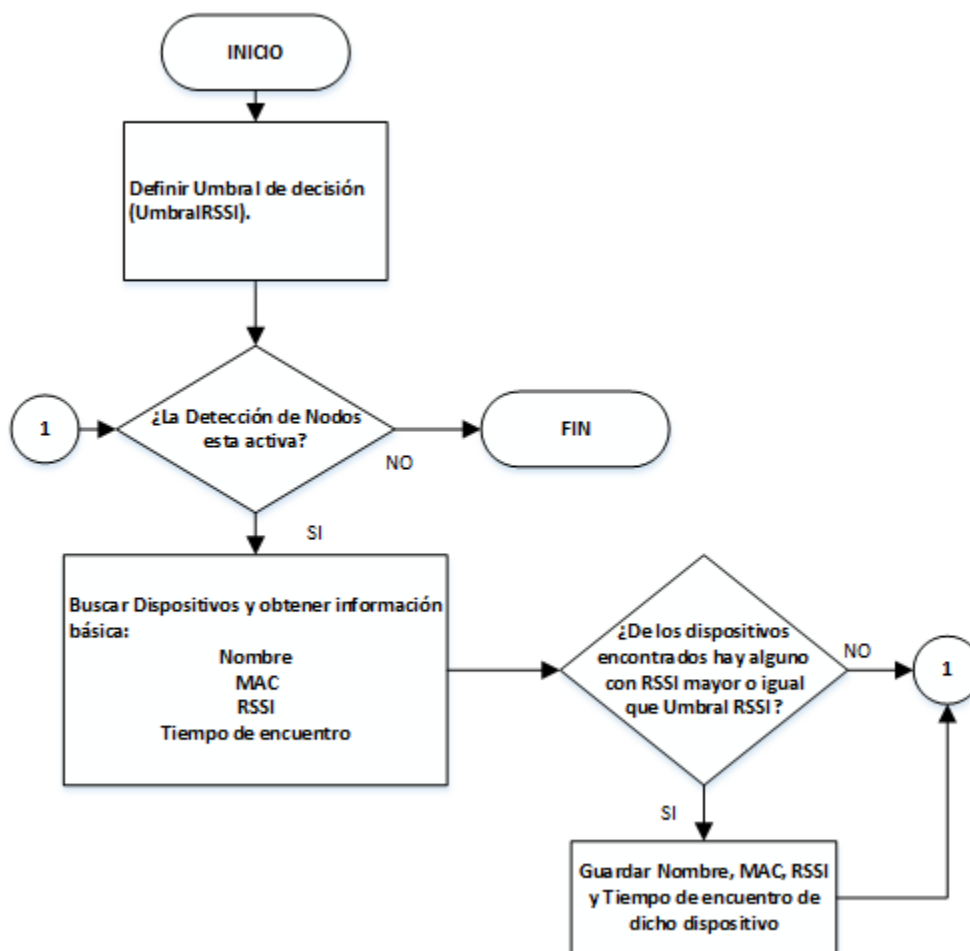


Figura 3.3 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos.

### 3.6 Subsistema de superposición de trayectorias

Un aspecto esencial de la localización en interiores es la posición inicial del usuario, una mala localización inicial se verá reflejada en un error mucho antes de aplicar cualquier algoritmo de seguimiento. Con la propuesta que se presenta en esta tesis, éste no será un problema dado que la trayectoria de un usuario tendrá sentido hasta que se encuentra a otro usuario y se unan sus trayectorias por medio de un punto de encuentro (nodo), para empezar el seguimiento y la posterior localización.

Este subsistema hace uso del algoritmo de unión de trayectorias, éste tomará el recorrido con el mayor número de nodos, y a partir de éste superpondrá el segundo con mayor número de nodos. Este proceso se repetirá hasta que se ocupen todos los nodos de los recorridos.

Cuando se traza la trayectoria de un usuario no se conoce su punto de partida, por lo cual se toma como inicio el origen del sistema de referencia. En la figura 3.4 se muestra una trayectoria supuesta y un nodo a manera de ejemplo, en ésta se dio una vuelta a la derecha, después se siguió de frente, y por último una vuelta a la izquierda para seguir de frente.

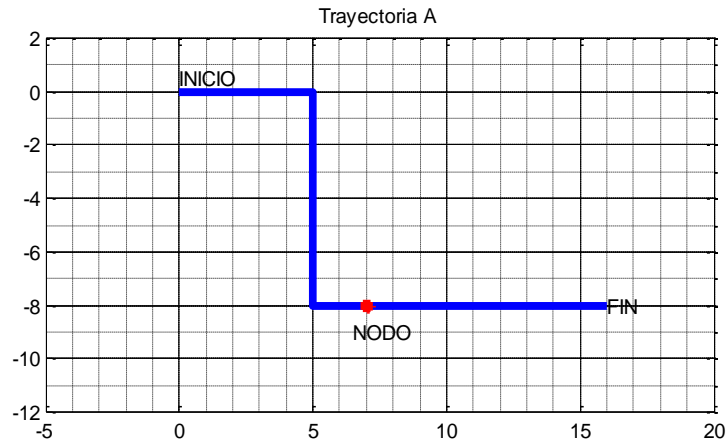


Figura 3.4 Trayectoria supuesta de un usuario A.

Dado que la ruta anterior inicia en el origen, ésta tiene sentido hasta que se une con otra por medio del nodo. En la figura 3.5 se muestra la trayectoria supuesta de un usuario B, en ésta también se muestra el punto de encuentro con el usuario A. Como se puede observar ésta se trazó desde el origen ya que no se conoce el punto de partida de dicho usuario. El nodo es el punto en común en ambos recorridos y a partir de éste se pueden unir, trasladando cualquiera de las dos trayectorias para que coincida el punto de encuentro.

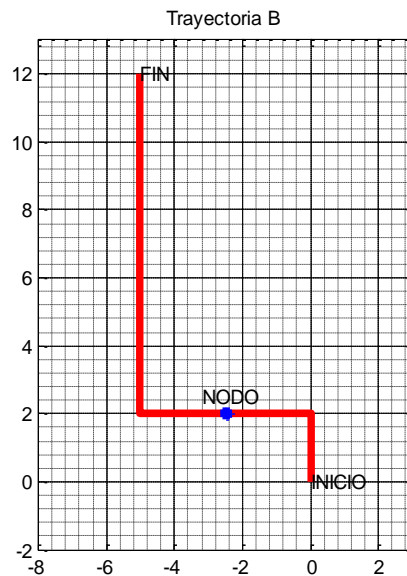


Figura 3.5 Trayectoria supuesta de un usuario B.

Para hacer coincidir el punto de encuentro, se tomará como base la trayectoria del usuario A. Para hacer la traslación se necesita sumar una constante a cada valor del plano coordenado (x,y) (Cx constante en el eje x y Cy constante en el eje y) de la trayectoria del usuario B, estas constantes se calculan utilizando las coordenadas del nodo en común de ambos recorridos.

$$Cx = X_{NA} - X_{NB} \dots \dots \dots (3.6)$$

$$Cy = Y_{NA} - Y_{NB} \dots \dots \dots (3.7)$$

Donde:

X<sub>NA</sub>: Coordenada x del nodo de la trayectoria A en el plano coordenado.

Y<sub>NA</sub>: Coordenada y del nodo de la trayectoria A en el plano coordenado.

X<sub>NB</sub>: Coordenada x del nodo de la trayectoria B en el plano coordenado.

Y<sub>NB</sub>: Coordenada y del nodo de la trayectoria B en el plano coordenado.

Una vez obtenidas las constantes de traslación, éstas se sumarán a todas las coordenadas de la trayectoria B para lograr la superposición:

$$X_{BA} = X_B + Cx \dots \dots \dots (3.8)$$

$$Y_{BA} = Y_B + Cy \dots \dots \dots (3.9)$$

Donde:

X<sub>BA</sub>: Coordenadas x de la trayectoria B sobre la trayectoria A.

Y<sub>BA</sub>: Coordenadas y de la trayectoria B sobre la trayectoria A.

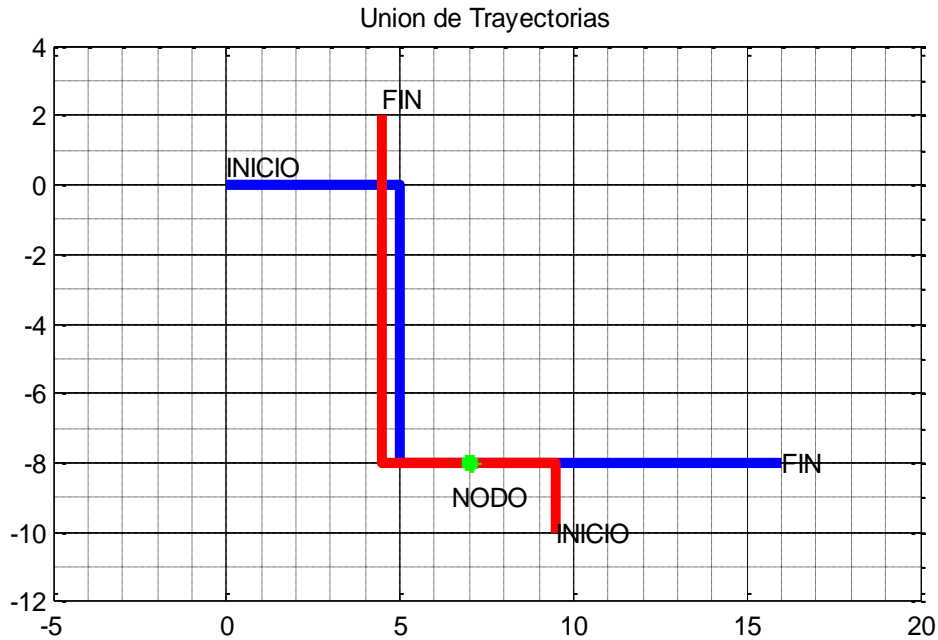
X<sub>B</sub>: Coordenadas x de la trayectoria B en el plano coordenado.

Y<sub>B</sub>: Coordenadas y de la trayectoria B en el plano coordenado.

Cx: Constante de traslación sobre el eje x.

Cy: Constante de traslación sobre el eje y.

En la figura 3.6 se puede ver el resultado de la superposición de las trayectorias A y B, a partir del nodo.



**Figura 3.6** Unión de trayectorias A y B a partir de nodo en común.

Al momento de superponer dos trayectorias se tendrá que determinar en que posiciones tenían los teléfonos inteligentes los usuarios de éstos, si ambos dispositivos estaban en la misma posición con respecto al usuario, se tendrán valores absolutos de la brújula digital, de no ser así se necesitará hacer una conversión antes, este proceso se puede hacer rotando alguna de las trayectorias un ángulo  $\alpha$  con respecto al origen:

$$X_{NR} = X_N \cos(\alpha) - Y_N \sin(\alpha) \dots \dots \dots (3.10)$$

$$Y_{NR} = X_N \sin(\alpha) + Y_N \cos(\alpha) \dots \dots \dots (3.11)$$

Donde:

$X_{NR}$ : Coordenada x de la trayectoria rotada  $\alpha$  grados en dirección opuesta a las manecillas del reloj.

$Y_{NR}$ : Coordenada y de la trayectoria rotada  $\alpha$  grados en dirección opuesta a las manecillas del reloj.

$X_N$ : Coordenada x de la trayectoria original.

$Y_N$ : Coordenada y de la trayectoria original.

$\alpha$ : ángulo de rotación.

Las ecuaciones 3.10 y 3.11 representan una rotación con respecto al origen, si se desea rotar con respecto a otro punto del espacio, por ejemplo un nodo, se pueden obtener fácilmente primero trasladando el origen del plano a las coordenadas del nodo  $(x_1, y_1)$ , restando  $x_1$  y  $y_1$ , realizando la rotación y después regresando el origen inicial del plano, sumando  $x_1$  y  $y_1$ , esto es:

$$X_{NRN} = (X_N - X_1) \cos(\alpha) - (Y_N - Y_1) \sin(\alpha) + (X_1) \dots \dots \dots (3.12)$$

$$Y_{NRN} = (X_N - X_1) \sin(\alpha) + (Y_N - Y_1) \cos(\alpha) + (Y_1) \dots \dots \dots (3.13)$$

Donde:

$X_{NRN}$ : Coordenada x de la trayectoria rotada  $\alpha$  grados en dirección opuesta a las manecillas del reloj con respecto a un nodo.

$Y_{NRN}$ : Coordenada y de la trayectoria rotada  $\alpha$  grados en dirección opuesta a las manecillas del reloj con respecto a un nodo.

$X_N$ : Coordenada x de la trayectoria original.

$Y_N$ : Coordenada y de la trayectoria original.

$X_1$ : Coordenada x del nodo con respecto al cual se va a girar.

$Y_1$ : Coordenada y del nodo con respecto al cual se va a girar.

$\alpha$ : ángulo de rotación.

A continuación se describe a grandes rasgos cómo funciona el algoritmo de unión de trayectorias, usando o no nodos estáticos.

- El algoritmo buscará la trayectoria con el mayor número de nodos en ella, ésta será la trayectoria base. El resto serán ordenadas de mayor a menor número de nodos.
- Si se están usando nodos estáticos, se toma la trayectoria base y otra cualquiera. Si tienen un nodo estático en común, se traslada la segunda trayectoria a la trayectoria base, con respecto al nodo estático que ambas vieron. Si ambas rutas tienen un segundo nodo en común, la segunda trayectoria se rotará con respecto al primer nodo hasta que la distancia entre el segundo nodo en común de ambas sea mínima. Este proceso se repetirá para cada trayectoria. Si la trayectoria del usuario que se está trasladando tiene nodos que la trayectoria base no tiene, éstos se agregarán a la misma.

- Si no se están usando nodos estáticos, se tomará la trayectoria base y otra cualquiera. Si algún nodo de la trayectoria base indica que se vio a esta segunda ruta, se buscará en ésta el nodo que indica que se vio a la trayectoria base y estos nodos se utilizarán para hacer la traslación. Cuando se hayan ocupado todos los nodos de la trayectoria base, se cambiará ésta por la segunda con mayor número de nodos y se repetirá el mismo proceso hasta que se hayan ocupado todos los nodos de todos los usuarios.

# Capítulo 4

## Implementación del sistema de seguimiento y localización para interiores sobre un entorno de desarrollo integrado

### 4.1 Introducción

En el capítulo anterior se presentó la idea conceptual del sistema de seguimiento y localización para interiores propuesto en esta tesis. En este capítulo se presenta la implementación sobre el sistema operativo de teléfonos inteligentes más aceptado y utilizado en la actualidad, Android, empleando el entorno de desarrollo integrado “Eclipse y el Android SDK”.

### 4.2 Teléfonos inteligentes

Hoy en día estamos viviendo una revolución en el campo de las tecnologías de la información y la comunicación y una prueba de ello son los llamados teléfonos inteligentes, que ofrecen al usuario una serie de servicios que antes no se hubieran pensado. En la actualidad un teléfono móvil es más que sólo voz y mensajes de texto como solía ser en el pasado. Hoy estos dispositivos tienen

capacidades iguales o superiores a computadoras personales de hace 10 años, tienen integradas calculadoras científicas, ofrecen servicios de datos, permiten abrir y editar documentos, tienen integrados sensores, ofrecen aplicaciones de diversos tipos, permiten tomar fotografías y video de alta definición, en pocas palabras están cambiando la forma en que vivimos.

Los teléfonos inteligentes se han convertido en una necesidad para las personas. Un hecho que se debe hacer notar es que aunque dos personas tengan exactamente el mismo dispositivo, con las mismas características, éstos son diferentes porque cada usuario personaliza su teléfono de manera distinta. Las aplicaciones que un usuario tiene no son las mismas que posee otro, y son éstas las que hacen que el usuario tenga en todo momento el teléfono en la bolsa.

Existen muchos sistemas operativos para teléfonos inteligentes como iOS, Symbian, Windows Phone OS, Blackberry OS y Android. Estudios de Nielsen Company, una empresa dedicada a medición e información de mercado, muestran que Android es el sistema operativo más utilizado y con mayor crecimiento de usuarios en Estados Unidos. Android pasó de estar en el 43% de los teléfonos inteligentes en 2011 [20], a estar en el 51% en el 2012 [21].

Android está basado en Java y Linux, es una plataforma abierta, esto le da una ventaja ya que no se tienen que pagar una licencia de uso al utilizarlo. En el momento que se quiera distribuir una aplicación se puede hacer por medio de *Android Market*, que ahora es conocido como *Google Play*. En el cual los usuarios cuyos dispositivos tengan las características necesarias para poder utilizar tu aplicación, podrán descargarla y utilizarla.

### 4.2.1 Sensores

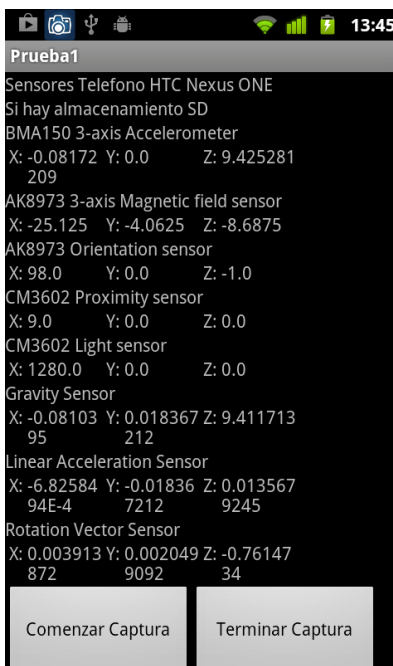
Los sensores son los dispositivos de entrada que tiene el teléfono que nos permiten obtener información de su posición, orientación y del ambiente que lo rodea. El número de sensores que tiene el teléfono inteligente varía según la marca y el modelo. El sistema operativo Android soporta tres categorías de sensores [22]:

- Sensores de movimiento: Éstos miden fuerzas de aceleración y rotación en tres ejes. Por ejemplo el acelerómetro, el sensor de gravedad y el giróscopo.
- Sensores de posición: Éstos miden la posición física del dispositivo. Por ejemplo el sensor de orientación y el magnetómetro.
- Sensores de ambiente: Éstos miden diferentes parámetros del ambiente como temperatura, presión, iluminación y humedad. Por ejemplo el barómetro, el fotómetro y el termómetro.

Como ya se mencionó, el número de sensores en cada dispositivo varía según la marca y el modelo. El teléfono que se utiliza para el desarrollo de esta tesis es el HTC Nexus One, que es el primer



teléfono de Google, la versión de Android es la 2.3.6. Éste cuenta con diferentes tipos de sensores de las tres categorías antes mencionadas, ver figura 4.1.



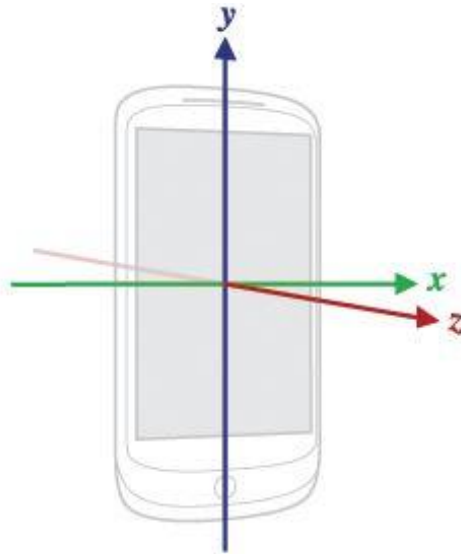
**Figura 4.1** Sensores en el teléfono HTC Nexus One.

- BMA150 3-axis Accelerometer: Este sensor mide la aceleración aplicada al dispositivo, entrega tres valores, las unidades de éstos son las del Sistema Internacional,  $[m/s^2]$ . Cada uno de estos valores proporciona la aceleración incluyendo la componente de la gravedad.
- AK8973 3-axis Magnetic field sensor: Este sensor mide el campo magnético en el ambiente en cada uno de los tres ejes del teléfono, los valores que entrega son en microteslas  $[\mu T]$ .
- AK8973 Orientation sensor: Este sensor entrega tres ángulos medidos en grados con respecto a los ejes coordenados del teléfono, ver figura 4.2.
  - Azimuth: Es el ángulo entre la dirección del norte magnético y el eje “y” del teléfono, toma valores entre  $0^\circ$  y  $359^\circ$ . Tomando en cuenta las coordenadas del teléfono, el norte es  $0^\circ$ , el este a  $90^\circ$ , el sur a  $180^\circ$  y el oeste a  $270^\circ$ .
  - Pitch: Es el ángulo de rotación alrededor del eje “x”, toma valores entre  $-180^\circ$  y  $180^\circ$ , con valores positivos cuando el eje “z” se mueve hacia el eje “y”.

