





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: **Dr. Víctor Rangel Licea**

Vocal : **Dr. Javier Gómez Castellanos**

Secretario: **Dr. Héctor Benítez Pérez**

Suplente: **Dr. Miguel López Guerrero**

Suplente: **Dr. Jorge Luis Ortega Arjona**

**Ciudad Universitaria, México, D.F.**

**TUTOR DE TESIS:**

**Dr. Javier Gómez Castellanos**

# *Agradecimientos*

Esta tesis pudo ser realizada gracias al Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación de la Universidad Nacional Autónoma de México que me brindó su apoyo durante mi estancia en su programa doctoral. Asimismo, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que me otorgó una beca para el desarrollo de proyectos de investigación que forman parte de este trabajo de tesis, así como una beca mixta para mi estancia de investigación en la Universidad de Ottawa, Canadá.

Mi agradecimiento por el apoyo recibido de los siguientes programas para poder terminar este trabajo de tesis: programa de participación de estudiantes de posgrado como asistentes de proyecto del CONACYT con número de referencia de proyecto 105117 y a los proyectos PAPIIT IN106609 y PAPIIT 114813.

Con un profundo agradecimiento a mi tutor el Dr. Javier Gómez Castellanos por su paciencia, confianza, enseñanzas, interés, apoyo, consejos, comentarios y compromiso para dirigir esta investigación. Gracias por motivarme a desarrollar, mejorar y adquirir nuevos conocimientos y habilidades para hacer de mí un mejor profesionista.

Mi agradecimiento al Dr. Víctor Rangel Licea por aceptar ser parte de mi comité tutorial, por sus conocimientos transmitidos, aportaciones y observaciones para que durante mi estancia en el doctorado se produjeran buenos trabajos de investigación. Agradezco también al Dr. Miguel López Guerrero por su participación en mi comité tutorial, por sus consejos y enseñanzas que oportunamente me permitieron corregir errores y enriquecer cada uno de los trabajos que desarrollé. Gracias por haber sido parte de este grupo de trabajo que me dejó tantas enseñanzas.

Al Dr. Jorge Luis Ortega Arjona y al Dr. Héctor Benítez Pérez que aceptaron ser parte del grupo de sinodales revisor de este trabajo de tesis. Gracias por todas sus observaciones y comentarios realizados que permitieron mejorar este trabajo.

Agradezco a la coordinación del posgrado en especial a María de Lourdes González Lora, Diana E. Arias Calzadilla, Cecilia Mandujano Gordillo y Amalia J. Arriaga Campos. Por su amabilidad y apoyo para realizar cualquier trámite administrativo. Además de sus constantes muestras de aliento para alcanzar las metas académicas planeadas.

# *Dedicatorias*

Primeramente quiero dedicar esta tesis a Dios y agradecerle el poder terminar esta etapa tan importante en mi vida profesional. Gracias por levantarme en cada caída, por llenarme de energía cuando más agotado estaba, por darme paciencia y sabiduría para superar los problemas, por hacerme ver que entre más aprendo más humilde debo ser.

Quiero dedicar este trabajo de tesis a mi amada esposa Maribel Salazar Aparicio. Gracias por tu paciencia y apoyo para que yo pueda seguir desarrollándome profesionalmente. Sin tu comprensión y cariño no hubiera podido sobreponerme a tantas adversidades. A tu lado sé que podemos realizar más cosas de las que podría imaginar.

También quiero dedicar esta tesis a mi papá José de Jesús González Reyes y mi mamá María Amelia Silva García. Gracias papá por darme el mejor ejemplo de cómo ser una persona capaz y responsable, por enseñarme que el trabajo es la mejor manera de conseguir resultados positivos en la vida. Gracias mamá por inculcarme valores como constancia, responsabilidad y honestidad que han hecho de mi una mejor persona logrando tantas metas en mi vida.

Dedico esta tesis a mis hermanas María Angélica González Silva y Olivia González Silva y mi hermano José de Jesús González Silva. Jacarú sabes que tu apoyo ha sido muy importante en cada paso que dado, aún a través de la distancia has estado conmigo. Ogy te agradezco que siempre estés al pendiente de cada integrante de esta familia, sé que siempre puedo contar contigo. Cus siempre me has apoyado en todas mis decisiones y me has alentado a seguir adelante y cumplir con mis sueños. Gracias familia.