- Roll: Es el ángulo de rotación alrededor del eje “y”, toma valores entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ , tomando valores positivos cuando el eje “x” se mueve hacia el eje “z”.
- CM3602 Proximity sensor: Este sensor mide la proximidad y entrega un valor en centímetros [cm], pero sólo tiene un valor de falso o verdadero. En el caso del teléfono muestra un valor de 9 si se encuentra lejos y de 0 si se encuentra cerca de su umbral.
- CM3602 Light sensor: Este sensor mide el nivel de luz del ambiente, en las unidades del Sistema Internacional, lux [lx].
- Gravity Sensor: Este sensor mide la gravedad por medio de un vector en tres dimensiones indicando la dirección y la magnitud de la gravedad, las unidades son las del Sistema Internacional, metros sobre segundo cuadrado [ $m/s^2$ ]. Cuando el dispositivo está en reposo este sensor da los mismos valores que el acelerómetro.
- Linear Acceleration Sensor: Este sensor mide la aceleración en cada uno de los ejes del teléfono sin incluir la gravedad, las unidades son las del Sistema Internacional, metros sobre segundo cuadrado [ $m/s^2$ ]. La suma de éste y el sensor de gravedad nos da como resultado el mismo valor que el acelerómetro en tres ejes.
- Rotation Vector Sensor: Este sensor entrega la orientación del teléfono (como una combinación de un ángulo y tres ejes), en la cual el dispositivo ha rotado un cierto ángulo alrededor de un eje.

El sistema coordenado del teléfono, figura 4.2, es referido a su pantalla ya que no importa en qué posición esté, los ejes siempre tendrán la misma posición.

- El eje “x” es horizontal y apunta hacia la derecha de la pantalla del teléfono.
- El eje “y” apunta hacia arriba de la pantalla del teléfono.
- El eje “z” apunta hacia afuera de la pantalla del teléfono.



**Figura 4.2** Sistema coordenado del teléfono. Figura reproducida de [22].

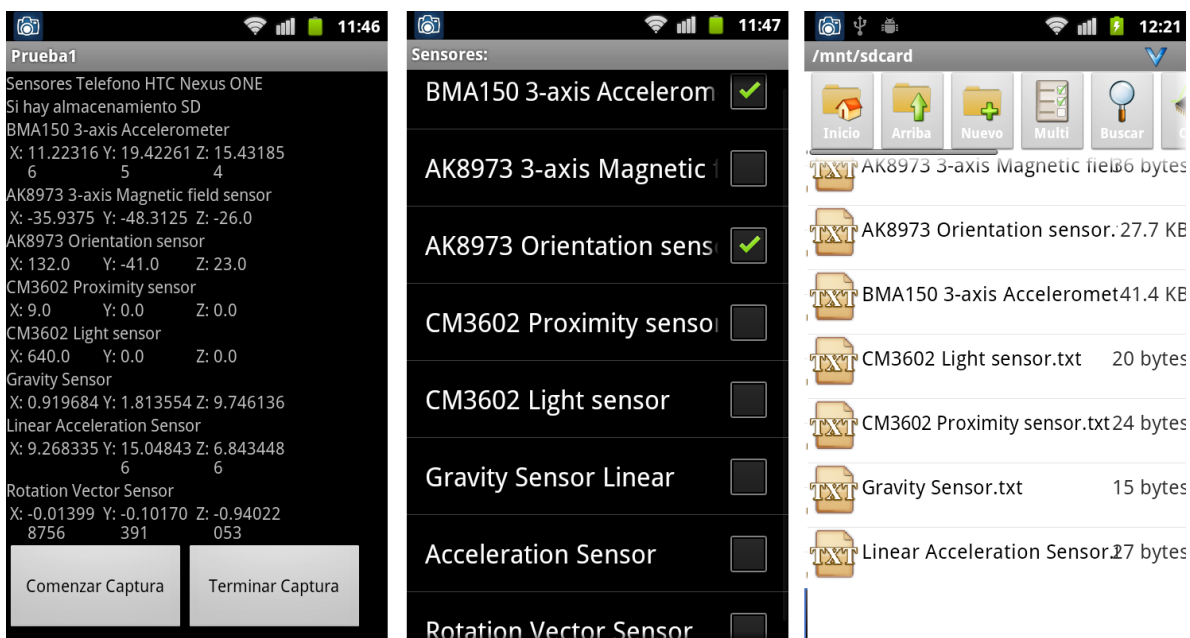
### 4.3 Entorno de desarrollo integrado

Para la creación de aplicaciones que nos permitan obtener y manipular los datos de los sensores, así como otras características del teléfono inteligente, se utilizará Eclipse, que es un IDE (*Integrated development enviroment*, entorno de desarrollo integrado) muy utilizado para la programación en Android, ya que cuenta con un complemento de desarrollo específico para dicha plataforma, que usa el lenguaje de programación Java. El complemento que nos permite desarrollar aplicaciones es conocido como ADT (*Android development toolkit*, paquete de herramientas para desarrollo android). También se usará el SDK (*Software development kit*, paquete de desarrollo de software) de Android, que contiene librerías que nos permiten programar para las diferentes versiones del sistema operativo.

### 4.4 Software para acceder a los sensores del teléfono

La primera necesidad que tenemos a fin de empezar la implementación de nuestro sistema, es obtener los datos de los sensores, para procesarlos y poder dar seguimiento al teléfono y por ende al usuario que lo trae consigo.

La primera aplicación desarrollada en Eclipse obtiene, despliega y almacena valores de los sensores. La figura 4.3 muestra ejemplos de la interfaz de usuario (izquierda y centro) y los archivos donde se almacenan los datos.



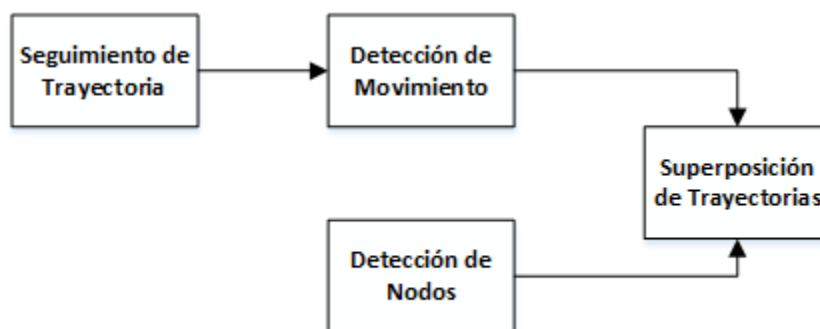
**Figura 4.3** Interfaz de la aplicación que obtiene, despliega y almacena datos de los sensores.

Esta aplicación nos permite manipular los datos de los sensores que son de interés para el desarrollo de esta tesis. La forma de operación de ésta es la siguiente:

- Revisa que exista una memoria externa en el teléfono, ya que ésta almacena los datos obtenidos por los sensores.
- Muestra en la pantalla todos los sensores del teléfono, seguido de sus respectivos valores en cada uno de los ejes coordenados, si es que dicho valor existe.
- Las opciones nos permiten habilitar o deshabilitar el almacenamiento de datos de los sensores incluidos en el teléfono.
- Por medio del botón “Comenzar Captura”, empieza a almacenar los datos de todos los sensores que se hayan seleccionado en las opciones. La información se guarda en un archivo de texto cuyo título es el nombre del sensor.
- Por medio del botón “Terminar Captura”, cesa el almacenamiento de datos de los sensores.
- El archivo de texto además de almacenar los datos de los sensores, también guarda el tiempo en el que la lectura fue tomada. Este tiempo es dado en nanosegundos [ns].

## 4.5 Implementación del sistema de seguimiento y localización para interiores

Como se mencionó en el capítulo anterior, el sistema de seguimiento y localización para interiores se compone de cuatro subsistemas, ver figura 4.4. Cada uno de éstos se implementará por separado a fin de obtener un mejor resultado.



**Figura 4.4** Diagrama a bloques del sistema de seguimiento y localización para interiores.

El subsistema de seguimiento de trayectoria entrega una primera aproximación del recorrido del usuario. Posteriormente, el bloque de detección de movimiento discrimina los datos de la brújula digital que fueron tomados mientras el usuario se encontraba en reposo. Con esto se obtiene una segunda aproximación. La detección de nodos trabaja en paralelo para encontrar a otros dispositivos a lo largo de la ruta. Finalmente, el bloque de unión de trayectorias toma todos los recorridos y los une utilizando los puntos de encuentro.

### 4.5.1 Implementación del subsistema de seguimiento de trayectoria

Utilizando la aplicación que nos permite obtener datos de los sensores y almacenando en todo momento los datos de la brújula digital (sensor de orientación), se realizó un experimento que consistía en recorrer un pasillo de ida y vuelta, ver figura 4.5. El camino tiene primero un giro a la derecha, después uno a la izquierda, luego una vuelta en *U*, para finalmente dar un giro a la derecha y después uno a la izquierda. El teléfono Nexus One se colocó en la mano del usuario, paralelo al piso, con la pantalla hacia arriba y siempre apuntando en la dirección de desplazamiento.



Figura 4.5 Forma del pasillo del recorrido de prueba.

Una vez graficados los datos obtenidos del experimento, ver figura 4.6, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los datos varían alrededor de un valor cuando el usuario se desplazó en línea recta sobre el pasillo, este ruido es provocado por la oscilación del cuerpo al caminar.
- Un giro a la derecha provoca un aumento rápido del ángulo de dirección de desplazamiento del usuario, mientras que un giro a la izquierda provoca una disminución rápida del valor del ángulo.
- La vuelta en U hacia la derecha provoca un aumento rápido en el ángulo de desplazamiento del usuario, mayor al que provoca un giro a la derecha.

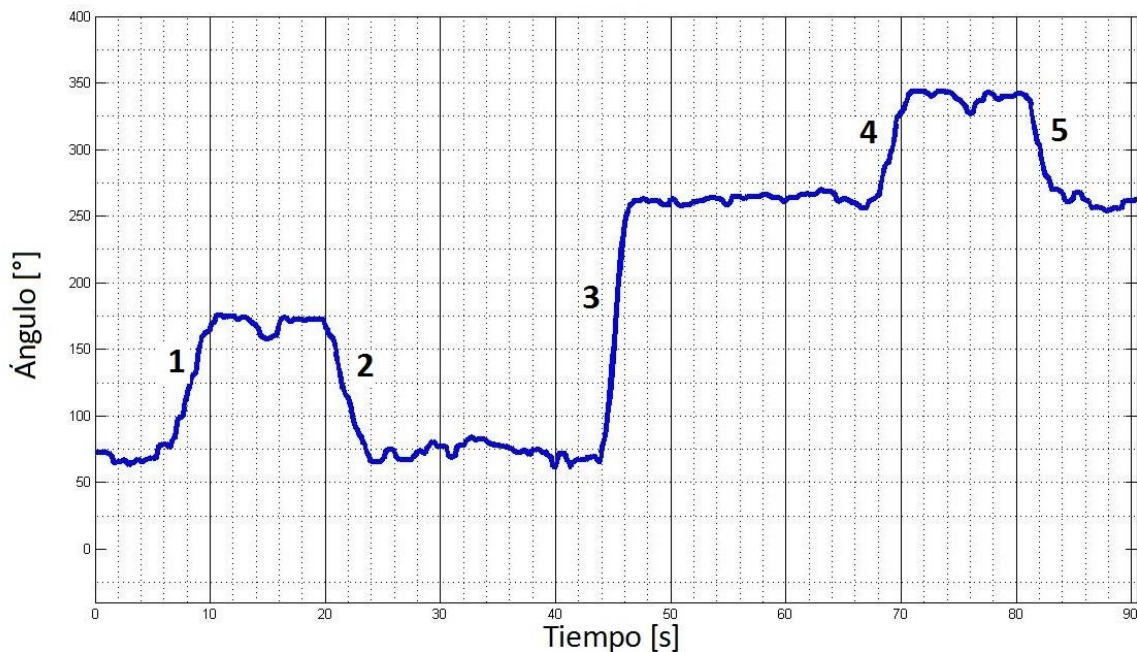
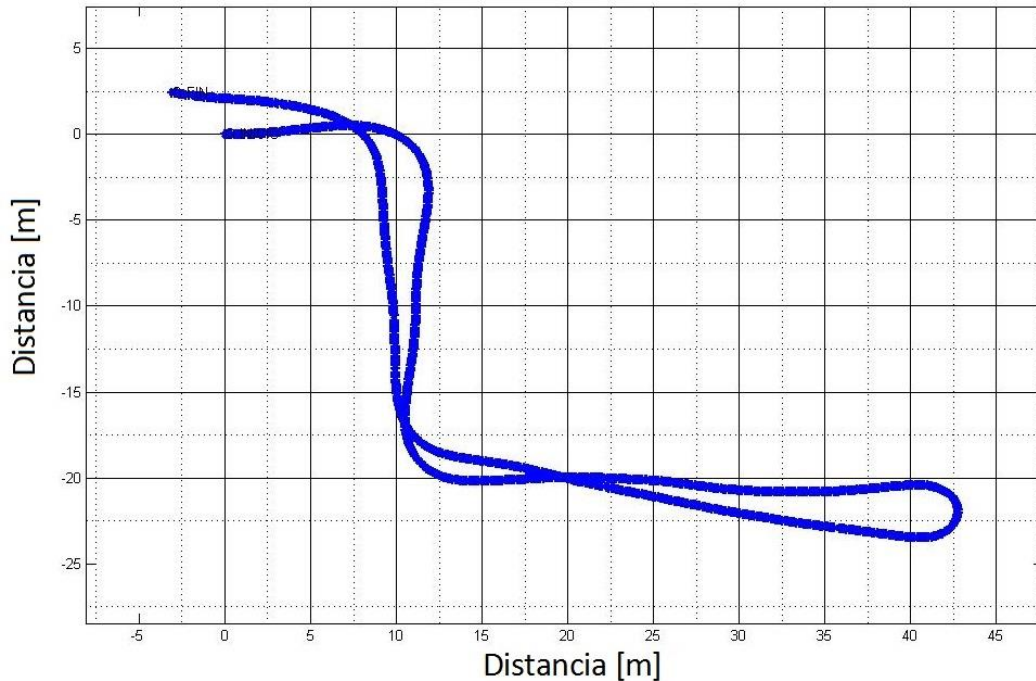


Figura 4.6 Datos del sensor de orientación durante el recorrido de prueba.

Utilizando Matlab y las ecuaciones 3.1 y 3.2, se calculó cada uno de los incrementos tanto en  $x$  como en  $y$ . Para dichos cálculos se utilizó una velocidad promedio de 5 [km/h] (1.38 [m/s]) y se eligió el origen del plano coordenado como el inicio del recorrido. Los datos del sensor de orientación fueron normalizados restando el primer valor tomado, ver figura 4.7.



**Figura 4.7** Trayectoria del usuario obtenida por medio del sensor de orientación.

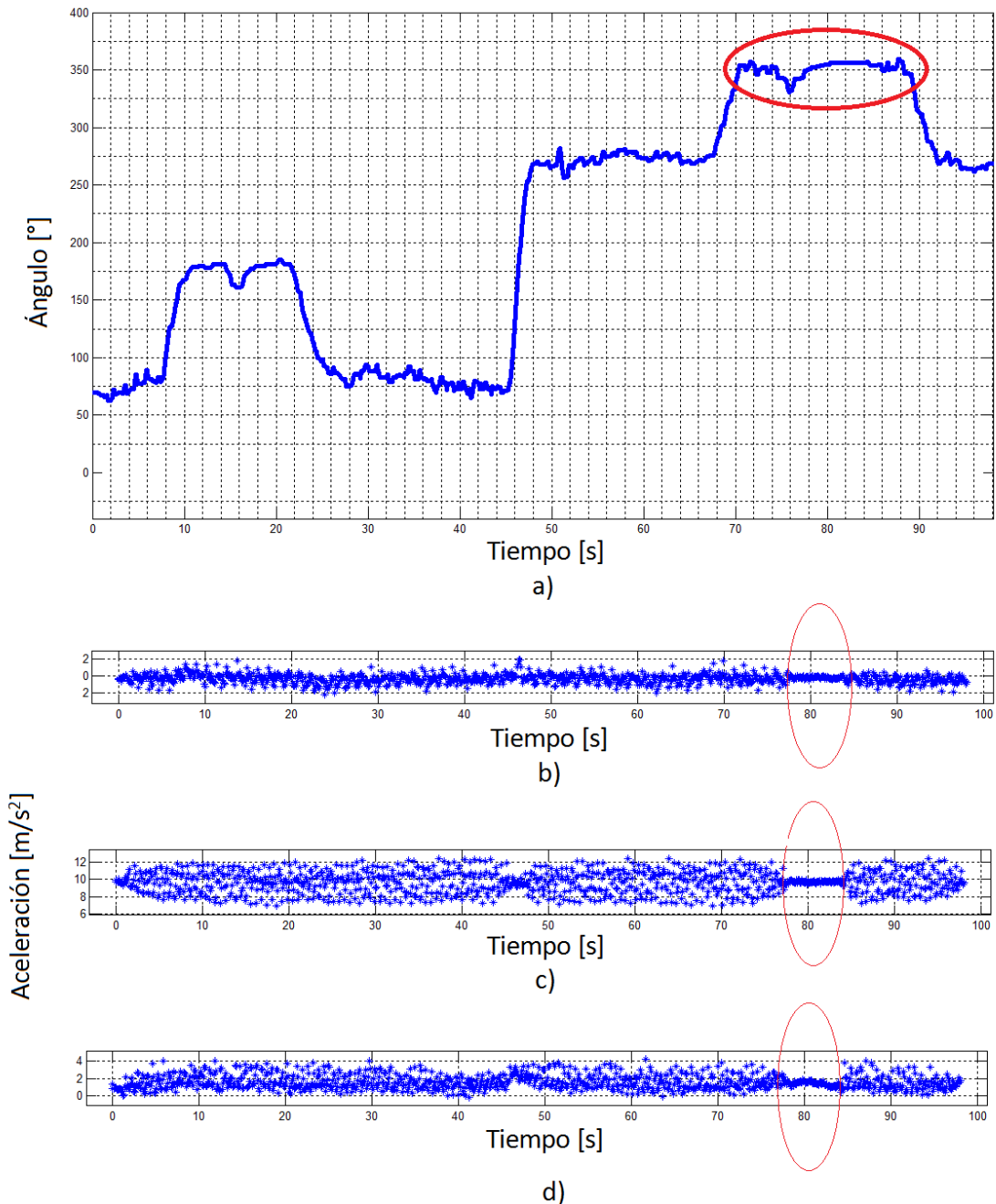
La trayectoria obtenida por medio de los datos del sensor de orientación es muy similar a la forma del pasillo, en ella se ven tanto los giros a la derecha como a la izquierda y la vuelta en u. Aunque existe error entre el punto final y el punto inicial, el resultado nos da una muy buena aproximación del recorrido del usuario.

#### 4.5.2 Implementación del subsistema de detección de movimiento

Este subsistema hace uso del algoritmo On / Off, que necesita tres datos de entrada, umbral inferior, umbral superior y número mínimo de muestras consecutivas (NMM). Utilizando la aplicación que nos permite obtener los datos de los sensores y almacenando los de orientación y el acelerómetro, se recorrió de nuevo el pasillo de prueba, ver figura 4.5, con la diferencia de que se hizo una pausa de alrededor de 5 segundos un poco antes de la última vuelta.

Una vez graficados los datos del sensor de orientación y del acelerómetro, ver figura 4.8, se puede notar que en la gráfica del sensor de orientación la forma está un poco alargada antes del decremento final con respecto a la figura 4.6. En ese mismo intervalo de tiempo, los datos del acelerómetro presentan una variación menor. Esta estabilidad en los valores se puede apreciar mejor en los datos del acelerómetro en el eje Y, en éste se puede ver claramente qué cuando el

usuario está en movimiento somete al teléfono a aceleraciones provocadas por la oscilación del cuerpo al caminar.

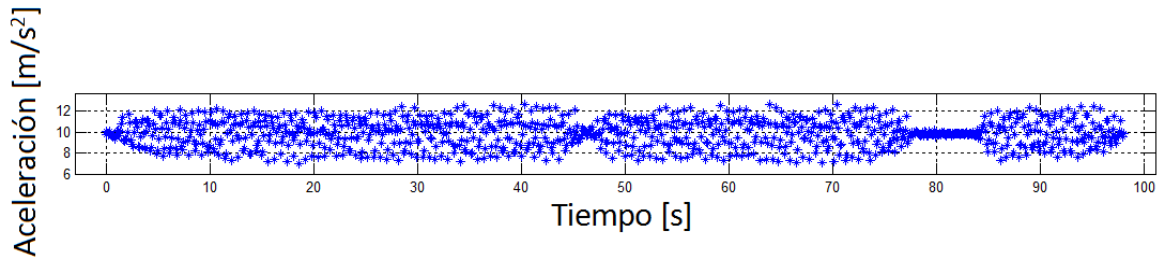


**Figura 4.8** Datos de los sensores durante el recorrido; a) sensor de orientación; b) acelerómetro sobre el eje X; c) acelerómetro sobre el eje Y; d) acelerómetro sobre el eje Z.

Calculando la resultante de los tres datos que entrega el acelerómetro con la ecuación 3.3, ver figura 4.9, se aprecia mejor la diferencia cuando el usuario está en movimiento y cuando está en reposo,



tomando valores más cercanos a la gravedad ( $9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ ) en el intervalo de tiempo cuando la persona se detuvo.