Dedico también esta tesis a mis sobrinos Brenda, Joseline y David. A mis ahijados Juan Carlos, Gabriel, Sebastián, Valeria y Gilberto. Para que este trabajo sirva de ejemplo de que con trabajo y estudio es posible llegar muy lejos.

Finalmente agradezco profundamente a mis compañeros de posgrado Yasmine, Martha, Paco, Pedro y Alfonso. Gracias por su apoyo incondicional y compartir conmigo esta experiencia.

# *Resumen*

Guiado en ambientes WLAN con infraestructura y ad-hoc es un tema que ha sido poco tratado por los investigadores. Algunos sistemas de navegación como GPS pueden ofrecer funciones de guiado a los usuarios, pero requieren para su funcionamiento de hardware especializado como receptores GPS e infraestructura dedicada como una red satelital. Además, para guiar a un usuario hacia un punto destino este tipo de sistemas necesitan conocer la ubicación del destino así como información de referencia como lo es el mapa de una zona en particular. Estas condiciones hacen que estos sistemas de navegación tengan una aplicabilidad limitada.

Esta tesis contribuye en el desarrollo de sistemas de guiado nodo a nodo que permiten a un usuario móvil de una red WiFi orientarse y moverse con el fin de acercarse a otros usuarios. La capacidad de un nodo de desarrollar guiado nodo a nodo promueve el uso de las redes WiFi ampliando los campos de aplicación de éstas tanto en modo de infraestructura como en modo ad-hoc. Para el desarrollo de estos sistemas, esta tesis comienza por estudiar el comportamiento en interiores y exteriores de parámetros definidos en el estándar 802.11 como son intensidad de la señal recibida y calidad de la señal inalámbrica, y cómo éstos pueden tener un uso potencial para el desarrollo de sistemas de guiado. La ventaja de usar este tipo de parámetros como base de un sistema de guiado es que éstos están siempre presentes en una conexión WiFi entre nodos, y por lo tanto los sistemas de guiado resultantes pueden desarrollarse en cualquier dispositivo móvil que tenga una tarjeta comercial inalámbrica 802.11, reduciendo costos y facilitando su implementación en cualquier red de este tipo.

En particular, en exteriores se estudia el comportamiento de intensidad de la señal recibida y calidad de la señal en la proximidad de un nodo destino estático. En este estudio se define si los valores de estos parámetros obtenidos en distintos puntos de medición presentan una variabilidad suficiente para inducir información de guiado en un nodo móvil. Para el caso de ambientes en interiores, se estudia el valor máximo de intensidad de la señal recibida que se puede obtener de una conexión entre un nodo estático y uno móvil en condiciones de línea de vista. Este último estudio permite desarrollar un método llamado PhyCon, el cual permite determinar la existencia de caminos físicos que conectan nodos estáticos dentro de un área en interiores. A la existencia de estos

caminos físicos le llamamos condición de conectividad física. Como resultado de los estudios anteriores se desarrolla un sistema de guiado para exteriores llamado GUIDE y un sistema de guiado para interiores llamado SIGMA.

En GUIDE, el guiado de un nodo móvil hacia un nodo destino se desarrolla mediante el uso de una técnica de gradiente. Esta técnica consiste en calcular un vector gradiente usando únicamente tres mediciones en puntos no colineales de intensidad de la señal recibida o calidad de la señal de la conexión WiFi entre ambos nodos. Como resultado de este cálculo se obtiene un vector que apunta hacia la ubicación del nodo destino donde el parámetro en cuestión presenta su mayor valor de medición posible. Por otro lado, en SIGMA las funciones de guiado se desarrollan por detectar primero la existencia de conectividad física entre nodos de una red y luego determinar la forma de recorrer cada camino físico encontrado. Para éste último paso se requiere una fase de aprendizaje donde los nodos móviles dejan un rastro de su trayectoria en cada intento por recorrer un camino físico entre nodos estáticos. El rastro dejado consiste en mediciones de intensidad de la señal recibida respecto a un nodo destino y de puntos de referencia encontrados como puede ser una intersección de corredores o la presencia de otros nodos. Este rastro permite que otros nodos aprendan cuáles son los movimientos correctos y puntos de referencia que definen la forma de recorrer adecuadamente un determinado camino físico.

De esta manera, la principal contribución de esta tesis es el desarrollo de sistemas de guiado nodo a nodo para redes 802.11 en interiores y exteriores usando parámetros medidos en tiempo real de las conexiones WiFi entre nodos.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Dedicatorias</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>x</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Problemas de línea de vista entre usuarios . . . . .	3
1.2. Problemas de dependencia de infraestructura . . . . .	4
1.3. Costos . . . . .	5
1.4. Poca información de guiado en la red . . . . .	5
1.5. Problema a desarrollar . . . . .	6
1.6. Hipótesis . . . . .	7
1.7. Objetivos . . . . .	7
1.8. Esquema de la tesis . . . . .	8
1.9. Contribuciones de la tesis . . . . .	10
<b>2. Guiado en redes WLAN 802.11 en exteriores</b>	<b>12</b>
2.1. Trabajo relacionado con guiado en exteriores . . . . .	12
2.1.1. Sistemas de navegación . . . . .	12
2.1.2. Sistemas de localización . . . . .	15
2.2. El estándar 802.11 y su capa física (PHY) . . . . .	16
2.2.1. Intensidad de la señal . . . . .	17
2.2.2. Calidad de la señal . . . . .	18
2.2.3. Velocidad de transmisión de datos . . . . .	18
2.2.4. Mapas experimentales . . . . .	19
2.3. Un algoritmo de guiado para usuarios de redes WLAN en exteriores . . .	23
2.3.1. GUIDE-gradient . . . . .	24
2.4. Implementación de GUIDE-gradient . . . . .	30
2.5. Experimentos y Resultados . . . . .	34

2.5.1.	Experimentos de guiado en un escenario real . . . . .	34
2.5.2.	Simulaciones . . . . .	37
2.6.	Consideraciones para GUIDE-gradient . . . . .	40
2.6.1.	Convergencia . . . . .	41
2.7.	Guiado nodo a nodo en redes ad-hoc . . . . .	43
2.8.	Conclusiones del capítulo . . . . .	44
<b>3.</b>	<b>Conectividad física en redes WLAN 802.11 en interiores usando mo- vilidad</b>	<b>46</b>
3.1.	Conectividad física . . . . .	46
3.2.	Trabajo relacionado con conectividad . . . . .	49
3.2.1.	Enrutamiento . . . . .	49
3.2.2.	Localización . . . . .	50
3.2.3.	Proximidad . . . . .	50
3.3.	PhyCon . . . . .	53
3.3.1.	Detección de condiciones de LOS . . . . .	53
3.3.2.	Descubriendo caminos con conectividad física ( <i>PCP</i> ) . . . . .	59
3.3.3.	Optimizando rutas en gráficas de conectividad física . . . . .	60
3.3.4.	Modos de operación de PhyCon . . . . .	62
3.3.5.	Evaluación y resultados . . . . .	64
3.3.5.1.	Simulaciones . . . . .	64
3.3.5.2.	Experimentos en una red WLAN en interiores . . . . .	71
3.4.	Conclusiones del capítulo . . . . .	72
<b>4.</b>	<b>Guiado en redes WLAN 802.11 en interiores usando conectividad física</b>	<b>74</b>
4.1.	Trabajo relacionado con guiado en interiores . . . . .	74
4.2.	Un algoritmo de guiado para usuarios de redes WLAN en interiores . . . . .	77
4.3.	Terminología . . . . .	78
4.4.	Premisas y criterios de movimiento . . . . .	80
4.5.	Método de guiado SIGMA . . . . .	82
4.5.1.	Obtención de ruta óptima . . . . .	83
4.5.2.	Exploración de la ruta . . . . .	84
4.5.3.	Usar tablas de guiado . . . . .	88
4.6.	Evaluación de SIGMA . . . . .	91
4.7.	Aspectos prácticos de SIGMA . . . . .	94
4.8.	Conclusiones del capítulo . . . . .	99
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>102</b>
<b>A.</b>	<b>Artículos generados</b>	<b>105</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>106</b>
	<b>Glosario</b>	<b>113</b>