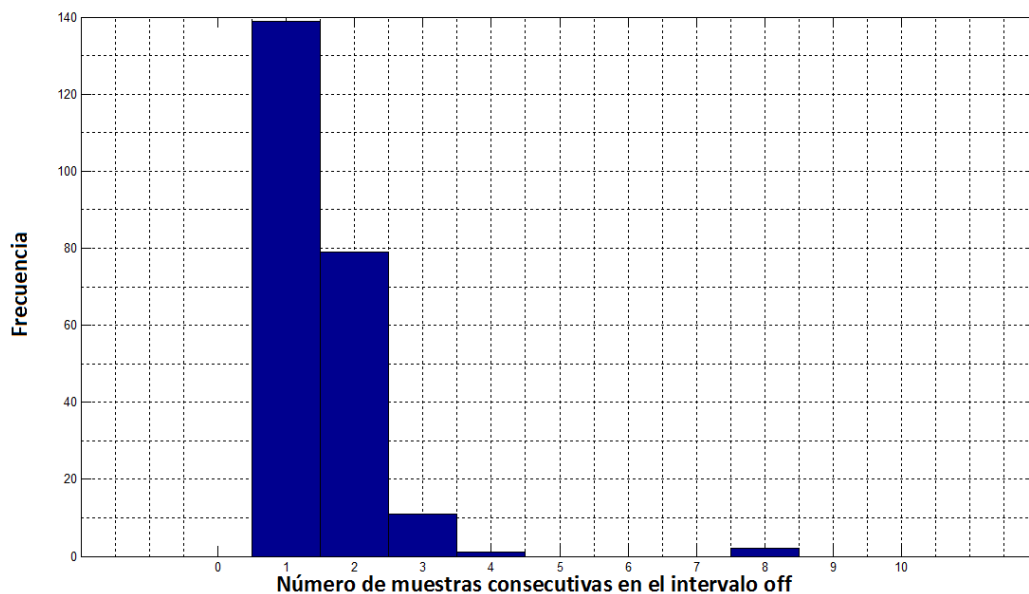
**Figura 4.9** Resultante de los datos del acelerómetro.

Experimentalmente se determinaron los valores de los umbrales utilizando la resultante de los valores del acelerómetro. Se tomó nota de los valores máximo y mínimo de los datos cuando el usuario estaba en reposo. Estos valores se extendieron 10% a fin de establecer los umbrales (intervalo off) como se indica en la tabla 4.1.

	Aceleración [ $\text{m/s}^2$ ]	Intervalo off	Aceleración [ $\text{m/s}^2$ ]
<b>Valor máximo</b>	10.28	<b>Umbral superior</b>	10.373
<b>Valor mínimo</b>	9.35	<b>Umbral inferior</b>	9.257
<b>Tolerancia 10 %</b>	0.093	<b>Diferencia</b>	1.116

**Tabla 4.1** Valores de umbral superior e inferior.

Posteriormente, se utilizaron los datos del acelerómetro cuando el usuario se encontraba en movimiento, contando el número de muestras consecutivas que se encontraban en el intervalo off. El histograma de la figura 4.10 muestra que cuando el usuario se desplaza, se pueden obtener valores en el intervalo off, pero el número de veces consecutivas que se tienen éstos es menor a 9.



**Figura 4.10** Histograma del número de muestras consecutivas en el intervalo off.

Utilizando Matlab se implementó el algoritmo On / Off usando los valores de la tabla 4.2.

	Valor
Umbral superior	10.373 [m/s <sup>2</sup> ]
Umbral inferior	9.257 [m/s <sup>2</sup> ]
Número mínimo de muestras consecutivas	9

Tabla 4.2 Valores de entrada del algoritmo On / Off.

En la figura 4.11, se pueden apreciar los datos del sensor de orientación después de la discriminación hecha por el algoritmo On / Off. Estos valores presentan la forma que se tenía en el primer recorrido de prueba, ver figura 4.7.

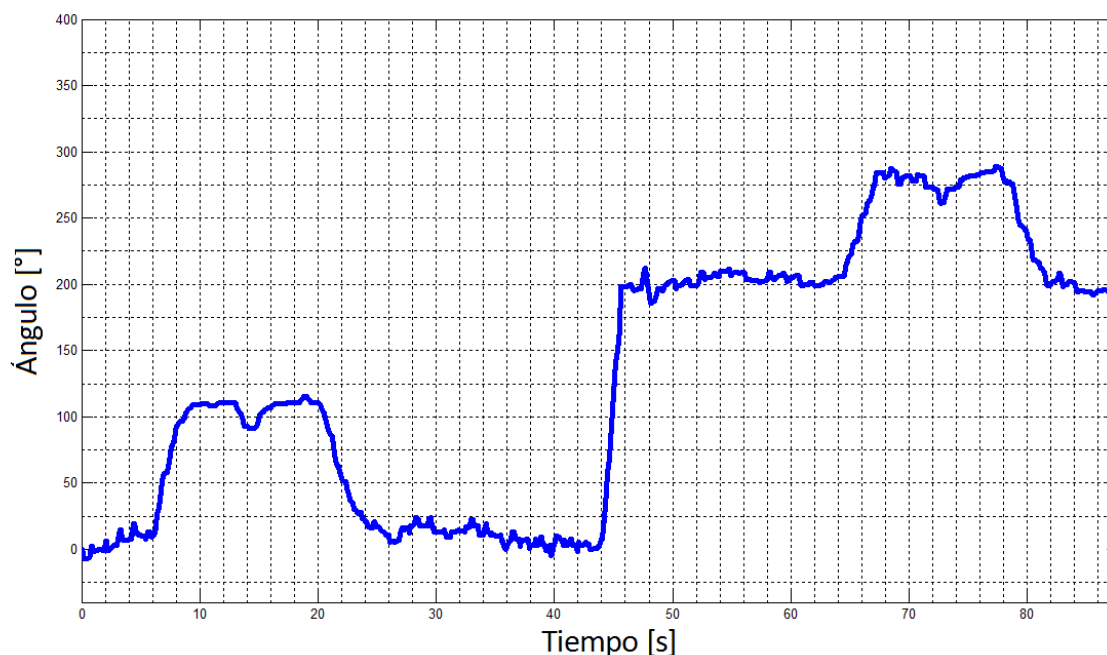
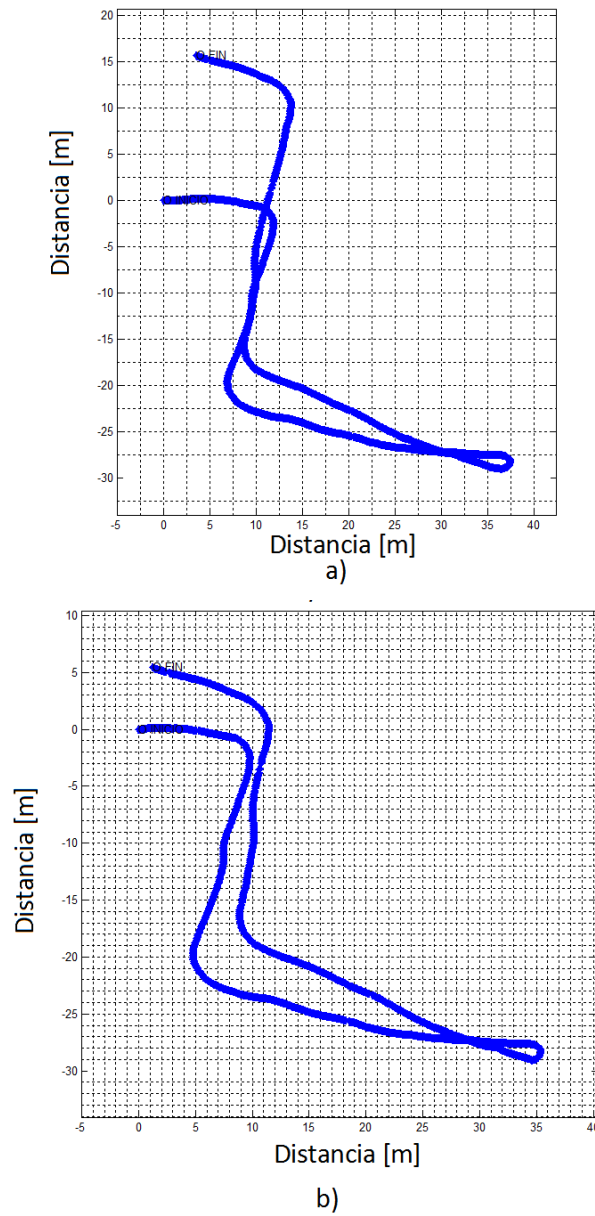


Figura 4.11 Valores del sensor de orientación después de aplicar el algoritmo On / Off.

En la figura 4.12 se puede ver el recorrido antes y después de aplicar el bloque de detección de movimiento. Se aprecia una mejor aproximación de la ruta que siguió el usuario cuando se aplica el algoritmo On / Off a los datos del sensor de orientación. Esto se puede observar en la distancia entre los puntos final e inicial de la figura 4.12 (b), que es menor que en el caso de la figura 4.12 (a).

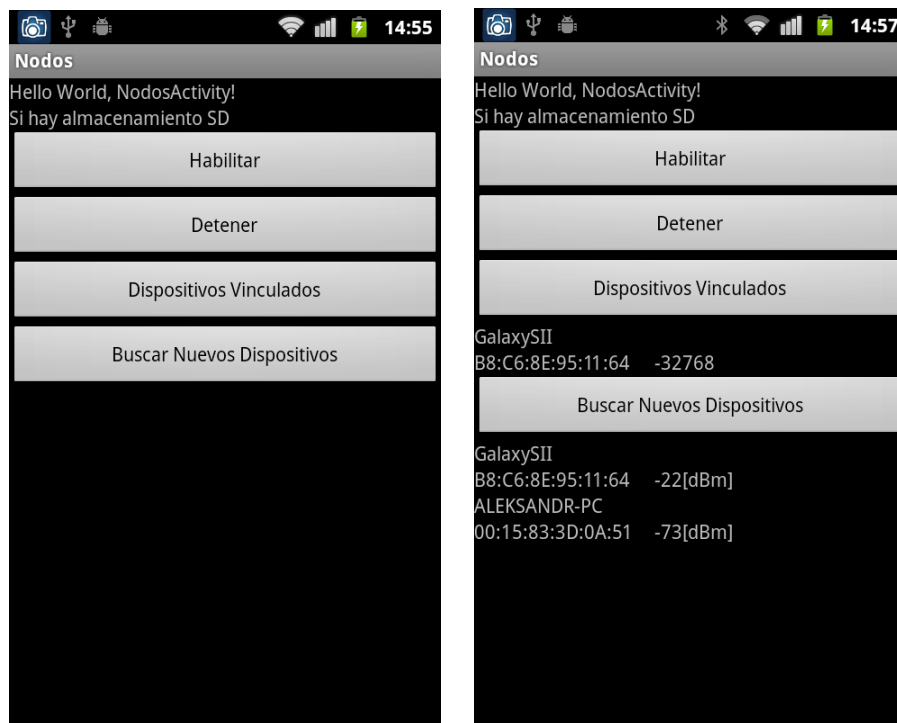


**Figura 4.12** a) Trayectoria del usuario antes del subsistema de detección de movimiento;  
b) después del subsistema de detección de movimiento.

### 4.5.3 Implementación del subsistema de detección de nodos

Como se mencionó en el capítulo anterior, para la implementación de detección de nodos en este sistema se utiliza el bluetooth del teléfono inteligente, dado que Android no cuenta con soporte para redes Ad Hoc. Conforme se actualizan las versiones de esta plataforma se agregan nuevas funcionalidades, por eso no se descarta en un futuro poder utilizar Wi-Fi. El proceso para encontrar dispositivos por medio de bluetooth tarda aproximadamente 12 [s] [23], pero una vez habilitado es posible cancelarlo en cualquier momento, a pesar de que éste no termine.

La segunda aplicación desarrollada en el IDE Eclipse, permite habilitar y deshabilitar la búsqueda de dispositivos bluetooth, así como almacenar en un archivo de texto información básica de los dispositivos encontrados. La figura 4.13 muestra la interfaz de usuario de la aplicación.



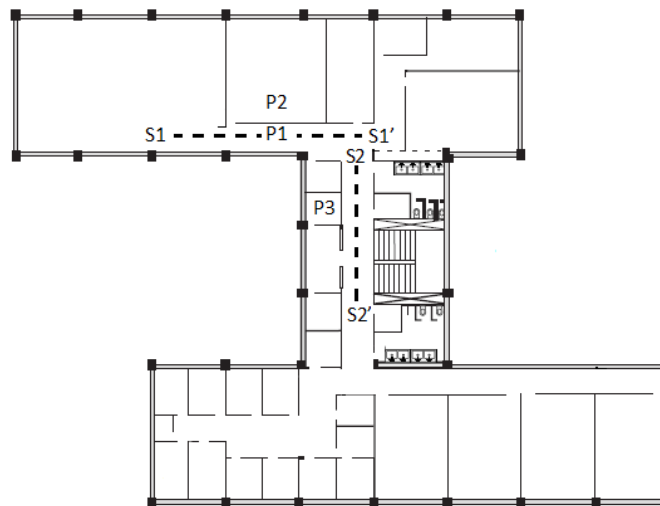
**Figura 4.13** Interfaz de la aplicación que descubre y guarda información de dispositivos que cuentan con bluetooth.

La forma de operar de la aplicación es la siguiente:

- Revisa que exista almacenamiento por medio de una memoria externa y que exista radio bluetooth en el teléfono.
- Por medio del botón “*Habilitar*”, enciende el bluetooth del teléfono si es que éste se encuentra apagado.

- Por medio del botón “*Dispositivos Vinculados*”, muestra aquellos con los cuales ya se ha vinculado antes, así como su dirección MAC.
- Por medio del botón “*Buscar Nuevos Dispositivos*”, comienza el proceso de descubrimiento y después de un tiempo de 2.5 [s] lo cancela, para posteriormente activarlo nuevamente, esto lo hace de forma iterativa. Además abre un archivo donde se almacena la información básica de los dispositivos encontrados (nombre, tiempo en que se detectó y el valor de RSSI).
- Por medio del botón “*Detener*”, cierra el archivo donde se almacena la información básica de los dispositivos encontrados y termina el proceso de descubrimiento.

Para definir el *UmbralRSSI* a partir del cual dos dispositivos se encuentran en línea de vista cercana, se utilizó la segunda aplicación desarrollada y se realizaron tres experimentos muy similares a los mostrados en [19]. Éstos se llevaron a cabo en el tercer piso del edificio Valdez Vallejo, figura 4.14, dicho lugar cuenta tanto con paredes de ladrillo como de tabla roca.



**Figura 4.14** Plano del tercer piso del edificio Valdez Vallejo. Figura parcialmente reproducida de [19].

En el primer experimento se colocó un teléfono con el bluetooth encendido en el punto P1, mientras que el usuario hacía el recorrido de S1 a S1', de tal manera que existía línea de vista entre ambos dispositivos.

En el segundo experimento se colocó un teléfono con el bluetooth encendido en P2, mientras el usuario hacía el recorrido de S1 a S1', de tal manera que no existía línea de vista entre ambos dispositivos, ya que una pared de ladrillo se interponía entre ambos.

En el tercer experimento se colocó un teléfono con el bluetooth encendido en P3, mientras que el usuario hacía el recorrido de S2 a S2', de tal manera que no existía línea de vista entre ambos dispositivos, ya que existía una pared falsa entre ellos.

La figura 4.15 muestra el promedio de los resultados de los tres experimentos, el cero es el lugar en el que se encontraba el teléfono (P1, P2 y P3). En la gráfica se aprecia que existe un intervalo de valores RSSI que solo puede ser alcanzado cuando existe línea de vista (teniendo su máximo cuando ambos se encuentran lo más cerca posible) y que la atenuación causada por la pared de ladrillo es mayor que la de tabla roca. Aun cuando existe línea de vista entre dos teléfonos, la atenuación es mayor cuando el usuario le da la espalda al dispositivo que se encontraba estático.

Aunque las pruebas muestran que a partir de -70 [dBm] se puede decir que dos dispositivos se encuentran en línea de vista, se busca además que ambos se encuentren cerca uno del otro, con un máximo de 2 [m] de separación, por lo cual se definirá el *UmbralRSSI* en -57 [dBm].

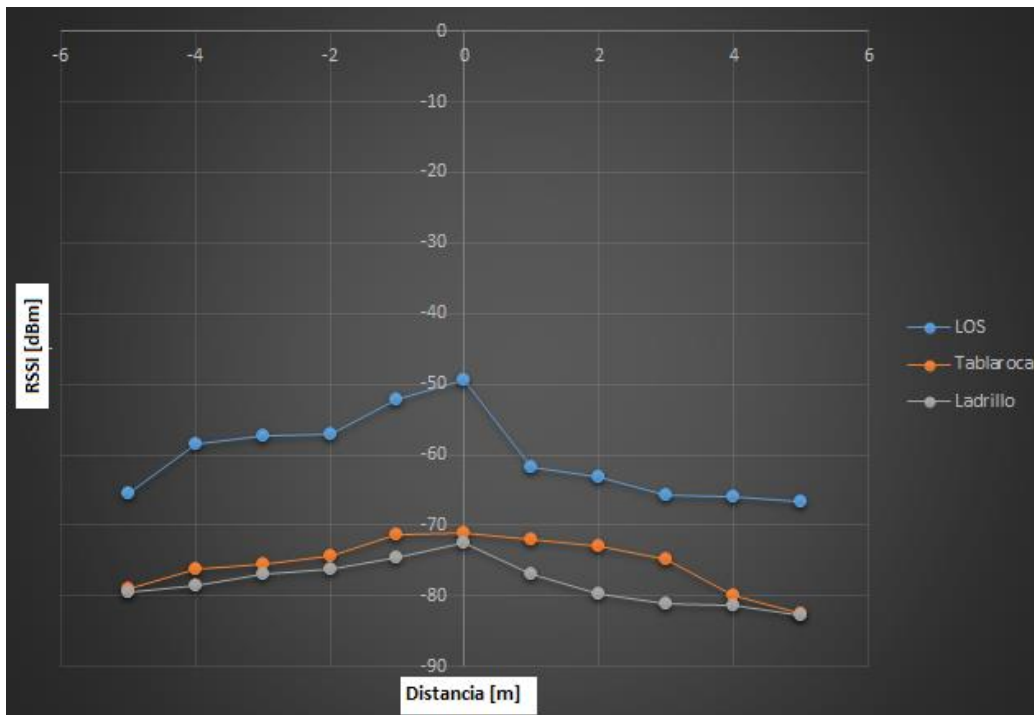


Figura 4.15 Resultados obtenidos de la implementación del bloque de detección de nodos.

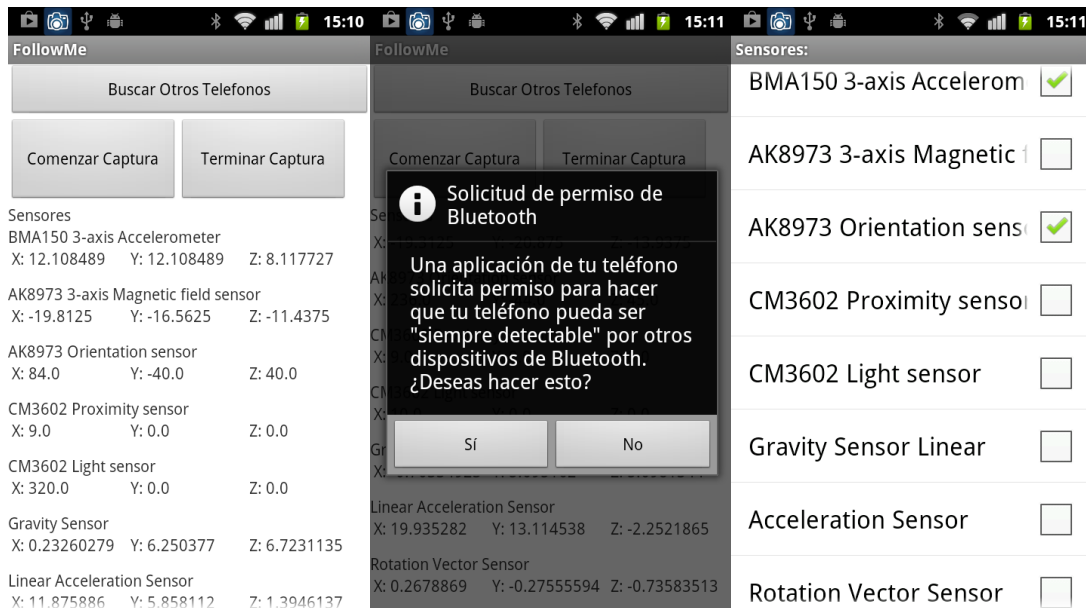
Entonces se puede decir que si se encuentra un dispositivo cuyo valor de RSSI es mayor o igual a -57 [dBm], éste se encuentra en línea de vista cercana del usuario y representa un nodo en su trayectoria, esto es:

$$RSSI_{medido} \geq -57 [dBm] \dots \dots \dots (4.1)$$

En caso de encontrarse un dispositivo de manera consecutiva (menos de 3 [s] de diferencia) con distintos valores, se deberá tomar el valor más alto como el nodo.

### 4.5.3 Implementación del subsistema de superposición de trayectorias

Para la implementación de este subsistema, se desarrolló una tercera aplicación que combina las dos anteriores. La figura 4.16 muestra la interfaz de usuario de la aplicación. Ésta nos permite obtener los datos de los sensores y encontrar a otros dispositivos que tengan integrado bluetooth.



**Figura 4.16** Interfaz de la aplicación que descubre y guarda información de dispositivos que cuenten con bluetooth, además obtiene, muestra y almacena datos de los sensores integrados en el teléfono.

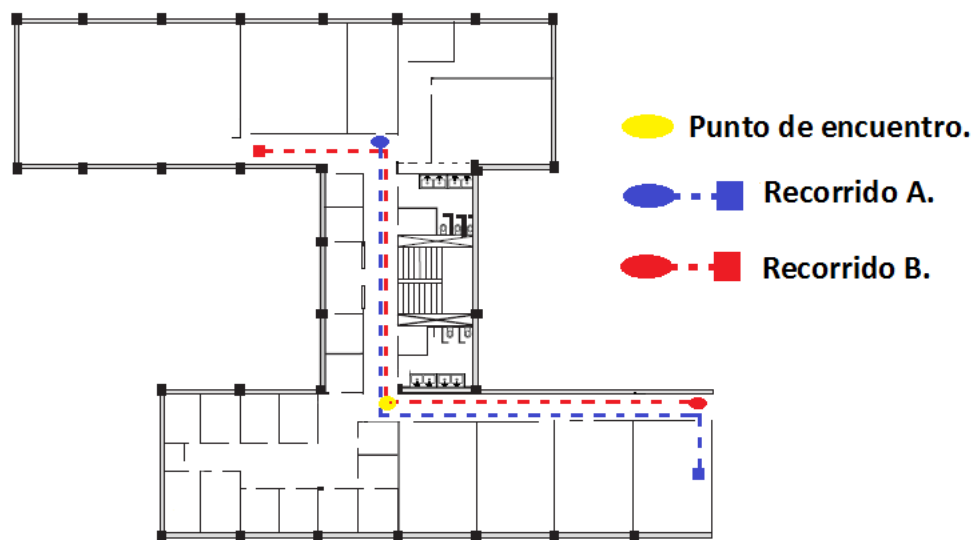
La forma de operación de esta aplicación es la siguiente:

- Revisa que exista radio bluetooth en el teléfono inteligente, así como almacenamiento externo por medio de una memoria (en ésta se guardan los datos obtenidos de los sensores y los dispositivos bluetooth encontrados).
- Muestra en la pantalla todos los sensores del teléfono, seguido de sus respectivos valores en cada uno de los ejes coordenados del dispositivo.
- Las opciones nos permiten habilitar o deshabilitar la captura de datos de los sensores incluidos en el teléfono Inteligente.
- Por medio de el botón “*Buscar Otros Teléfonos*”, habilita el radio bluetooth y la visibilidad del dispositivo para que otros teléfonos puedan encontrarlo.

- Por medio del botón “*Comenzar Captura*”, empieza a almacenar los datos de todos los sensores que se hayan seleccionado en las opciones, la información se guarda en un archivo de texto cuyo título es el nombre del sensor. Además, se abre otro archivo donde se almacena la información básica de los dispositivos bluetooth y comienza el proceso de descubrimiento de forma iterativa.
- Por medio del botón “*Terminar Captura*”, cesa el almacenamiento de datos de los sensores y se cierran los archivos que se hayan abierto.

Para hacer uso del sistema se debe de restringir la posición en la cual se encuentra el teléfono inteligente con respecto al usuario. En teoría, de este modo los datos obtenidos por medio del sensor de orientación serán absolutos. Aunque se restringe la posición del dispositivo, esto no limita en gran medida los movimientos del usuario.

Para probar la unión de trayectorias se utilizaron dos teléfonos inteligentes, el HTC Nexus One y el Samsung Galaxy SII. Ambos cuentan con acelerómetro, sensor de orientación y radio bluetooth. En ambos dispositivos se cargó la tercera aplicación desarrollada y se realizó un experimento en el tercer piso del edificio Valdez Vallejo. El recorrido de prueba se realizó por dos usuarios, cada uno portando un teléfono y siguiendo un recorrido diferente, ver figura 4.17.



**Figura 4.17** Recorrido de prueba para unión de trayectorias.

Utilizando los datos recopilados por ambos teléfonos y Matlab se pudo obtener los recorridos de ambos usuarios, figura 4.18, éstos se trazaron a partir del origen. En la trayectoria A (en azul), primero se da un giro a la izquierda y después uno a la derecha, mientras que en la trayectoria B (en rojo), se aprecia un giro a la derecha y después uno a la izquierda. En ambas también se aprecia un nodo, que es el punto de encuentro.



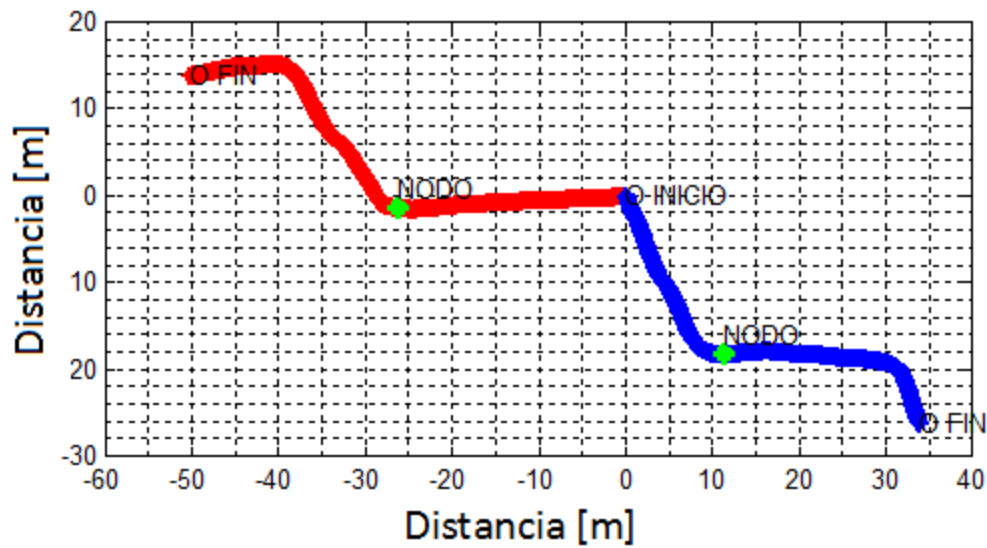


Figura 4.18 Trayectorias A (azul) y B (rojo) trazadas a partir del origen.

Es posible superponer ambos recorridos a partir de los nodos marcados en cada uno. Tomando como referencia la trayectoria A, se calcularon las constantes de traslación y posteriormente se sumaron a las coordenadas de la trayectoria B, figura 4.19.

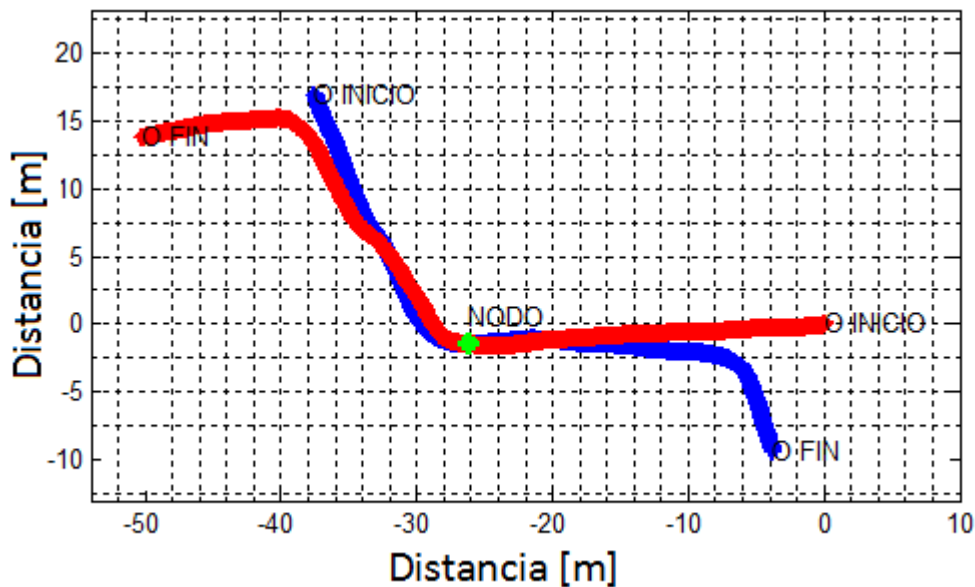


Figura 4.19 Unión de las trayectorias de ambos usuarios.

Aunque se obtiene una buena aproximación de la forma de las trayectorias de los usuarios, los datos del sensor de orientación se ven afectados por perturbaciones magnéticas inherentes al interior de un edificio, como los son campos magnéticos diferentes al de la tierra y objetos metálicos en la proximidad del sensor.

# Capítulo 5

## Pruebas de validación del sistema de seguimiento y localización para interiores

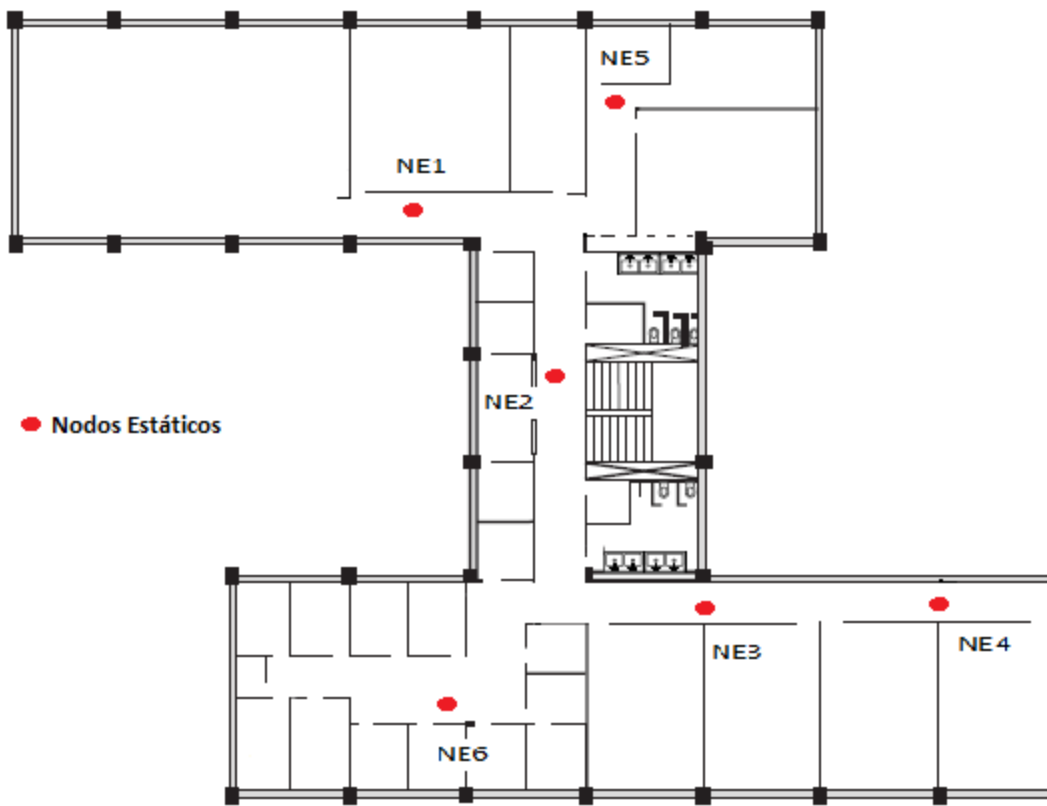
### 5.1 Introducción

En el capítulo anterior se presentó la implementación del sistema de seguimiento y localización para interiores propuesto en esta tesis. En éste se presentan pruebas finales del funcionamiento del sistema utilizando diferentes teléfonos inteligentes.

En este capítulo se muestran dos escenarios, el primero en el interior de un edificio, y el segundo en exteriores dentro del campus de Ciudad Universitaria. En ambos se muestra el funcionamiento del sistema, agregando la interacción con nodos estáticos en el caso del escenario en interiores. Después se calcula el error entre la trayectoria real y la obtenida por medio del sistema. Finalmente, se muestra la funcionalidad que podría tener el sistema como medio de guiado.

### 5.2 Escenario en interiores

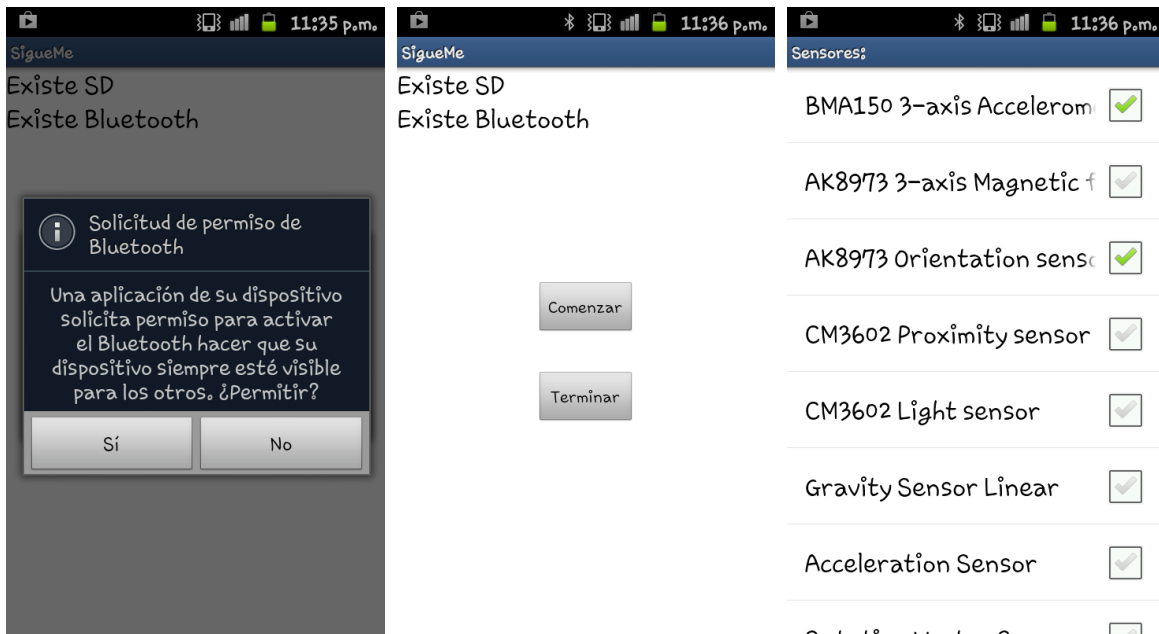
El primer escenario se realizó en el tercer piso del edificio Valdez Vallejo ubicado en el conjunto sur de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en Ciudad Universitaria, ver figura 5.1. En este piso se colocaron 6 nodos estáticos y se realizaron 10 recorridos, para finalmente superponer las 10 trayectorias obtenidas por el sistema.



**Figura 5.1** Plano del tercer piso del edificio Valdez Vallejo en el que se muestran los nodos estáticos del primer escenario.

Se utilizaron los teléfonos HTC Nexus One y Samsung Galaxy SII. Durante estos recorridos se muestran sólo los nodos cuyo valor de RSSI obtenido fue mayor a  $-57$  [dBm], el radio bluetooth de los teléfonos se configuró para buscar dispositivos cada 2 [s]. Se utilizó una velocidad promedio de usuario de 1.125 [m/s].

Para este escenario se desarrolló una aplicación final, que al igual que la aplicación anterior permite activar el dispositivo bluetooth y habilitar su visibilidad, así como encontrar a otros dispositivos que tengan integrado bluetooth. Además obtiene los datos de los sensores del teléfono inteligente y los almacena en un archivo de texto, pero con la diferencia que esta aplicación final es más fácil de utilizar dado que sólo cuenta con dos botones. La figura 5.2 muestra algunos ejemplos de la interfaz de usuario de la aplicación.



**Figura 5.2** Interfaz de la aplicación final para el seguimiento de usuarios.

La forma de operación de esta aplicación es la siguiente:

- En el momento que se abre, revisa que exista radio bluetooth en el teléfono inteligente, así como almacenamiento externo para guardar información, de ser así, lo muestra en pantalla. Además, en ese mismo instante solicita habilitar el radio bluetooth y su visibilidad, el usuario debe permitir la solicitud para el correcto funcionamiento del sistema.
- Las opciones nos permiten habilitar o deshabilitar la captura de datos de los sensores incluidos en el teléfono.
- Por medio del botón “Comenzar”, empieza a almacenar los datos de todos los sensores que se hayan seleccionado. Éstos se guardan en un archivo de texto cuyo título es el nombre del sensor. Además, se abre otro archivo donde se almacena la información básica de los dispositivos bluetooth y comienza el descubrimiento de dispositivos de forma iterativa, cada 2 [s].
- Por medio del botón “Terminar”, finaliza el almacenamiento de datos de los sensores, se cierran los archivos que se hayan abierto y se detiene el proceso de descubrimiento.
- Independientemente de los archivos en los que se guarda la información, se crea uno en el cual se almacenan todos los datos que son recolectados. Éste tiene un formato especial para su posterior lectura, ver figura 5.3. Cada línea empieza con un carácter, “0” para acelerómetro, “2” para sensor de orientación y “b” para indicar un nodo en la trayectoria.

Este carácter es seguido del tiempo del evento en nanosegundos y los datos del sensor o en el caso de los nodos, el nombre, el valor de RSSI y su dirección MAC. Este formato permite un manejo más sencillo de la información.

1	Siguieme				
2					
3	0	28567073	-1.607201	2.2201166	8.539958
4	2	32591464	171.0	-14.0	-10.0
5	0	106707317	-1.1849703	1.4165162	10.079058
6	2	109603659	171.0	-8.0	-7.0
7	0	211493902	-0.7627395	1.4573772	9.534244
8	2	216920732	171.0	-9.0	-5.0
9	0	316768293	-0.08172209	1.2258313	9.507003
10	2	320762195	171.0	-7.0	-1.0
11	0	459024390	0.040861044	1.0760075	9.425281
12	2	462347561	171.0	-7.0	-0.0
13	0	538810976	0.3405087	1.1441092	9.615966
14	2	541585366	171.0	-7.0	2.0
15	b	581067074	NE2	-77	E8:92:A4:C3:8E:80
16	0	636737806	0.19068487	2.2609777	9.575105
17	2	639420732	171.0	-13.0	1.0
18	0	747926831	0.19068487	1.9885708	9.425281
19	2	750579270	171.0	-12.0	1.0
20	0	847225612	0.27240697	1.879608	9.888372
21	2	850975612	171.0	-11.0	2.0
22	0	946524394	0.46309182	2.3699405	8.117727
23	2	950518296	171.0	-16.0	3.0
24	b	1044634148	NE1	-61	B8:C6:8E:95:1F:64
25	0	1054725611	0.42223078	2.1792557	9.275456
26	2	1057378050	172.0	-13.0	3.0
27	0	1147682929	-0.29964766	2.3018389	12.026767
28	2	1150701221	172.0	-11.0	-1.0
29	0	1257103661	-0.29964766	0.6946377	9.575105
30	2	1259268295	172.0	-4.0	-2.0
31	0	1368963417	-1.2258313	1.0760075	9.507003
32	2	1372469514	172.0	-6.0	-7.0

**Figura 5.3** Formato en el que se almacenan los datos para su posterior procesamiento.

En la figura 5.4 se muestra tanto el recorrido que siguió el usuario 1 (U1), como la trayectoria obtenida por medio de los datos capturados. También se muestran los nodos estáticos que se registraron. Se puede apreciar en la figura 5.4, que aunque durante el recorrido, U1 se encontró con el nodo NE4 el sistema no pudo detectarlo. Esto puede ser debido a que cuando comienza el descubrimiento sólo se reciben las contestaciones de los nodos cuya respuesta llegue antes de que

se cancele el proceso. Se observa que la trayectoria obtenida conserva la forma de la ruta del usuario.

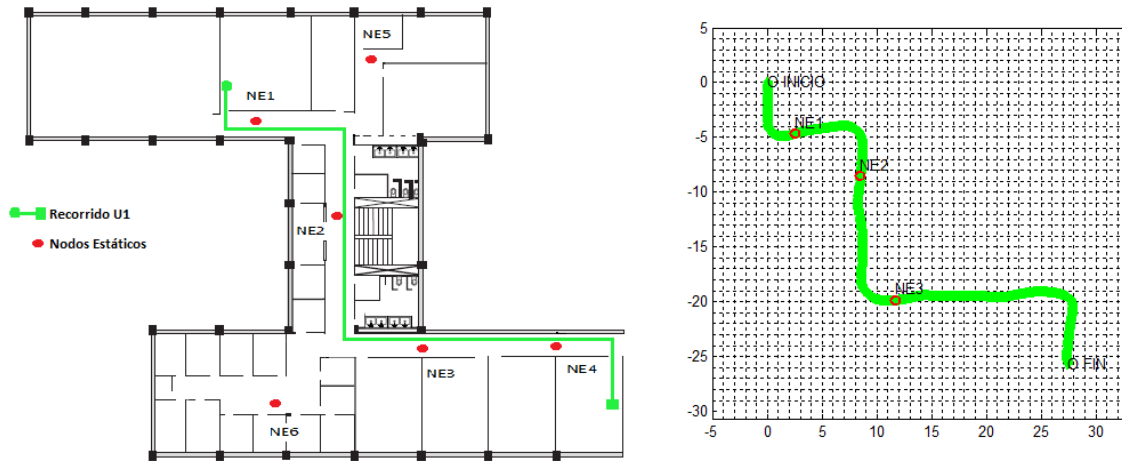


Figura 5.4 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 1.