# Índice de figuras

1.1. Guiado entre dos nodos . . . . .	2
1.2. Problema de detección de caminos libres de obstáculos en una red WLAN en interiores . . . . .	4
2.1. Área experimental en exteriores . . . . .	20
2.2. Mapa de propagación de SQ . . . . .	21
2.3. Mapa de propagación de RSSI . . . . .	21
2.4. Mapa de propagación de velocidad de transmisión . . . . .	22
2.5. Curvas de nivel de las mediciones de velocidad de transmisión de datos en el área experimental . . . . .	23
2.6. Aproximación del vector gradiente usando tres mediciones no colineales. . . . .	25
2.7. (a) Vectores de desplazamiento, (b) región $\nabla z \cdot \overrightarrow{AC} < 0$ , (c) región $\nabla z \cdot \overrightarrow{AB} < 0$ , (d) región $\nabla z \cdot \overrightarrow{BC} > 0$ y (e) región de solución y su correspondiente vector de cuantificación. . . . .	27
2.8. Triángulos virtuales creados con tres mediciones no colineales . . . . .	29
2.9. Criterios de decisión para seleccionar la trayectoria a seguir usando GUIDE-gradient. Las variables $M_{actual}$ y $M_{anterior}$ significan las mediciones actual y anterior, respectivamente. . . . .	29
2.10. Distribución espacial de los puntos de muestreo . . . . .	31
2.11. Desviación estándar de SQ y RSSI entre dos nodos localizados a 20 y 80 metros de distancia el uno del otro. . . . .	33
2.12. Interfaz gráfica de GUIDE-gradient . . . . .	34
2.13. Experimento de GUIDE-gradient usando SQ . . . . .	35
2.14. Gráficas de las CDFs de GUIDE-gradient con 10 metros de precisión . . . . .	38
2.15. Gráficas de las CDFs de GUIDE-gradient con 20 metros de precisión . . . . .	38
2.16. Gráficas de las CDFs de GUIDE-gradient con 30 metros de precisión . . . . .	39
2.17. Ejemplo de GUIDE-gradient donde un obstáculo no permite continuar con la trayectoria deseada . . . . .	41
2.18. Coordenadas virtuales y gráfica plana de triángulos equiláteros que forman los puntos de muestreo usando GUIDE . . . . .	42
2.19. Guiado de usuarios en un ambiente multisaltos. . . . .	44

3.1. Gráfica de conectividad de una red WLAN en interiores (a), Gráfica de conectividad física (b) . . . . .	48
3.2. Esquema de experimentos realizados para determinar el rango <i>LOS-RSSI</i>	55
3.3. Valor promedio de mediciones de RSSI hechas bajo condiciones LOS y NO-LOS usando paredes falsas y de ladrillo, a lo largo de trayectorias de 52 puntos de muestreo usando diferentes chips 802.11 . . . . .	57
3.4. Experimentos con los casos móvil-estático vs móvil-móvil en condiciones de LOS y NO-LOS . . . . .	58
3.5. PDF del máximo valor RSSI alcanzado durante los experimentos de condiciones de LOS . . . . .	59
3.6. El método PhyCon . . . . .	60
3.7. Condición de proximidad en una gráfica de Gabriel . . . . .	61
3.8. Variación del área de búsqueda en una GG . . . . .	62
3.9. Escenarios en interiores usados para la simulación de PhyCon . . . . .	64
3.10. Simulación de PhyCon con 100 nodos usando el escenario 1 . . . . .	66
3.11. Simulación de PhyCon con 100 nodos usando el escenario 2 . . . . .	67
3.12. Simulación de <i>PCPs</i> usando el escenario 1 . . . . .	68
3.13. Simulación de <i>PCPs</i> usando el escenario 2 . . . . .	69
3.14. Comparación entre <i>PCP</i> encontrados por PhyCon y <i>PCP</i> encontrados por fuerza bruta en los escenarios de prueba 1 y 2 . . . . .	71
3.15. Red experimental desplegada para las pruebas de PhyCon . . . . .	73
4.1. Conectividad física y árbol de conectividad para una red inalámbrica en interiores . . . . .	78
4.2. Nodos <i>virtuales</i> con 3 o más direcciones de movimiento posibles . . . . .	79
4.3. Conectividad física y árbol de conectividad usando nodos virtuales para una red inalámbrica en interiores . . . . .	81
4.4. Criterio CNDM aplicado en nodos virtuales . . . . .	82
4.5. Escenario en interiores donde se explora el camino entre un nodo <i>Origen</i> y uno <i>Destino</i> . . . . .	85
4.6. Experimentos de SIGMA usando dos diferentes densidades de nodos en un área en interiores . . . . .	92

# Índice de tablas

2.1. Relación entre RSSI y velocidad de transmisión en equipos Cisco 802.11ab	19
2.2. Acción en el punto C . . . . .	31
3.1. Estadísticas finales de la simulación de PhyCon en dos escenarios . . . . .	70
4.1. Acciones de un nodo móvil para detectar un camino entre un nodo <i>Origen</i> y un nodo <i>Destino</i> usando SIGMA. . . . .	87
4.2. Tabla de guiado entre nodos . . . . .	90
4.3. Acciones a realizar para recorrer una ruta de guiado entre los nodos $S_i$ y $S_j$ definida en la Tabla 4.2. . . . .	90
4.4. Acciones a realizar para recorrer una ruta inversa entre nodos . . . . .	91
4.5. Tabla de guiado generada por SIGMA entre nodos estáticos de una red WiFi . . . . .	95
4.5. Tabla de guiado generada por SIGMA entre nodos estáticos de una red WiFi (continuación) . . . . .	96
4.5. Tabla de guiado generada por SIGMA entre nodos estáticos de una red WiFi (continuación) . . . . .	97

# Capítulo 1

## Introducción

En años recientes, las redes inalámbricas de área local (WLAN)<sup>1</sup> han sido incorporadas en diferentes campos de la actividad humana siendo más que un simple reemplazo o complemento de las redes cableadas [1]. En particular, el estándar WLAN 802.11 (WiFi) es uno de los grandes éxitos tecnológicos de la última década. Usado inicialmente en laboratorios de investigación, la tecnología WiFi ha llegado a ser tan popular como la telefonía celular. WiFi incluso se ha convertido en la tecnología de última milla preferida de Internet. Dispositivos comerciales como computadoras portátiles, tabletas electrónicas, cámaras digitales y celulares de última tecnología son usualmente equipados con interfaces de radio WiFi, haciendo más factible la disponibilidad de esta tecnología. Al mismo tiempo, se están desarrollando redes metropolitanas basadas en redes WLAN, permitiendo a los usuarios moverse libremente a través de áreas muy amplias.

Actualmente las redes WiFi pueden ser encontradas en diversos ámbitos de aplicación como el hogar, educativo y laboral. Por ejemplo, en los hogares es cada vez más común que dispositivos como consolas de videojuegos, computadoras, celulares e impresoras requieran compartir archivos o una única conexión de Internet. Para ello, una red SOHO (del inglés Small Office Home Office) inalámbrica [2] resulta ser una solución simple, eficiente y poco costosa. En el ámbito educativo es común encontrar en universidades redes WiFi con varios puntos de acceso (AP, del inglés Access Point), donde la finalidad de estas redes es permitir el acceso a Internet a los nodos (usuarios) a través de dispositivos móviles y desde distintas áreas de un campus universitario. En las empresas, una

---

<sup>1</sup>Un glosario de términos se anexa en la página 113

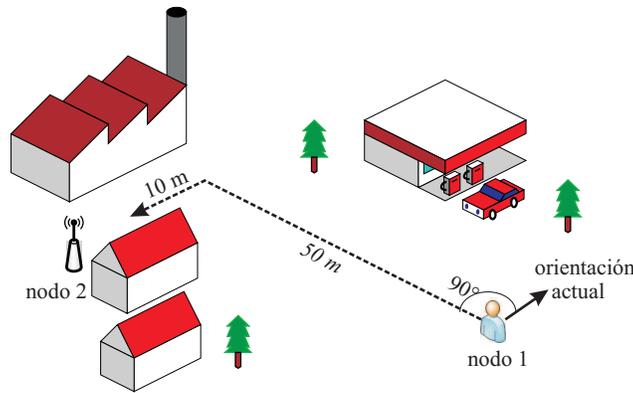


FIGURA 1.1: Guiado entre dos nodos

red WiFi puede permitir extender una red Ethernet hacia usuarios nuevos que podrían acceder a la red sin requerir de cableado extra.