La figura 5.5 muestra el recorrido del usuario 2 (U2), así como la trayectoria obtenida por el sistema, las cuales son muy similares. A diferencia de la trayectoria 1, en ésta el sistema pudo detectar todos los nodos.

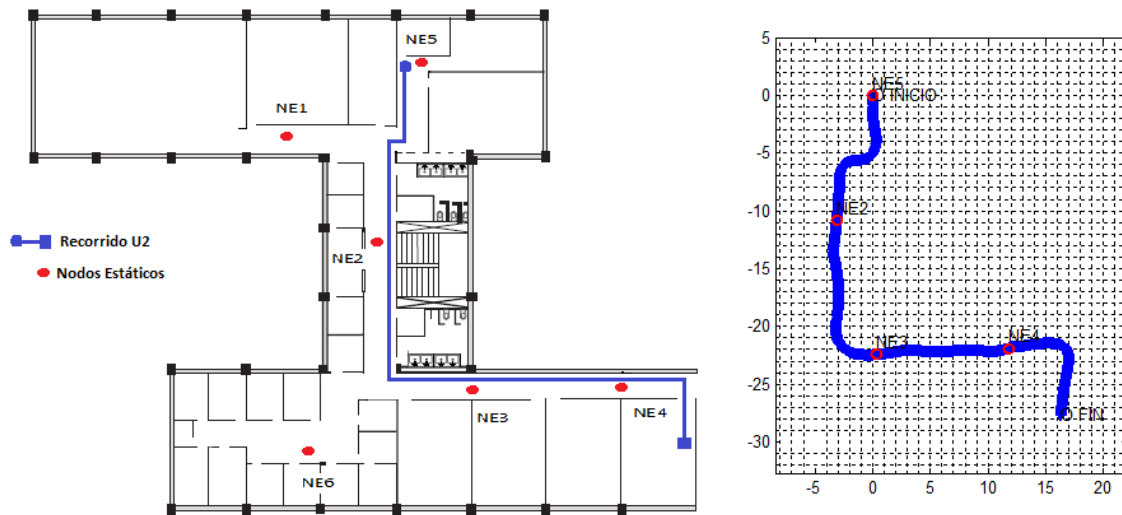


Figura 5.5 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 2.

La figura 5.6 muestra el recorrido del usuario 3 (U3), así como la trayectoria obtenida por el sistema, éstas son muy similares entre sí. El sistema logró detectar los tres nodos estáticos a lo largo de la ruta, aunque éstos no se encuentran en el lugar exacto donde deberían estar, se encuentran en la cercanía de la posición real.

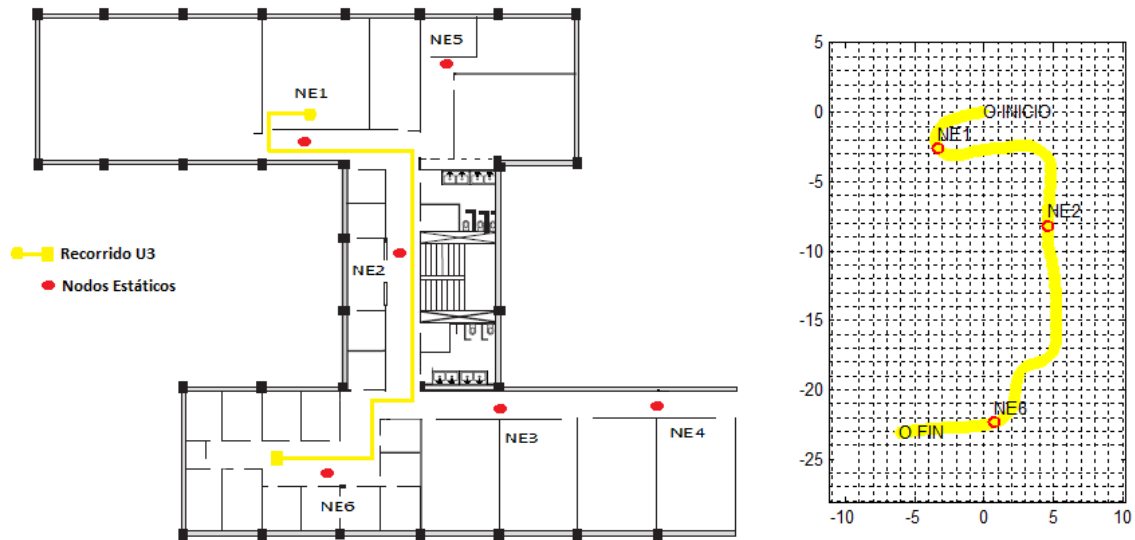


Figura 5.6 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 3.

La figura 5.7 muestra el recorrido del usuario 4 (U4), así como la trayectoria obtenida por el sistema, ésta conserva la forma del camino que siguió U4 con una ligera inclinación en las rectas verticales. El sistema logró detectar los tres nodos estáticos a lo largo de la ruta, aunque NE2 se encuentra alejado del lugar donde debería de estar.

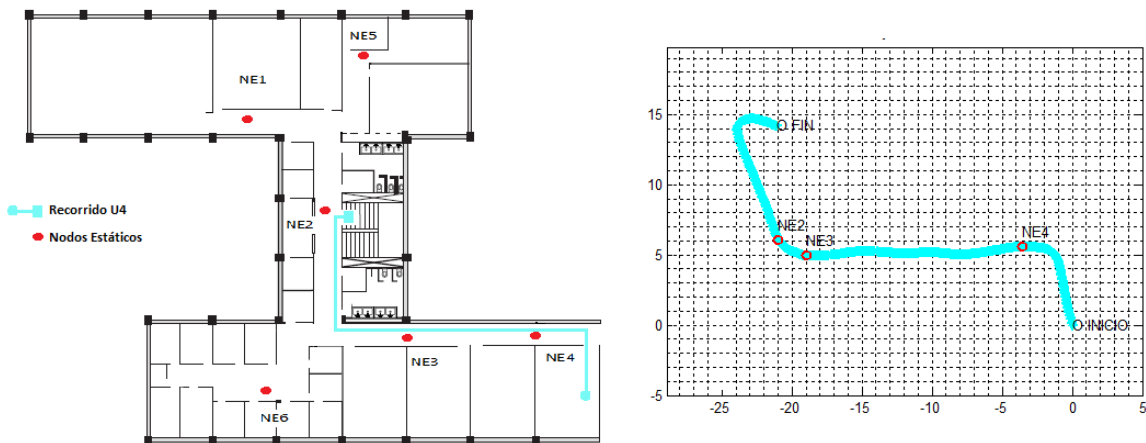


Figura 5.7 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 4.

La figura 5.8 muestra el recorrido del usuario 5 (U5), así como la trayectoria obtenida por el sistema, ambas muy similares. El sistema detectó los tres nodos estáticos a lo largo de la ruta.

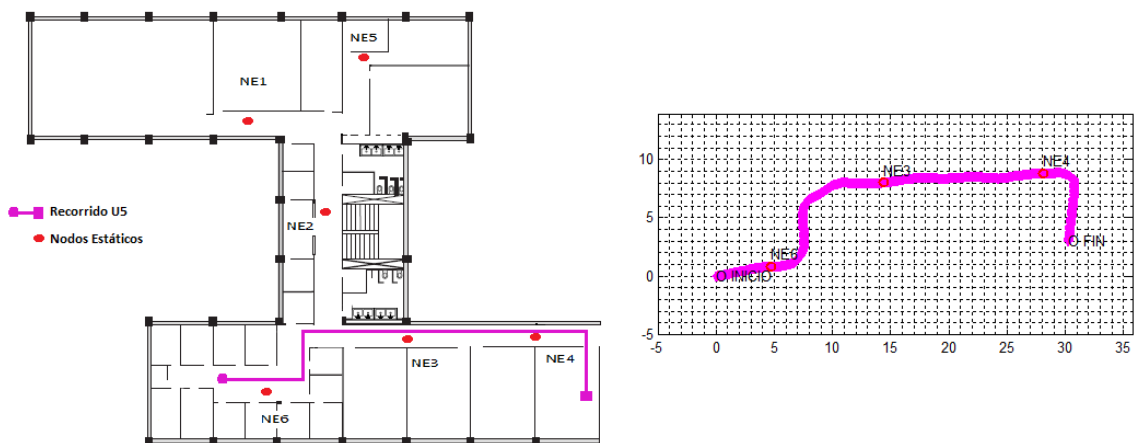


Figura 5.8 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 5.

La figura 5.9 muestra el recorrido del usuario 6 (U6), así como la trayectoria obtenida por el sistema, la cual conserva la forma del camino que siguió U6. En este caso el sistema no logró detectar los tres nodos estáticos a lo largo de la ruta, sólo se detectaron dos: NE2 y NE3.

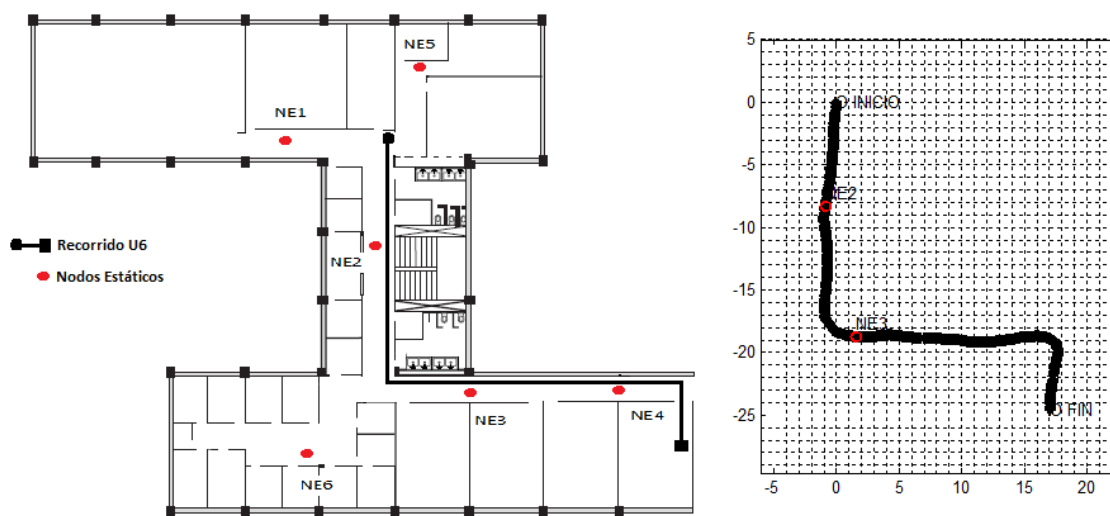


Figura 5.9 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 6.



La figura 5.10 muestra el recorrido del usuario 7 (U7), así como la trayectoria obtenida por el sistema, éstas son muy similares entre sí. El sistema detectó los dos nodos estáticos a lo largo de la ruta, aunque NE2 se detectó alejado de la posición real en la que está, caso parecido al del U4.

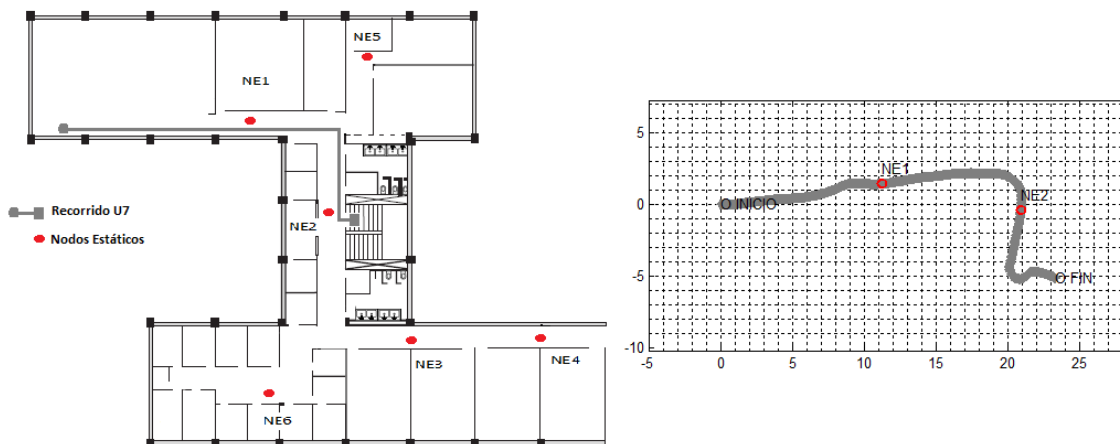


Figura 5.10 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 7.

La figura 5.11 muestra el recorrido del usuario 8 (U8), así como la trayectoria obtenida por el sistema, la cual conserva la forma del camino que siguió U8 con ligeras inclinaciones y elevaciones en las rectas horizontales. El sistema detectó sólo dos de los cuatro nodos estáticos a lo largo de la ruta.

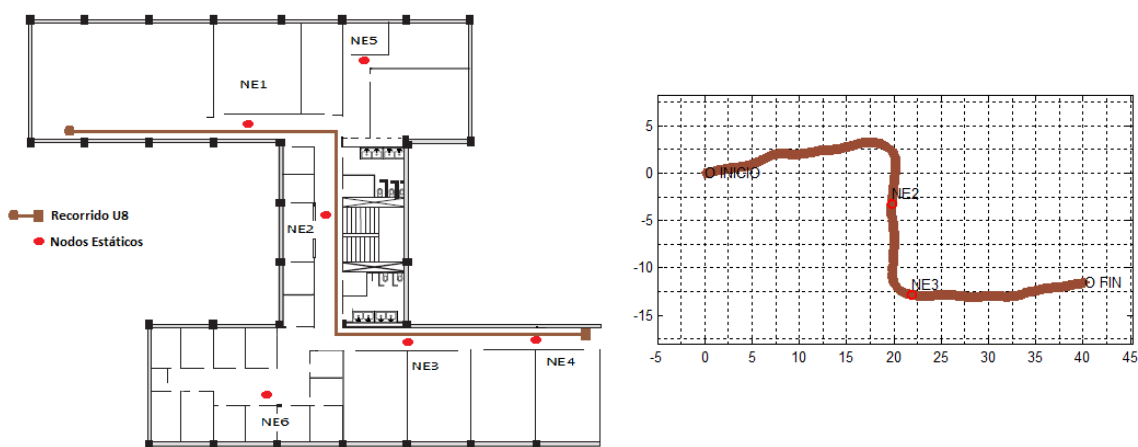


Figura 5.11 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 8.

La figura 5.12 muestra el recorrido del usuario 9 (U9), así como la trayectoria obtenida por el sistema, ambas muy parecidas. El sistema detectó sólo dos de los tres nodos estáticos a lo largo de la ruta.

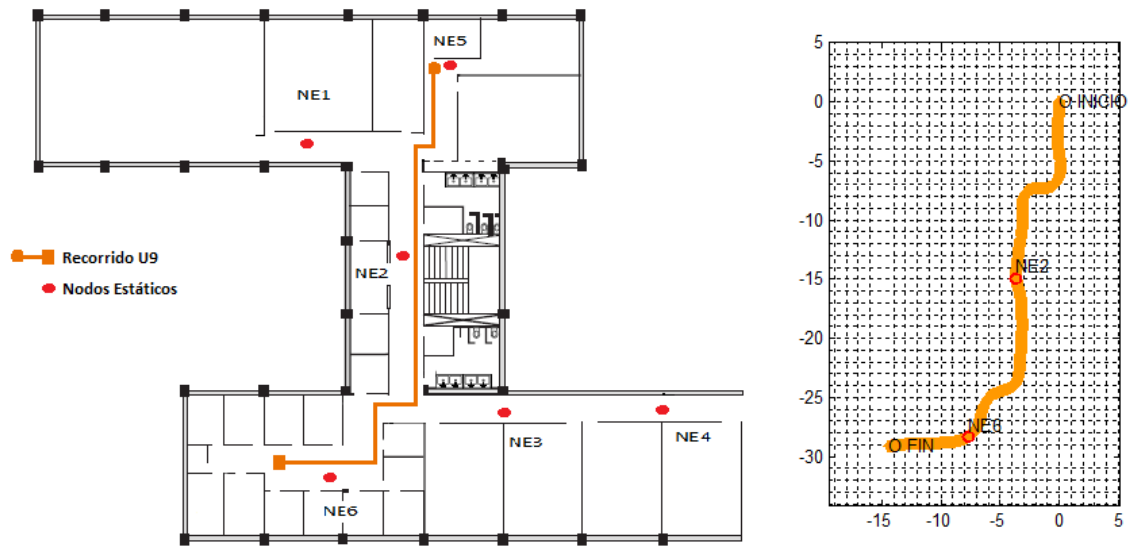


Figura 5.12 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 9.

La figura 5.13 muestra el recorrido del usuario 10 (U10), así como la trayectoria obtenida por el sistema, la cual conserva la forma del camino que siguió U10, con una ligera inclinación en la recta inicial. El sistema sólo detectó uno de los tres nodos posibles a lo largo de la ruta.

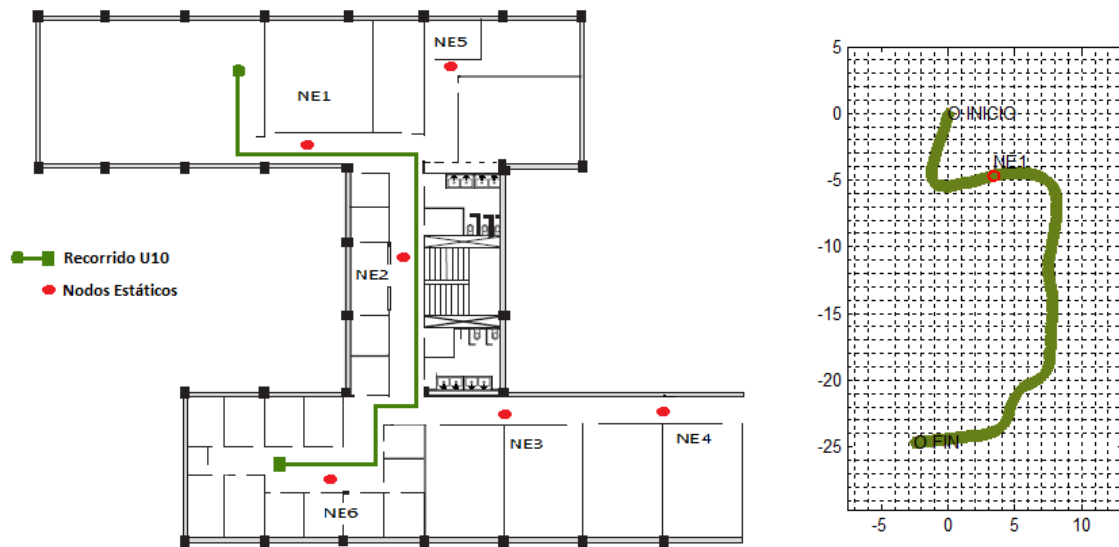
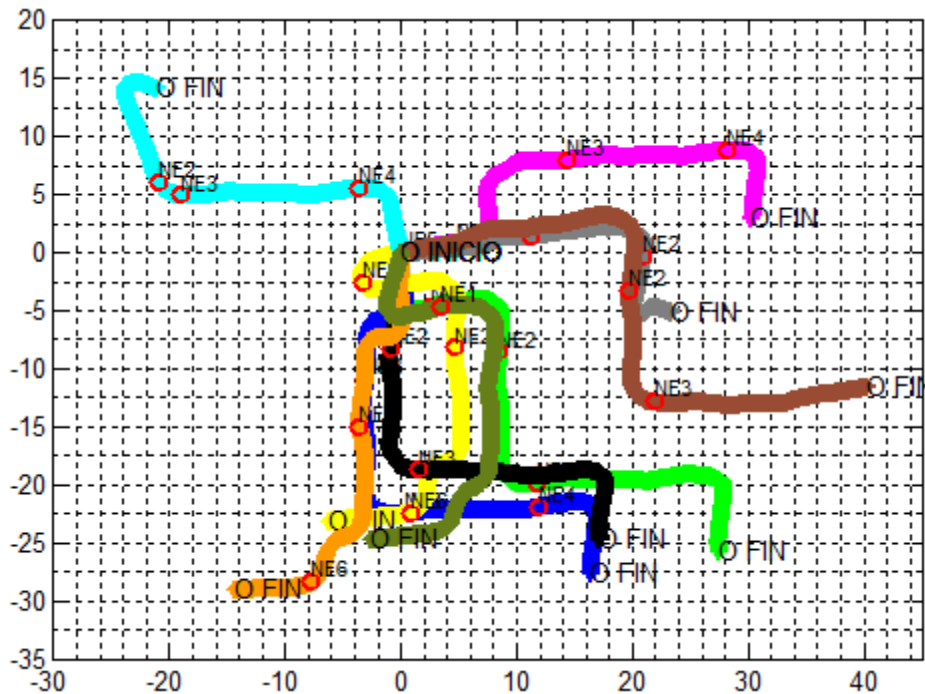


Figura 5.13 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario 10.

Cada una de las trayectorias es trazada a partir del origen dado que no se tiene ninguna información del punto inicial de ningún usuario. El algoritmo de unión de trayectorias trabajará suponiendo que no se conoce dónde se encuentran los nodos estáticos.

La figura 5.14, muestra todas las trayectorias juntas antes de aplicar el algoritmo, éstas se encuentran desordenadas y a simple vista no proporcionan ninguna información que pueda permitir a un usuario encontrar a otro de forma adecuada.



**Figura 5.14** Rutas juntas antes de aplicar el algoritmo de unión de trayectorias.

El algoritmo de unión de trayectorias necesita que cada ruta posea por lo menos un nodo estático; funciona de la siguiente manera:

- Primero busca la trayectoria con el mayor número de nodos estáticos y la toma como base (TB), en caso de existir dos o más que contengan el mismo número de nodos, se escogerá aquella con el mayor promedio de los valores de RSSI.
- Después toma otra trayectoria, si ésta tiene al menos un nodo estático (NT) en común con TB, se realiza la traslación. Si se tiene un segundo nodo en común, ésta se rota con respecto a NT, a fin de que la distancia entre el segundo nodo de ambas rutas sea mínima. Si el recorrido tiene más de dos nodos en común, se toman los dos cuyo valor de RSSI sea mayor.
- En caso de que la trayectoria contenga nodos estáticos que TB no, éstos serán almacenados para usarlos en caso de que alguna ruta no tenga nodos en común con TB, éstos también serán actualizados si se encuentra uno con un valor de RSSI mayor.
- El proceso anterior se repite para todos los recorridos.

Para el primer escenario TB es la trayectoria 2, ya que ésta contiene el mayor número de nodos estáticos, como se muestra en la tabla 5.1.

Número de trayectoria	Número de nodos estáticos	Valor promedio de RSSI por nodo estático [dBm]
1	3	-49
2	4	-49.5
3	3	-54
4	3	-53
5	3	-51.3
6	2	-44
7	2	-54
8	2	-43
9	2	-50
10	1	-51

Tabla 5.1 Información de los nodos estáticos en cada trayectoria.

La figura 5.15, muestra tres gráficas, en la primera la trayectoria 1 y TB antes de la traslación, la segunda muestra la traslación con respecto a NE3 y finalmente, en la tercera se aprecia la rotación para que la distancia entre NE2 de ambas rutas sea mínima, en rojo el recorrido de U1 antes de ser rotado y en verde después de la rotación.

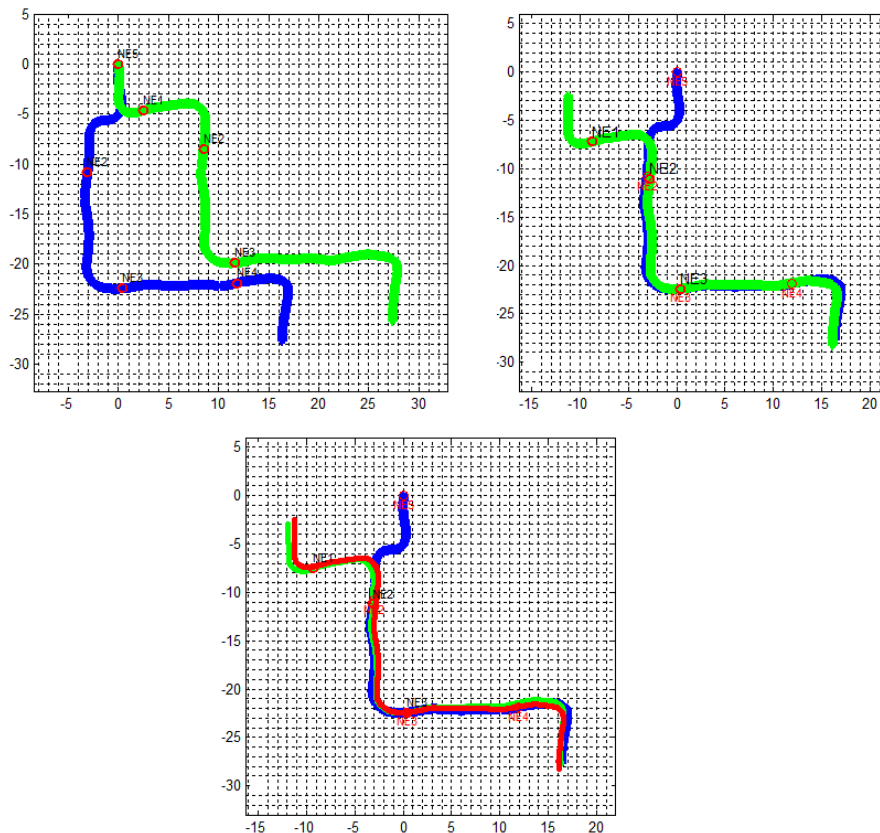


Figura 5.15 Traslación y rotación de la trayectoria 1 con respecto a la trayectoria base.

La figura 5.16, muestra dos gráficas. En la primera la trayectoria 3 y TB, la segunda la traslación con respecto al nodo NE2. Al sólo tener un nodo en común no se pudo realizar la rotación. La ruta 3 contiene dos nodos que TB no, éstos se agregan a TB.

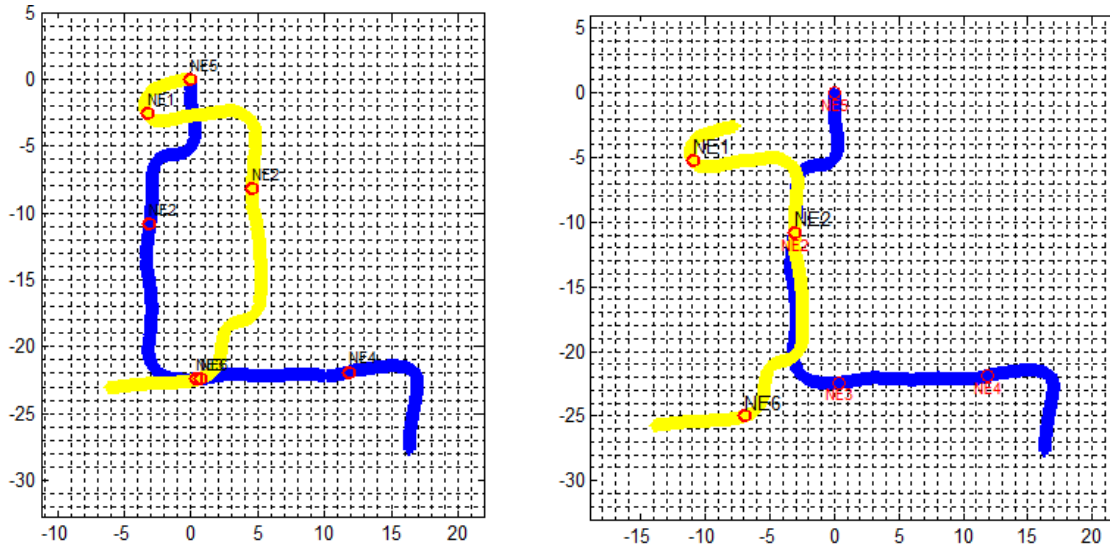


Figura 5.16 Traslación de la trayectoria 3 con respecto a la trayectoria base.

La figura 5.17, muestra tres gráficas. En la primera la trayectoria 4 y TB, la segunda la traslación con respecto a NE3 y finalmente, en la tercera se aprecia la rotación para que la distancia entre NE2 de ambas rutas sea mínima. En rojo el recorrido 4 antes de ser rotado y en cian después de la rotación. Aunque en este caso la rotación es mínima, se nota que la posición del nodo NE2 de la trayectoria es errónea.

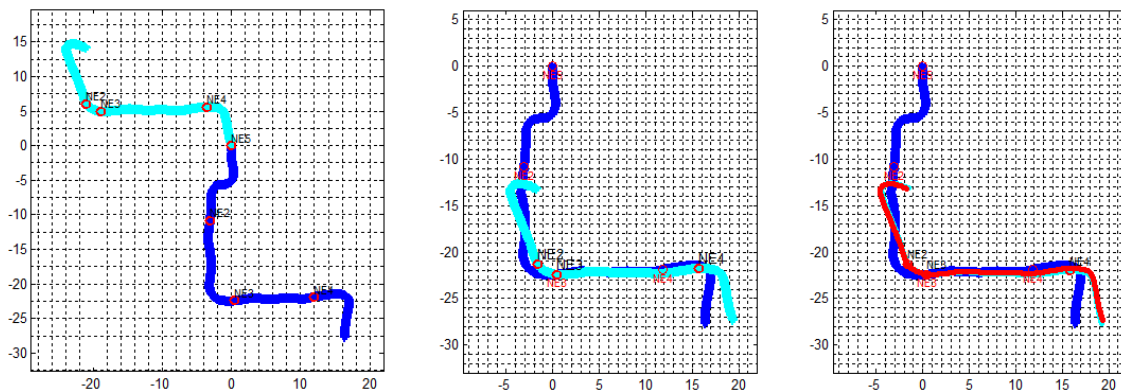
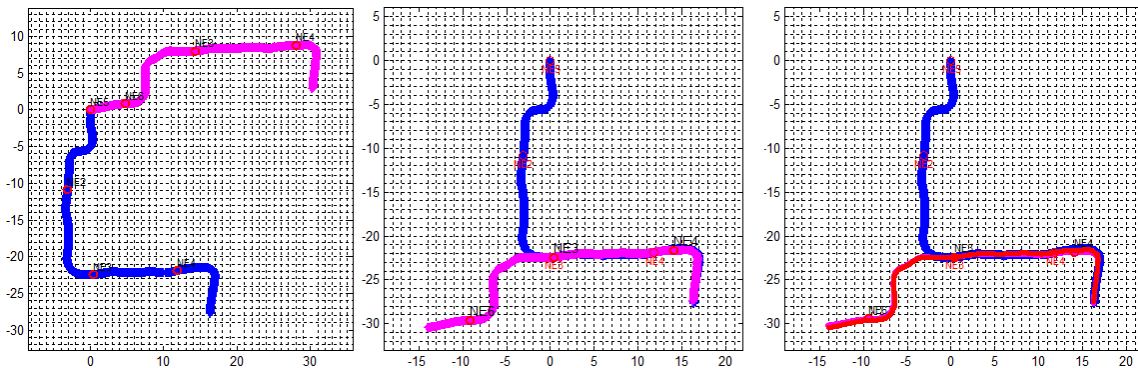


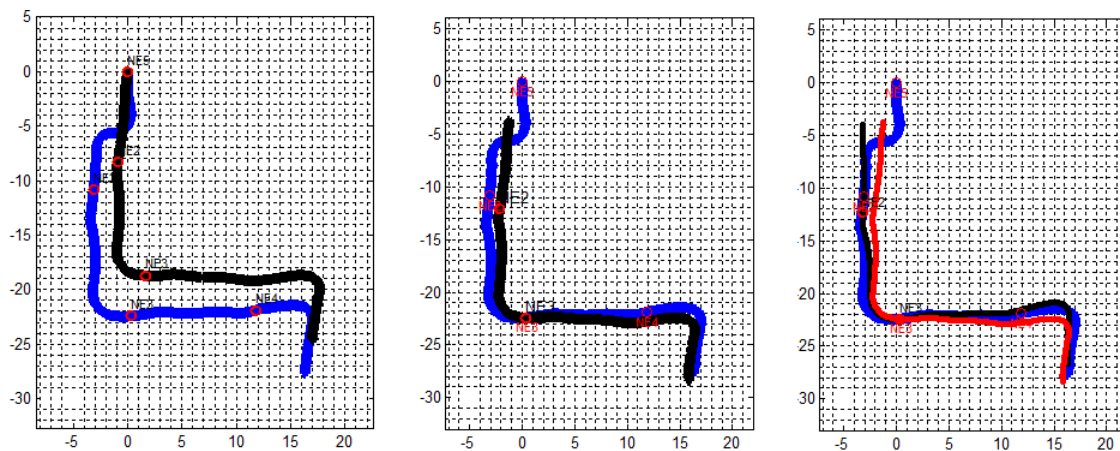
Figura 5.17 Traslación y rotación de la trayectoria 4 con respecto a la trayectoria base.

La figura 5.18, muestra tres gráficas, en la primera la trayectoria 5 y TB, en la segunda la traslación con respecto a NE3 y finalmente, en la tercera se aprecia la rotación para que la distancia entre NE4 de ambas rutas sea mínima, en rojo el recorrido de U5 antes de ser rotado y en morado después de la rotación. La trayectoria 5 contiene a NE6, éste se comparó con el valor almacenado de NE6 en TB y al ser mayor al de la trayectoria 3, el valor se actualizó.



**Figura 5.18** Traslación y rotación de la trayectoria 5 con respecto a la trayectoria base.

La figura 5.19, muestra tres gráficas, en la primera la trayectoria 6 y TB, en la segunda la traslación con respecto a NE3 y finalmente, en la tercera se aprecia la rotación para que la distancia entre NE2 de ambas rutas sea mínima, en rojo el recorrido de U6 antes de ser rotado y en negro después, aunque la rotación fue pequeña la unión mejora después de ésta.



**Figura 5.19** Traslación y rotación de la trayectoria 6 con respecto a la trayectoria base.

La figura 5.20, muestra dos gráficas, en la primera la trayectoria 7 y TB, en la segunda la traslación con respecto a NE2, al solo tener un nodo en común no se pudo llevar a cabo la rotación. El recorrido de U7 contiene a NE1, éste se comparó con el valor almacenado en TB y al ser menor al de la trayectoria 1 el valor no se actualizó.

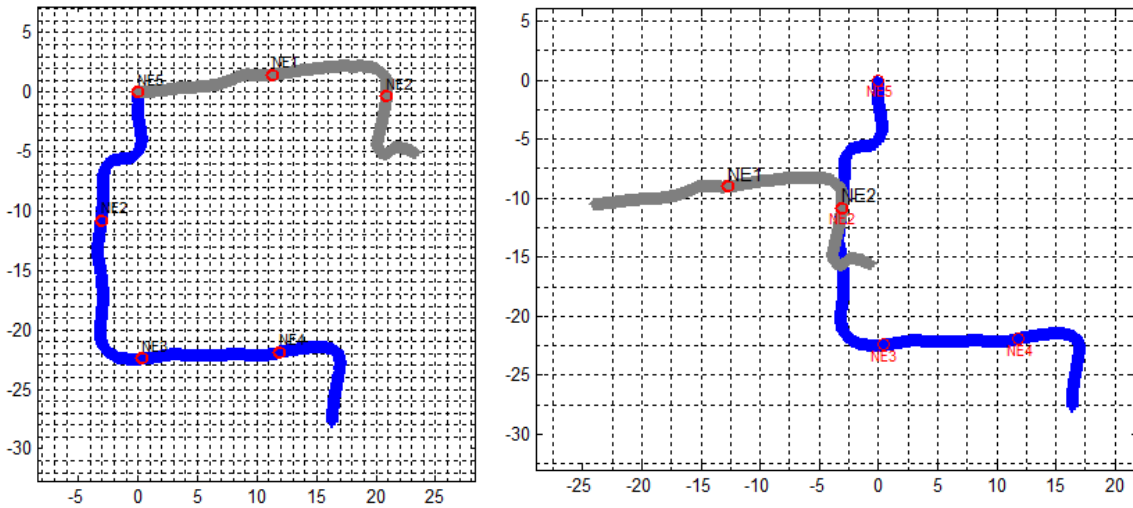


Figura 5.20 Traslación de la trayectoria 7 con respecto a la trayectoria base.

La figura 5.21, muestra dos gráficas, en la primera la trayectoria 8 y TB, en la segunda la traslación con respecto a NE3 y finalmente, en la tercera se aprecia la rotación para que la distancia entre NE2 de ambas rutas sea mínima, en rojo el recorrido de U8 antes de ser rotada y en negro después, en este caso la rotación empeoró la unión, esto debido a un error en NE3.

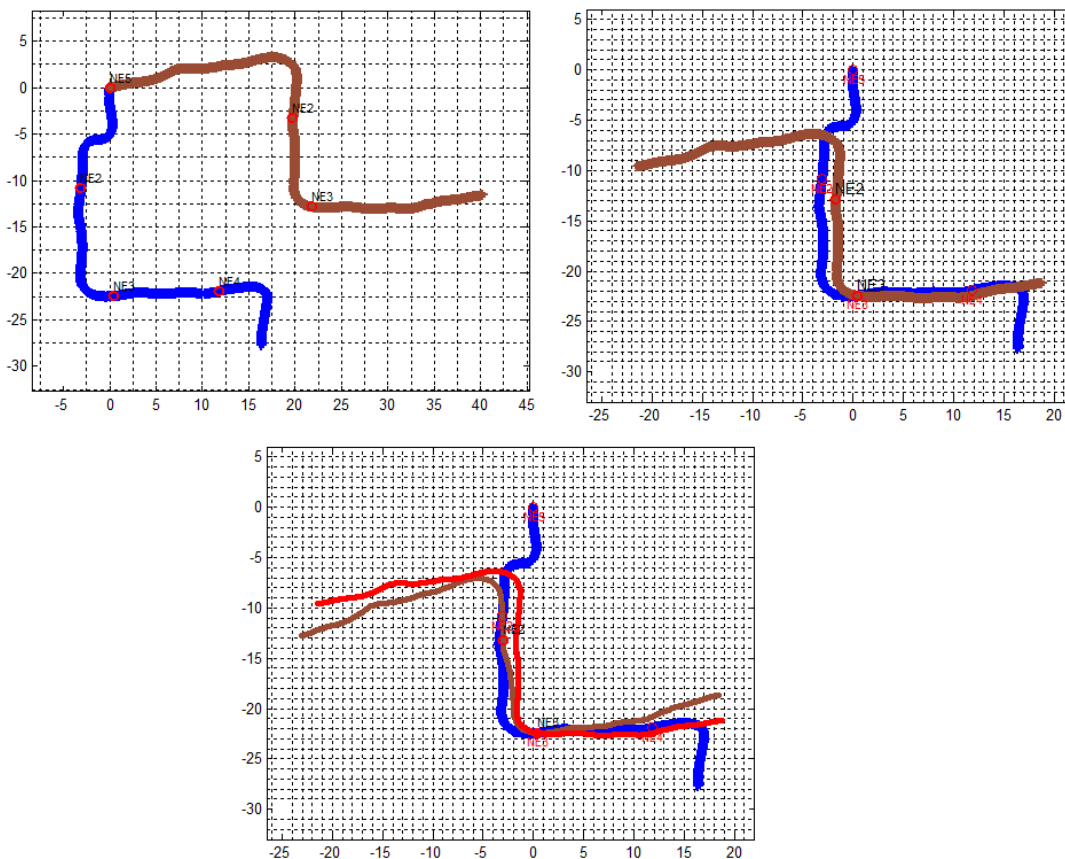
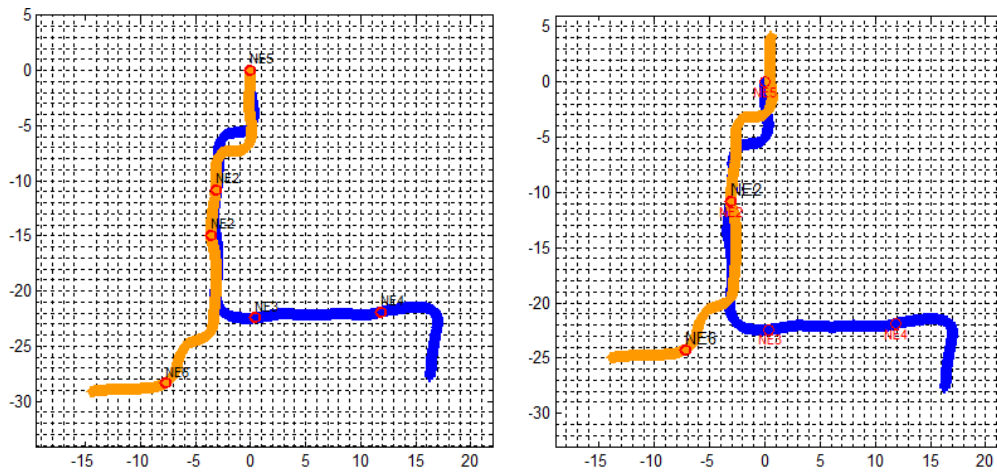


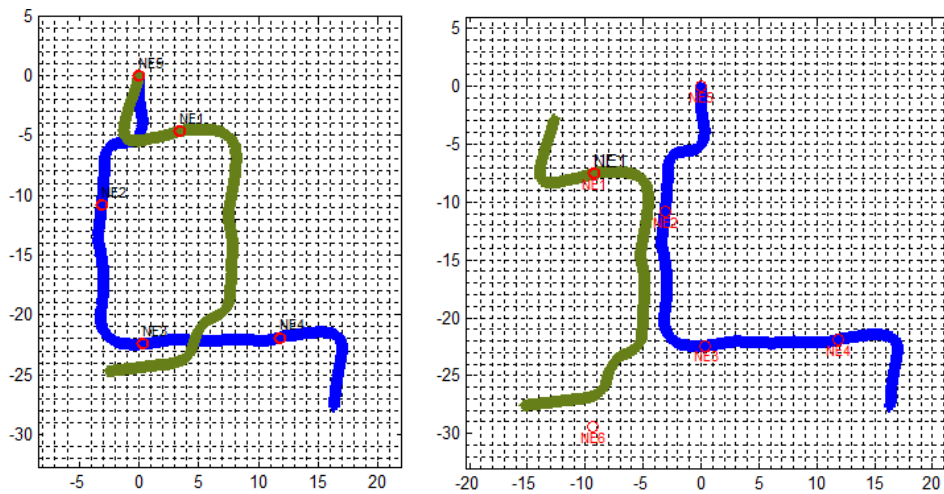
Figura 5.21 Traslación y rotación de la trayectoria 8 con respecto a la trayectoria base.