Las aplicaciones de las redes WiFi se han centrado principalmente en la comunicación de datos entre usuarios dentro de una misma área de cobertura. Sin embargo, más allá de la transmisión de datos, la amplia disponibilidad de dispositivos WiFi permite considerar la posibilidad de crear otras aplicaciones como es el guiado nodo a nodo. Este concepto, introducido en este trabajo de tesis, define que los nodos de una red equipados con una interfaz WiFi tengan la habilidad de obtener información que les permita orientarse y moverse con el fin de acercarse a otros nodos. Por ejemplo, el esquema de la figura 1.1 muestra dos nodos en un área en exteriores. Para que el nodo 1 se mueva hacia la ubicación del nodo 2, la información precisa de guiado que requiere el nodo 1 es: desde su posición y orientación actual girar  $90^\circ$ , después avanzar 50 metros, después dar vuelta a la izquierda y avanzar otros 10 metros. Como se describe más adelante, este concepto de guiado puede ser aplicado a redes WLAN con infraestructura o ad-hoc.

Guiado en general, y guiado nodo a nodo en particular, son áreas poco exploradas de investigación en redes WLAN 802.11. Sin embargo, consideramos que existen varias aplicaciones potencialmente útiles de guiado nodo a nodo y que no están disponibles para usuarios WiFi hoy en día. Por ejemplo, podemos considerar a un usuario conectado actualmente a un punto de acceso a 2 Mbps. Este usuario podría usar un sistema de guiado con el fin de moverse a un lugar más cercano al AP y de esta manera alcanzar una conexión con una mayor transferencia de datos. En otro ejemplo, un usuario puede usar un sistema de guiado para encontrar el módulo de información o una tienda en particular dentro de un centro comercial. Personal de rescate puede usar un sistema

de guiado con el fin de acercarse a una persona que necesita asistencia si esta persona está portando un dispositivo WiFi. Finalmente, las aplicaciones pueden ser tan simples como una situación donde un usuario WiFi sólo quiere acercarse a otro usuario.

En otros ámbitos, el guiado puede ser encontrado en algunas áreas de investigación como robótica y redes inalámbricas de sensores (WSN) con el fin de mover, rastrear (tracking) o localizar a los usuarios sobre una trayectoria deseada. Sin embargo, para lograr estos fines los métodos comúnmente utilizados requieren de ciertas condiciones especiales, limitando la posibilidad de implementar estos métodos en cualquier red inalámbrica. Para el desarrollo de sistemas de guiado en redes WiFi identificamos y estudiamos algunos problemas que requieren especial consideración debido a que impactan directamente en los medios y formas que podrían utilizarse para sistemas de guiado. Los problemas a considerar son los siguientes.

## **1.1. Problemas de línea de vista entre usuarios**

Mientras en muchas redes WLAN el ojo humano podría proveer mejores y simples formas de guiado en lugares donde existe línea de vista (LOS, del inglés Line of Sight), existen varios escenarios donde hay la necesidad de usar sistemas de guiado que operen más allá de LOS entre usuarios. Por ejemplo, la presencia de obstáculos podría no permitir a un usuario establecer contacto visual con otro usuario como es el caso de ambientes en interiores. Otro escenario de guiado que requiere especial atención es aquél correspondiente a una situación cuando los usuarios se encuentran muy alejados unos de otros. En este caso una gran distancia puede no permitir el contacto visual aún cuando no existan obstáculos presentes. Más aún, detectar condiciones de LOS en redes inalámbricas no suele ser una tarea fácil ya que varios de los métodos usados para este propósito requieren, en su mayoría, de estudios exhaustivos del comportamiento de la señal de radio en los lugares de interés, y muchas veces de hardware especializado que hace difícil la implementación de estos métodos. Por otro lado, en un ambiente en interiores la existencia de condiciones de LOS es menos frecuente debido a la alta densidad de obstáculos presentes como puertas, mobiliario y paredes. Esta situación limita en gran medida la posibilidad de saber si más allá de que dos usuarios que tienen una conexión inalámbrica, también pueden alcanzarse físicamente a través de un camino

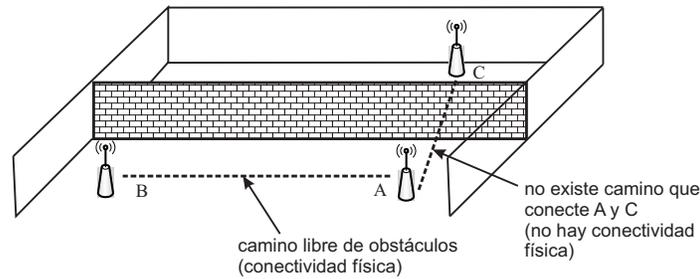


FIGURA 1.2: Problema de detección de caminos libres de obstáculos en una red WLAN en interiores

que exista dentro del inmueble. Por ejemplo, en la figura 1.2 se plantea un escenario donde el usuario *A* mide el mismo valor de intensidad de la señal recibida (RSSI, del inglés Received Signal Strength Indicator) de un nodo lejano *B* en condiciones de LOS y un nodo cercano *C* ubicado detrás de una pared. En este caso, el nodo *A* no puede detectar la existencia de condiciones de LOS, y tampoco la disponibilidad de un camino libre de obstáculos hacia cualquiera de los dos nodos usando únicamente las mediciones de RSSI.