La figura 5.22, muestra dos gráficas, en la primera la trayectoria 9 y TB, y en la segunda se aprecia la traslación con respecto a NE2, al solo tener un nodo en común no se pudo llevar a cabo la rotación. El recorrido U9 contiene a NE6, éste se comparó con el valor almacenado en TB y al ser menor al de la trayectoria 5 el valor no se actualizó.



**Figura 5.22** Traslación de la trayectoria 9 con respecto a la trayectoria base.

La figura 5.23, muestra dos gráficas, en la primera la trayectoria 10 y la trayectoria base antes de la traslación, dado que ambas trayectorias no tienen nodos en común se utilizó el valor almacenado de NE1 de la trayectoria 1 para hacer la traslación. Dado que la ruta 10 sólo contiene un nodo no se pudo realizar otra acción.



**Figura 5.23** Traslación de la trayectoria 10 con respecto a la trayectoria base.

Una vez aplicado el algoritmo de unión de trayectorias, figura 5.24, se obtiene una mejor aproximación de la forma en que se desplazaron los usuarios de los teléfonos inteligentes dentro del edificio. Aunque las rutas no embonaron perfectamente, se puede notar donde existen pasillos y en qué lugares se puede dar vuelta. La figura 5.24 también muestra las trayectorias sobre la



imagen del edificio vista desde arriba, con la cual se puede apreciar que el resultado es una buena aproximación.



Figura 5.24 Rutas juntas después de aplicar el algoritmo de unión de trayectorias.

Utilizando los nodos estáticos dentro de un edificio y una trayectoria base se logró unir 10 trayectorias obtenidas por medio del uso de teléfonos inteligentes, sin conocer la posición inicial de ninguna de ellas. La calidad del resultado depende en gran medida de un buen funcionamiento del subsistema de detección de nodos.

### 5.3 Escenario en exteriores

El segundo escenario se realizó fuera de los edificios en el conjunto sur de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en Ciudad Universitaria, figura 5.25. Participaron 4 usuarios usando 4 teléfonos inteligentes diferentes, no se utilizó ningún nodo estático. Se empleó la misma aplicación que en el

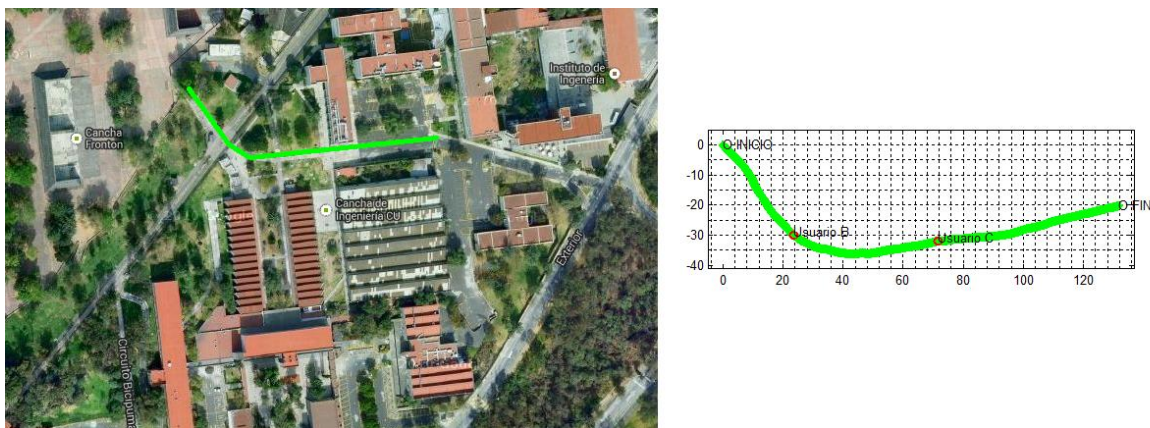
escenario en el interior del edificio Valdez Vallejo, los radios bluetooth de los teléfonos fueron configurados para buscar dispositivos cada 2.5 [s], con un umbral de -57 [dBm] y una velocidad promedio de usuario de 1.125 [m/s].



**Figura 5.25** Conjunto sur de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en Ciudad Universitaria. Figura obtenida de [24].

Para los recorridos se utilizaron los teléfonos HTC Nexus One, Samsung Galaxy SII, LG L5 y Samsung Galaxy SIII. A cada usuario se le pidió que siguiera una ruta diferente, de tal modo que se encontraran en el camino.

El usuario A (UA) utilizó el SIII. La figura 5.26 muestra tanto el recorrido que siguió UA, como la trayectoria obtenida por medio de los datos capturados, se puede apreciar que la forma de ambas es muy similar. En la ruta A también se muestran los usuarios que fueron encontrados por UA, se encontró primero al usuario B y después al usuario C.



**Figura 5.26** Recorrido y trayectoria obtenida del usuario A.

El usuario B (UB) utilizó el L5. En la figura 5.27 muestra tanto el recorrido que se le pidió a UB que siguiera, como la trayectoria trazada por medio de los datos del sistema, como se puede ver en la figura 5.27, la línea recta obtenida por medio del L5 tiene una inclinación menor que la ruta que se le pidió a UB que siguiera. La figura también muestra que UB encontró primero al usuario A y después al D.

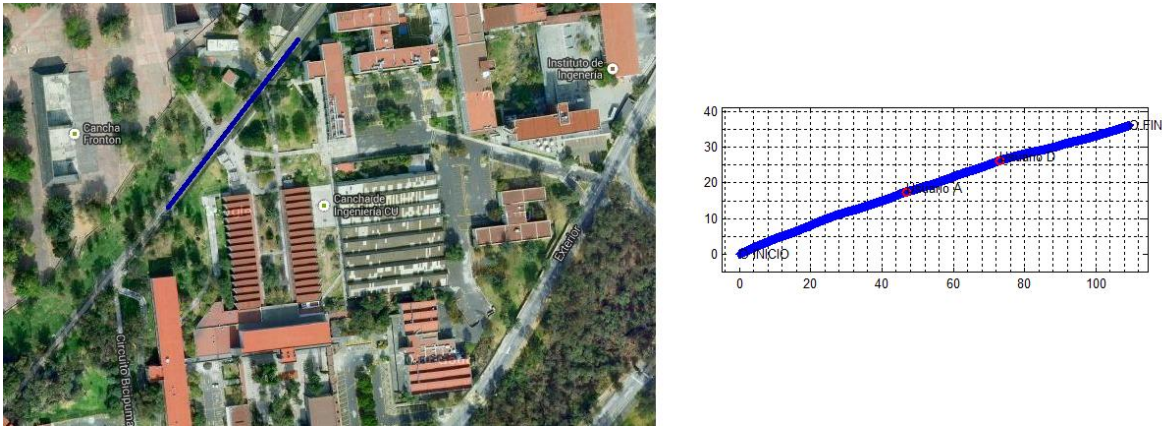


Figura 5.27 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario B.

El usuario C (UC) utilizó el Nexus One. En la figura 5.28 muestra tanto el recorrido que se le solicitó a UC que siguiera, como la trayectoria obtenida por medio de los datos capturados, se puede ver que aunque son muy similares, la obtenida por el sistema está un poco rotada. La trayectoria C tiene un nodo que representa un punto de encuentro con el usuario A.



Figura 5.28 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario C.

El usuario D (UD) utilizó el SII. La figura 5.29 muestra el recorrido que se le pidió al UD que siguiera y la trayectoria trazada por medio de los datos obtenidos, ambas muy parecidas entre sí. La trayectoria D muestra un nodo que representa un punto de encuentro con el usuario B.



Figura 5.29 Recorrido y trayectoria obtenida del usuario D.

Cada una de las rutas obtenidas por el sistema fueron trazadas a partir del origen, dado que no se tenía ninguna información del punto inicial de ningún usuario, figura 5.30. El algoritmo de unión de trayectorias funciona de manera muy similar al punto anterior, excepto que en este escenario no se trabaja con nodos estáticos.

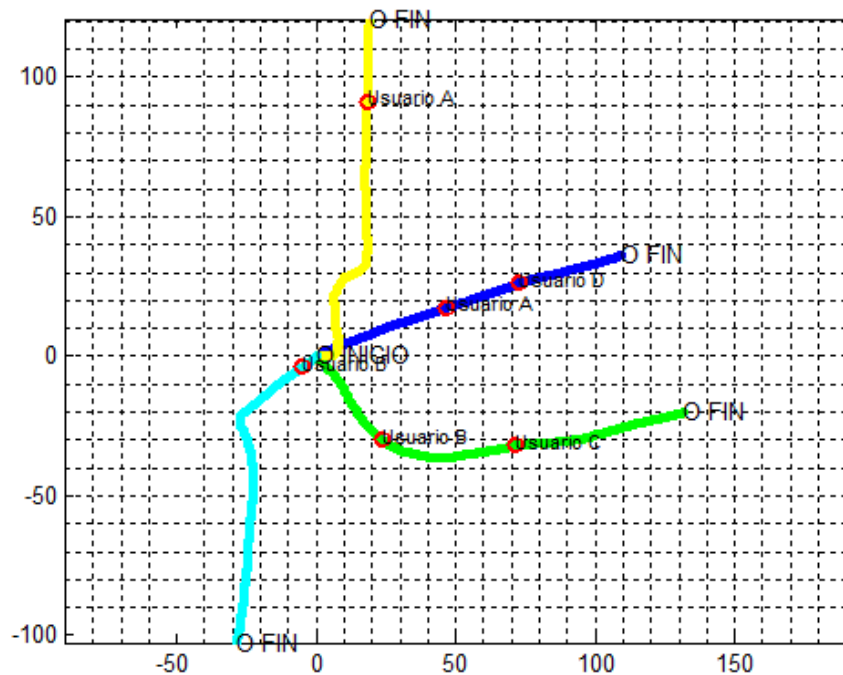


Figura 5.30 Rutas de los 4 usuarios antes de la unión de trayectorias.

En la figura 5.30 se muestran todas las rutas sin ningún orden, la única información que proporcionan es el inicio y el final del recorrido y a qué usuarios se encontraron durante el camino. El algoritmo de unión de trayectorias en este escenario funciona de la siguiente manera:

- Primero se ordenan todas las trayectorias de mayor a menor número de nodos y se escoge la primera como la TB.
- Después se toma otra trayectoria, si ésta se encuentra en los nodos de TB, se busca su punto en común y se efectúa la traslación. Éste proceso se repite cambiando de recorrido hasta acabar con los nodos de TB.
- TB será cambiada (conforme el orden que se les dio) y se repetirá el proceso anterior hasta que hayan usado todas las trayectorias y todos sus nodos.

En el caso de este escenario en exteriores, TB es la trayectoria A, aunque cuenta con el mismo número de nodos que la trayectoria B, es indistinto utilizar cualquiera de las dos.

TB tiene dos nodos, uno con UB y otro con UC, primero busca la trayectoria B y con las coordenadas de los nodos en común (nodo B de trayectoria A y nodo A de trayectoria B) realiza la traslación. La figura 5.31 muestra dos gráficas, en la primera TB y la trayectoria B, y en la segunda ambas después de la traslación. En este caso no se puede efectuar una rotación dado que sólo tienen un nodo en común.

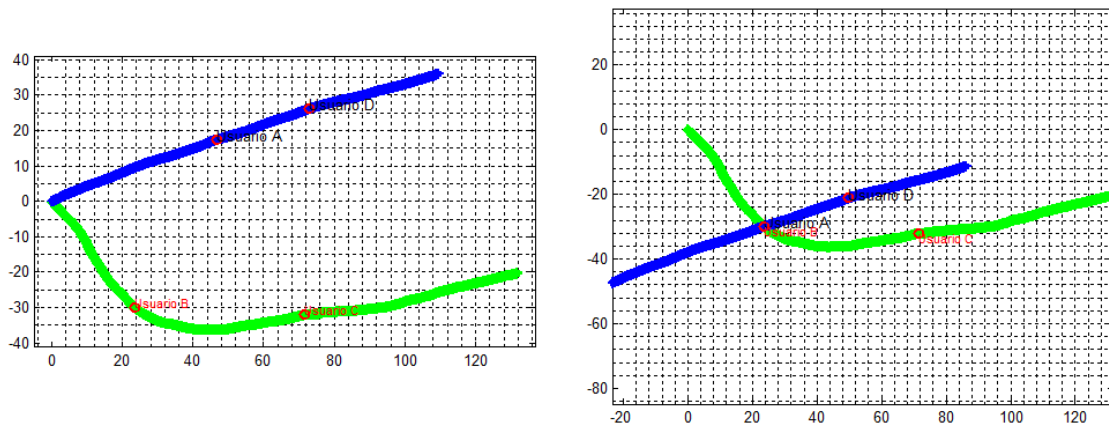
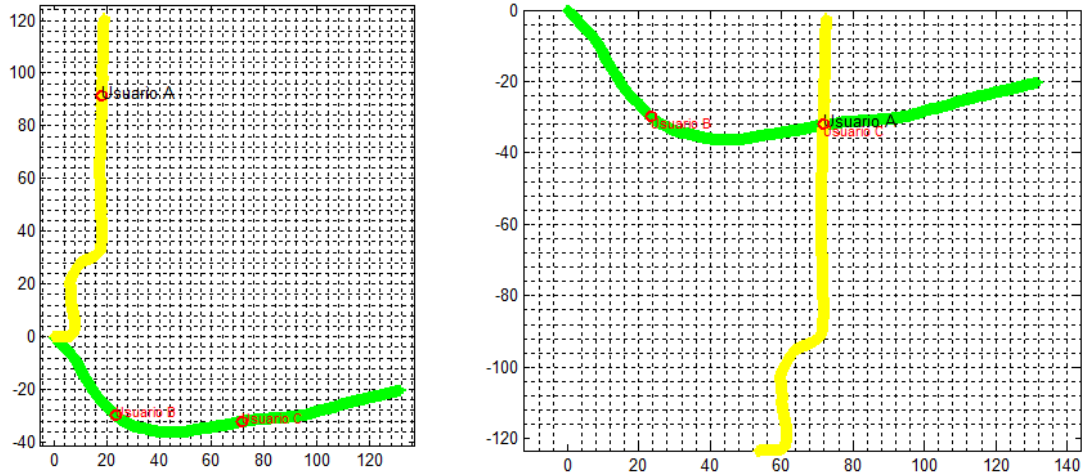


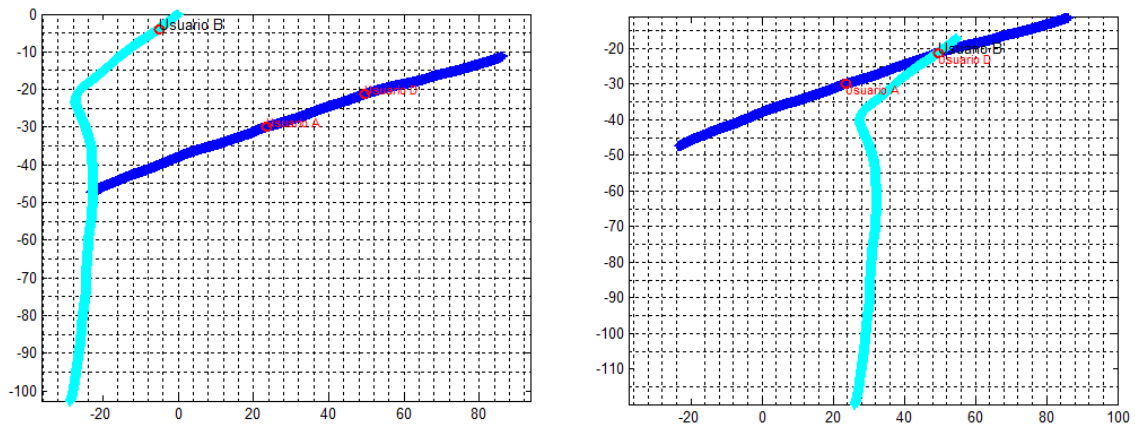
Figura 5.31 Antes y después de la traslación de la trayectoria del usuario B.

Una vez utilizado el primer nodo de TB, se utiliza el segundo (el nodo con UC). La figura 5.32 muestra dos gráficas, en la primera TB y la trayectoria C, y en la segunda ambas después de la traslación.



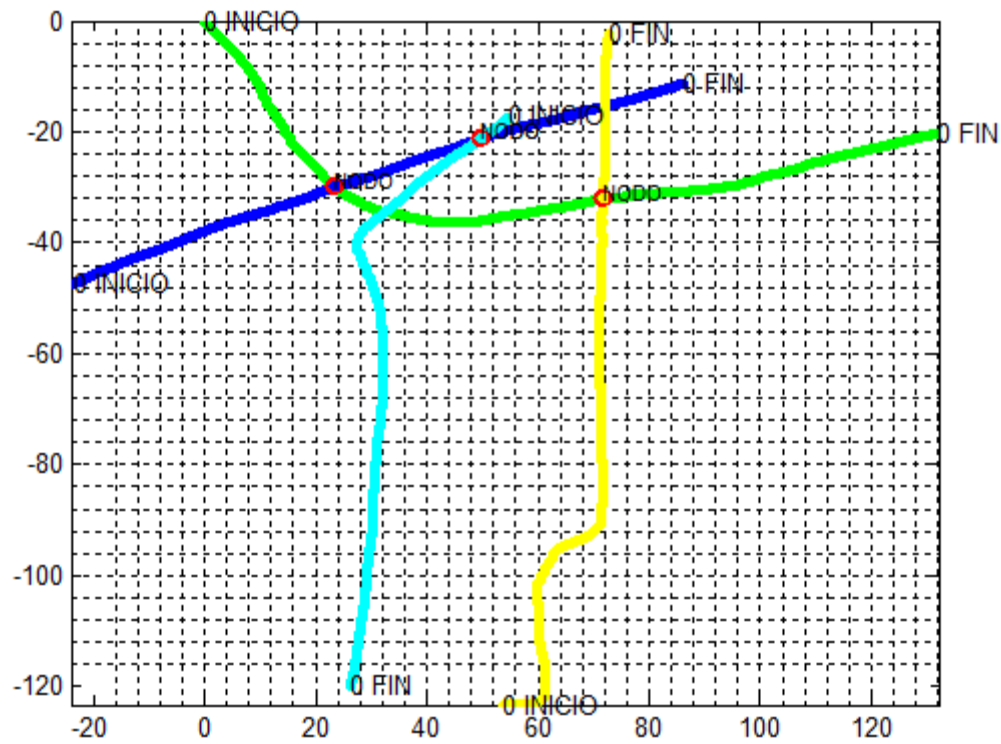
**Figura 5.32** Antes y después de la traslación de la trayectoria del usuario C.

Al no existir ningún otro nodo en la trayectoria A, ésta se cambia y la nueva TB es la segunda con el mayor número de nodos, en este caso la trayectoria B. La figura 5.33 muestra dos gráficas, en la primera la nueva TB y la trayectoria D, y en la segunda ambas después de la traslación con respecto al nodo de la ruta B que no se había utilizado. Se puede apreciar cómo en la primera gráfica la trayectoria B no está trazada a partir del origen dado que ésta ya se había trasladado previamente.



**Figura 5.33** Antes y después de la traslación de la trayectoria del usuario D.

Una vez trasladadas todas las rutas, figura 5.34, se obtiene la unión final, que puede proporcionar información para el guiado de usuarios.



**Figura 5.34** Rutas juntas después de aplicar el algoritmo de unión de trayectorias en el escenario exterior.

Finalmente, al superponer la unión de trayectorias sobre el mapa del conjunto sur de la Facultad de Ingeniería, figura 5.35, se nota cómo influye el hecho de que las rutas sólo tengan un nodo en común, dado que no se pueden corregir errores debido a inclinaciones de los recorridos obtenidos, como en el escenario anterior.