## 1.2. Problemas de dependencia de infraestructura

Una de las razones por las que no ha habido mucha atención por parte de la comunidad de investigación hacia el desarrollo de sistemas de guiado para redes WLAN con infraestructura y ad-hoc es porque el desarrollo de estos sistemas, desde una perspectiva de investigación pura, parece trivial una vez que un buen sistema de localización estuviese disponible. En esta tesis argumentamos, sin embargo, que aún cuando un sistema pueda localizar a un nodo en la red no implica que, necesariamente, también pueda guiarlo a la posición de otro nodo. En un sentido amplio, un sistema de localización podría servir como base para un sistema de guiado, ya que la localización puede indicar si un movimiento fue realizado adecuadamente para acercarse a un nodo a una posición deseada. Sin embargo, muchos sistemas de localización disponibles hoy en día están basados en infraestructura dedicada o especializada (por ejemplo, sistemas de posicionamiento global, local o basados en varios AP). Esta dependencia, de hecho, ha reducido significativamente su disponibilidad para el público en general, ya que no todos los dispositivos

móviles están equipados con hardware adicional como se requiere en un sistema de posicionamiento, o puede que la infraestructura existente no tenga la suficiente cobertura en la zona deseada para llevar a cabo la localización en todos los lugares de la red o inmueble. Bajo estas circunstancias, si un sistema de localización no conoce la ubicación de todos los usuarios de una red, entonces no puede servir como base de un sistema de guiado.

### 1.3. Costos

Similar al problema anterior, el uso adicional de sistemas que utilicen hardware especializado para localización como puede ser GPS [3], sensores acústicos [4][5], antenas direccionales [6], emisores y receptores de radiofrecuencia [7] (RFID, del inglés Radio Frequency Identification), dispositivos bluetooth [8], etc., podría ayudar al desarrollo de un sistema de guiado. Sin embargo, el uso de hardware especializado tiene varias desventajas. Primero, se necesita que algunos o todos los nodos de una red estén equipados con este tipo de hardware más una conexión de radio para comunicar sus coordenadas a otros nodos (por ejemplo, usando un enlace celular o radios WLAN). Este hecho aumenta los costos al requerir hardware adicional que no es común encontrar en dispositivos WiFi comerciales. Segundo, el uso de hardware adicional aumenta sustancialmente el consumo de energía en dispositivos móviles. Este hecho reduce el tiempo de conexión que un nodo puede permanecer conectado a una red, y por lo tanto su posibilidad de ser guiado se reduce según el tiempo de vida de su batería.

### 1.4. Poca información de guiado en la red

En varios sistemas de navegación encontrados en la literatura se indica a un usuario cómo moverse en un espacio en interiores utilizando la información de referencia previamente conocida como es la localización de los nodos y el mapa de entorno de una red [9]. Sin embargo, para encontrar un camino entre nodos que no cuentan con este tipo de información de referencia, resulta difícil determinar los movimientos que logren evadir obstáculos o realizar los cambios de dirección necesarios para recorrer el camino deseado. Más aún, podemos decir que es todo un reto diseñar un sistema de guiado en redes

WLAN usando únicamente la señal de radio inalámbrica entre dispositivos. Si bien es cierto que en una señal inalámbrica podemos encontrar varios parámetros del enlace de radio, la gran mayoría de ellos están relacionados al estado del canal inalámbrico (intensidad de la señal recibida, relación señal/ruido, etc.), y en primer instancia no ofrecen alguna información de orientación, coordenadas de localización, dirección de movimiento u otra información útil para guiar un usuario a la posición de otro.

## 1.5. Problema a desarrollar

Los sistemas de guiado actuales dependen de infraestructura, acceso a la red, hardware especializado o información pregrabada para operar correctamente lo cual limita su aplicabilidad. Asimismo no consideran el guiado entre nodos o usuarios.