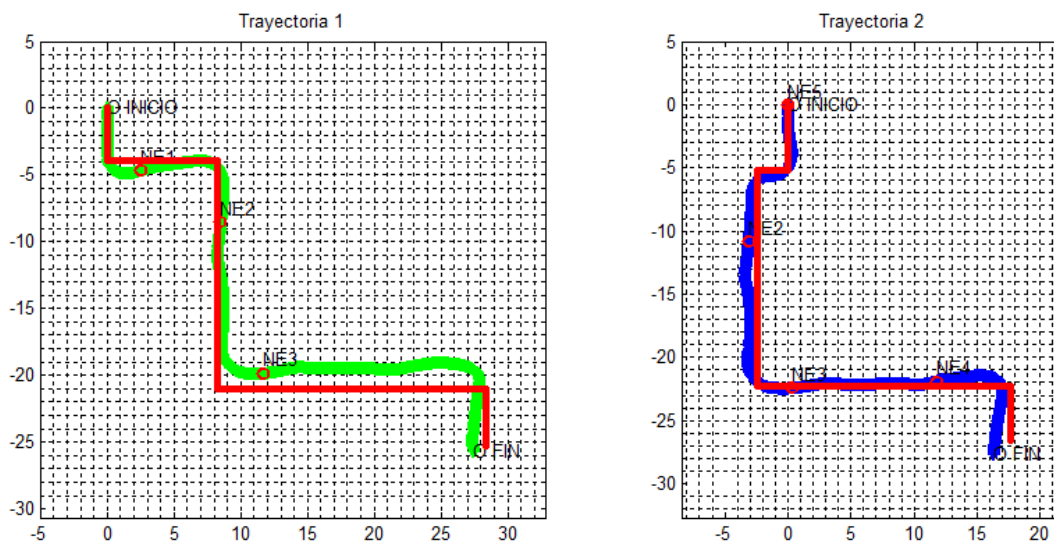


**Figura 5.35** Comparación entre los recorridos seguidos por los usuarios y las trayectorias obtenidas por el sistema.

## 5.4 Error entre la trayectoria real y la obtenida por el sistema

Hasta este momento sólo se han calificado los resultados del sistema de seguimiento y localización para interiores como una buena o mala aproximación, toca el turno de cuantificar el error que se tiene en las medidas. Para hacerlo se calculó el error como la distancia entre los puntos finales de las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema, del escenario en interiores.

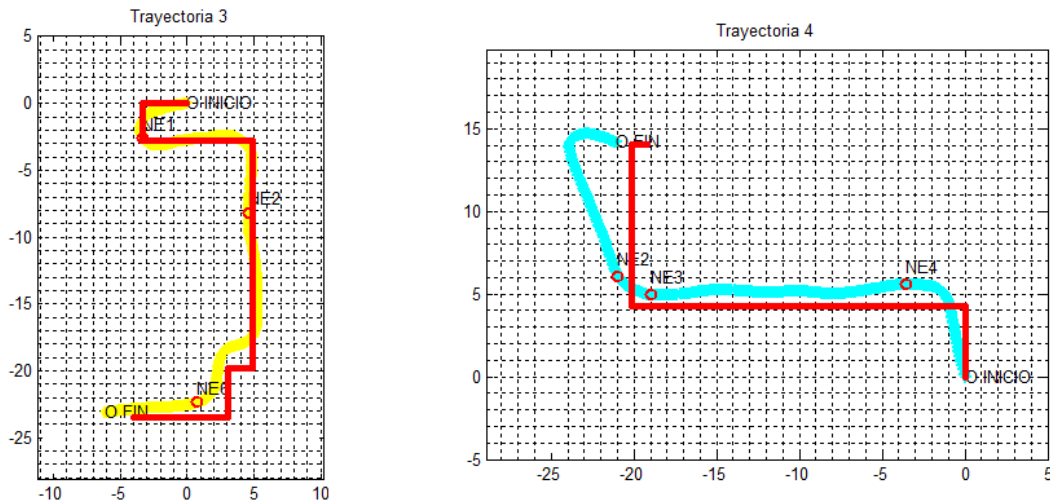
La figura 5.36, muestra dos gráficas, en la primera se muestra la trayectoria real que siguió el usuario 1 en rojo y la obtenida por medio del sistema en verde. Midiendo el error como la distancia entre el punto final de ambas, se obtuvo un error de 1.02 [m]. En la segunda gráfica se muestra la trayectoria real del usuario 2 en rojo y la obtenida por medio del sistema en azul. Se tiene un error de 1.76 [m].



**Figura 5.36** Comparación entre las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema de los usuarios 1 y 2.

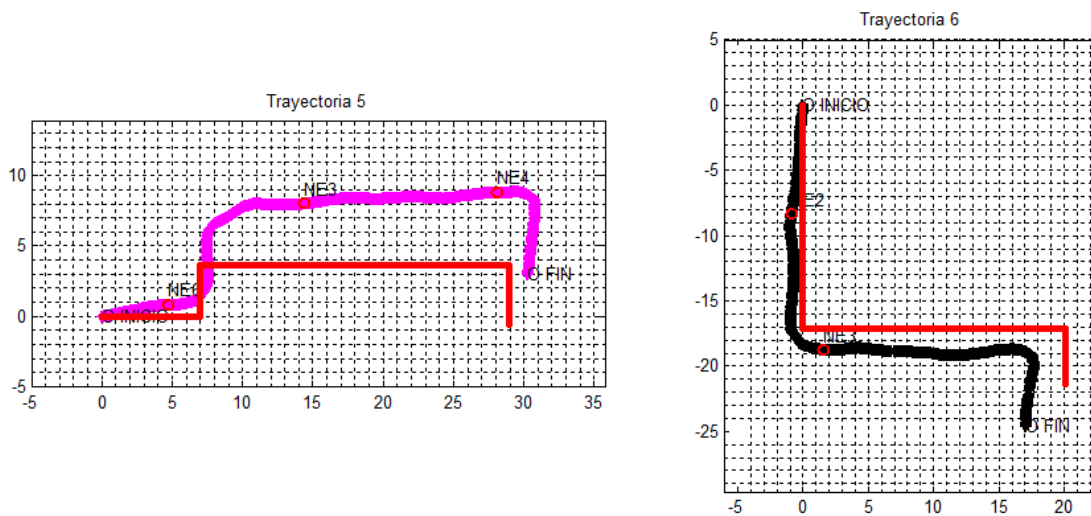
En la figura 5.37, se muestran dos gráficas, la primera muestra la trayectoria real del usuario 3 en rojo y la obtenida por medio del sistema en amarillo, para este recorrido se tiene un error de 2.22 [m]. La segunda gráfica muestra la trayectoria real del usuario 4 en rojo y la obtenida por medio del sistema en cian, para ésta se tiene un error de 1.84 [m].





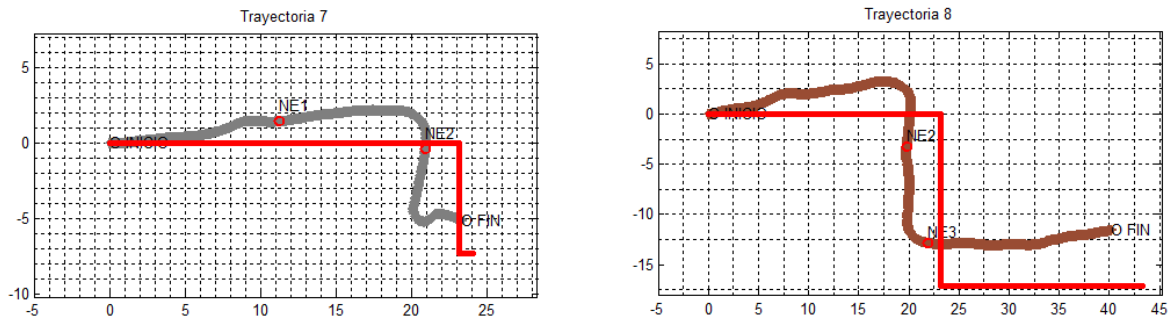
**Figura 5.37** Comparación entre las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema de los usuarios 3 y 4.

En la figura 5.38, se muestran dos gráficas, la primera muestra la trayectoria real del usuario 5 en rojo y la obtenida por medio del sistema en violeta, para esta ruta se tiene un error de 3.8 [m]. La segunda gráfica muestra la trayectoria real del usuario 6 en rojo y la obtenida por medio del sistema en negro, para ésta se tiene un error de 4.5 [m].



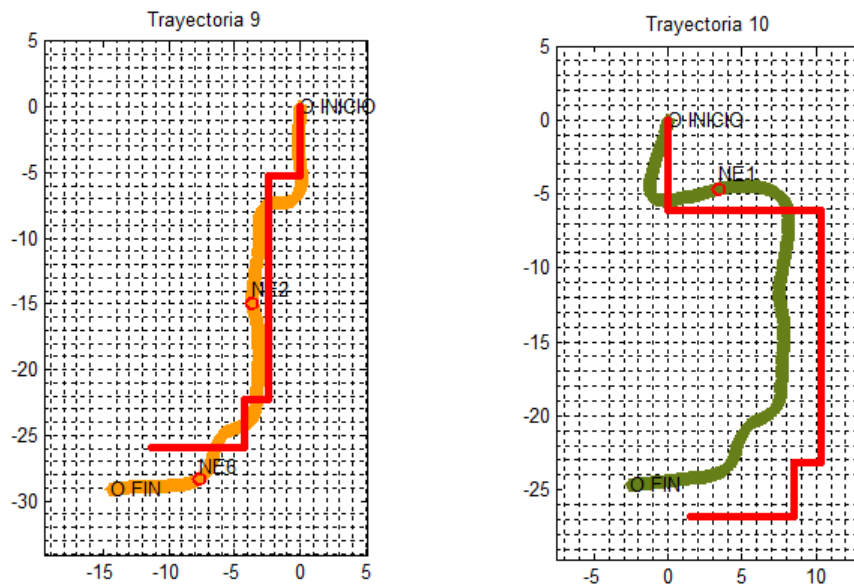
**Figura 5.38** Comparación entre las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema de los usuarios 5 y 6.

En la figura 5.39, se muestran dos gráficas, la primera muestra la trayectoria real del usuario 7 en rojo y la obtenida por medio del sistema en gris, para ésta se tiene un error de 2.35 [m]. La segunda muestra la trayectoria real del usuario 8 en rojo y la obtenida por medio del sistema en café, para ésta se tiene un error de 6.3 [m].



**Figura 5.39** Comparación entre las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema de los usuarios 7 y 8.

En la figura 5.40, se muestran dos gráficas, la primera muestra la trayectoria real del usuario 9 en rojo y la obtenida por medio del sistema en naranja, para ésta se tiene un error de 4.45 [m]. La segunda imagen muestra la trayectoria real del usuario 10 en rojo y la obtenida por medio del sistema en verde, para ésta se tiene un error de 4.61 [m].



**Figura 5.40** Comparación entre las trayectorias reales y las obtenidas por el sistema de los usuarios 9 y 10.

La tabla 5.2 recopila la información del error calculado, para todos los recorridos del primer escenario y muestra que el error promedio fue de 3.29 [m].

Número de Trayectoria	Error [m]
1	1.02
2	1.76
3	2.22
4	1.84
5	3.8
6	4.5
7	2.35
8	6.3
9	4.45
10	4.61
<b>Error Promedio</b>	<b>3.29</b>

Tabla 5.2 Error en cada una de las trayectorias del escenario en Interiores.

## 5.5 Ejemplo de guiado

Utilizando los resultados obtenidos del primer escenario, se realizó un ejercicio en el que tomando dos trayectorias cualesquiera, un usuario "X" intentó localizar a un usuario "Y" por medio de las rutas mostradas en la figura 5.41.

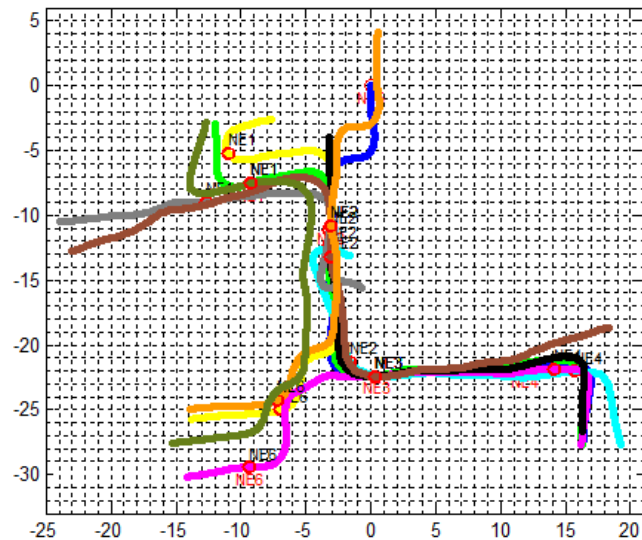
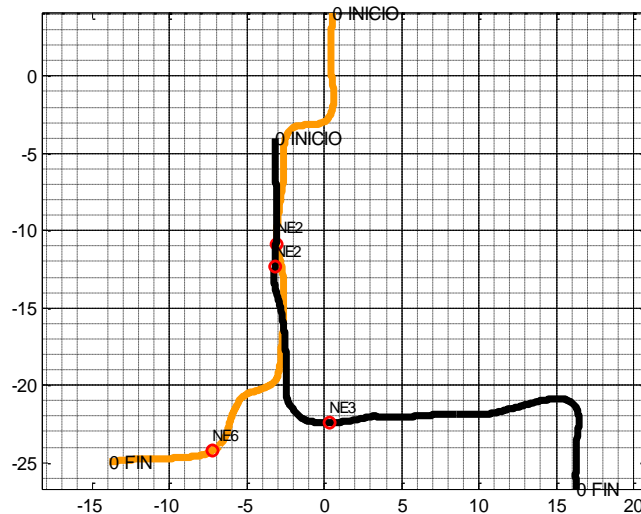


Figura 5.41 Unión de trayectorias final del escenario en interiores.

Supongamos que el usuario 9 (trayectoria naranja) quiere localizar al usuario 6 (trayectoria negra), este usuario podría seleccionar que se muestre su ruta y la del usuario 6. Viendo la figura 5.42, el usuario 9 tendría la capacidad de regresar por donde venía caminando hasta la intersección con el recorrido del usuario 6 y seguir el camino que éste siguió para lograr localizarlo.



**Figura 5.42** Trayectorias 9 (naranja) y 6 (negro).

Según la figura 5.42, el usuario 9 tendría que seguir las siguientes indicaciones para lograr localizar al usuario 6:

- Regresar por donde vino aproximadamente 7.5 [m] y dar vuelta a la izquierda.
- Avanzar aproximadamente 3 [m] y dar vuelta a la derecha.
- Avanzar aproximadamente 2 [m] y dar vuelta a la derecha.
- Avanzar aproximadamente 2 [m] y dar vuelta a la izquierda.
- Avanzar aproximadamente 19 [m] y dar vuelta a la derecha.
- Avanzar aproximadamente 5.5 [m] y localizar al usuario 6.

Tras completar el recorrido que plantearon las indicaciones, el usuario 9 no llegó exactamente a la ubicación del usuario 6, sin embargo, logró localizarlo. La diferencia entre la localización real del usuario 6 y a dónde llegó el usuario 9 fue menor a 1 [m].

# Capítulo 6

## Conclusiones

En esta tesis se presentó el diseño y la implementación de un sistema de seguimiento y localización para interiores, mediante características que tiene cualquier teléfono inteligente, que no limita de manera importante la movilidad de los usuarios, utiliza algoritmos sencillos que no requieren del uso masivo de recursos y no necesita establecer un punto inicial de seguimiento, ya que con la superposición de trayectorias los puntos importantes son los nodos, ya sean estáticos o móviles. Este sistema se compone de cuatro bloques para su funcionamiento y puede ser usado para rastrear al usuario del dispositivo, siempre y cuando éste lo lleve consigo.

Se comprobó que utilizando los datos del sensor de orientación, es posible detectar los cambios en la dirección de desplazamiento para reproducir la ruta que siguió el teléfono inteligente y por ende del usuario que lo ocupa.

Se comprobó que los datos del acelerómetro pueden ser utilizados para detectar si el usuario está o no en movimiento. Los valores del sensor de orientación fueron discriminados de manera correcta por el algoritmo On / Off.

Se comprobó que el radio bluetooth del teléfono inteligente, puede ser utilizado para identificar cuando otros dispositivos del mismo sistema se encuentran en la cercanía de la trayectoria del usuario.

Se mostró como las rutas obtenidas por medio del sistema, de los diferentes teléfonos inteligentes, pueden ser unidas haciendo traslaciones y rotaciones con base en los nodos de las trayectorias.

Al ser implementado bajo la plataforma Android, el sistema es novedoso, ya que utiliza dispositivos que están a la vanguardia de la tecnología hoy en día y es posible utilizarlo tanto en interiores como en exteriores.

# Referencias

1. Real Academia Española, "Diccionario de Lengua Española", Vigésima Segunda Edición, 2001.
2. Official U.S. Government Information About The Global Positioning System (GPS) and Related Topics, <http://www.gps.gov/>.
3. Wayne Tomasi, "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", Ed. Prentice-Hall, Cuarta Edición, 2003.
4. E. Foxlin, InterSense, "Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors", Publicado por IEEE Computer Society, Noviembre/Diciembre 2005.
5. W. Chen, R. Chen, Y. Chen, H. Kuusniemi, Z. Fu, J. Wang, "An Adaptive Calibration Approach For A 2-Axis Digital Compass In A Low-Cost Pedestrian Navigation System", Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE.
6. S. Suksakulchai, S. Thongchai, D.M. Wilkes, K. Kawamura, "Mobile Robot Localization Using An Electronic Compass For Corridor Environment", Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference on.
7. J.S. Lewis, J.M. O'Kane, "Guaranteed Navigation With An Unreliable Blind Robot", Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on.
8. V.Y. Skvortzov, Hyoung-Ki Lee, Seokwon Bang, Yongbeom Lee, "Application Of Electronic Compass For Mobile Robot In An Indoor Environment", Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on.
9. A. Serra, T. Dessì, D. Carboni, V. Popescu, L. Atzori, "Inertial Navigation System For User – Centric Indoor Applications", NEM proceedings, 2010.
10. P. Pombinho, A.P. Afonso, M.B. Carmo, "Indoor Positioning Using A Mobile Phone With An Integrated Accelerometer And Digital Compass", INForum 2010.
11. J.A.B. Link, P. Smith, N. Viol, K. Wehrle, "FootPath: Accurate Map-Based Indoor Navigation Using Smartphones", Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011 International Conference on.
12. M.-H.V. Le, D. Saragas; N.M. Webb, R.F. Vaz, A.M. Wyglinski, M. Barry, S. McGrath, "A Novel Indoor Navigation Approach Employing Motion Statistics", Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd.

13. E.C.L. Chan, G. Baciú, S.C. Mak, "Orientation-Based Wi-Fi Positioning On The Google Nexus One", *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2010 IEEE 6th International Conference on.
14. B.-G. Lee, Y.-S. Lee, W.-Y. Chung, "3D Navigation Real Time RSSI-based Indoor Tracking Application", *Journal Of Ubiquitous Convergence Technology*, Vol. 2, No. 2, Noviembre 2008.
15. B.-G. Lee, K.-H. Do, W.-Y. Chung, "WSN Based 3D Indoor Multiple User Tracking", *Sensor*, 2009 IEEE.
16. B.-G. Lee, W.-Y. Chung, "Multitarget Three-Dimensional Indoor Navigation On A PDA In A Wireless Sensor Network", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 11, No 3, Marzo 2011.
17. D.Bertsekas, R.Gallager, "Data Networks", Ed. Prentice-Hall, Segunda Edición, 1992.
18. G. Oberholzer, P. Sommer, R. Wattenhofer, "Spiderbat: Augmenting Wireless Sensor Networks With Distance And Angle Information", *Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2011 10th International Conference on.
19. M.A. González, "Desarrollo de Algoritmos y Protocolos de Guiado para Terminales Móviles", Tesis doctoral, Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación, Septiembre 2013.
20. Nielsen Company, "Generation App: 62% of Mobile Users 25-34 own Smartphones", 3 de Noviembre del 2011, [http://blog.nielsen.com/nielsenwire/online\\_mobile/generation-app-62-of-mobile-users-25-34-own-smartphones/](http://blog.nielsen.com/nielsenwire/online_mobile/generation-app-62-of-mobile-users-25-34-own-smartphones/).
21. Nielsen Company, "Two Thirds of New Mobile Buyers Now Opting for Smartphones", 12 de Julio del 2012, [http://blog.nielsen.com/nielsenwire/online\\_mobile/two-thirds-of-new-mobile-buyers-now-opting-for-smartphones/](http://blog.nielsen.com/nielsenwire/online_mobile/two-thirds-of-new-mobile-buyers-now-opting-for-smartphones/).
22. Android, "Android Developer", Noviembre 2012, [http://developer.android.com/intl/es/guide/topics/sensors/sensors\\_overview.html](http://developer.android.com/intl/es/guide/topics/sensors/sensors_overview.html).
23. Android, "Android Developer", Noviembre 2012, <http://developer.android.com/guide/topics/connectivity/bluetooth.html>.
24. Google, "Google Maps", Junio 2013, <https://maps.google.com/>.