Para tratar el problema anterior en esta tesis se estudian diferentes parámetros relacionados al estado del canal inalámbrico que pueden tener un uso potencial en la implementación de un sistema de guiado nodo a nodo en redes inalámbricas. Debido a que solamente estamos interesados en usar hardware WiFi estándar, revisamos los parámetros cuyas mediciones pueden ser obtenidas de una tarjeta comercial inalámbrica 802.11. Adicional a lo anterior y con el fin de generar mayor información de guiado, estudiamos algunas métricas del comportamiento de los nodos en una red como puede ser la distancia recorrida de un nodo móvil y el historial de AP que éste visita. Con base en los estudios anteriores se plantea el desarrollo de sistemas de guiado donde se considera que los nodos a guiar (nodos móviles) son personas portando algún dispositivo móvil equipado con una interfaz WiFi. Este aspecto implica que un nodo móvil tiene la habilidad de interactuar con el sistema guía propuesto y es capaz de seguir instrucciones que permitan desarrollar una tarea de guiado como puede ser ejecutar un cambio de dirección, regresar a un punto anterior, etc. Los sistemas de guiado aquí propuestos están basados en las siguientes características:

- Un sistema de guiado deberá operar únicamente con hardware comercial 802.11, con el fin de evitar costos adicionales, infraestructura dedicada o especializada.
- Deberá operar sin otro tipo de sensores como acelerómetros, brújulas digitales o sensores de orientación.

- Un sistema de guiado deberá minimizar el tiempo consumido y la distancia recorrida para alcanzar un nodo destino. Idealmente para exteriores, se desea que el sistema guíe a los usuarios en una trayectoria rectilínea apuntando directamente al usuario destino.
- Un sistema de guiado deberá trabajar con unos cuantos nodos. Queremos que un sistema de guiado trabaje aún si el usuario a guiar y el nodo destino son los únicos nodos en la red.
- Un sistema de guiado deberá requerir una mínima intervención del usuario destino. Es deseable que el usuario destino permanezca tan pasivo como sea posible durante el proceso de guiado. Además, el usuario destino no debe ejecutar algún software adicional.

## 1.6. Hipótesis

Se pueden crear métodos que guíen geográficamente a un usuario en una red WiFi a través de la utilización de un enfoque colaborativo. Dichos métodos pueden utilizarse eficazmente en aplicaciones de guiado usando únicamente la información que los usuarios obtengan en tiempo real de los parámetros relacionados al estado del canal inalámbrico y de su entorno.

## 1.7. Objetivos

En el presente trabajo de tesis se plantea el diseño e implementación de sistemas de guiado para redes inalámbricas 802.11 en interiores y exteriores y se contempla realizar lo siguiente:

1. Proponer métodos de guiado que puedan ser implementados en dispositivos móviles WiFi para realizar aplicaciones de guiado nodo a nodo. En estas aplicaciones se requiere que un usuario (fuente) se acerque físicamente a otro usuario o a algún dispositivo WiFi (destino).

2. Desarrollo y evaluación de un sistema de guiado para redes inalámbricas 802.11 en exteriores.
3. Desarrollo y evaluación de un sistema de guiado para redes inalámbricas 802.11 en interiores.
4. Evaluar el desempeño de los sistemas de guiado propuestos.

## 1.8. Esquema de la tesis

Con el fin de lograr guiado nodo a nodo en redes WiFi 802.11 que operen en ambientes interiores y exteriores, proponemos un estudio de ciertos parámetros de la señal inalámbrica en ambos ambientes, así como simulación y experimentación de los sistemas de guiado propuestos. El esquema de esta tesis es el siguiente.

Como parte del trabajo relacionado, en el capítulo 2 se presenta un estudio de algunos sistemas de navegación para ambientes en exteriores propuestos en la literatura. Además, se mencionan los principales sistemas de localización que podrían servir como base de un sistema de guiado. Como parte de nuestra propuesta de guiado, en este capítulo 2 se analizan diferentes parámetros que pueden ser obtenidos de una tarjeta inalámbrica 802.11 y se discute cómo pueden ser usados en un sistema de guiado en exteriores. En particular, se estudia el comportamiento de algunos parámetros relacionados al estado de una conexión inalámbrica en la proximidad de un nodo destino localizado en un área en exteriores, y definimos si el comportamiento de estos parámetros puede inducir alguna información en el guiado nodo a nodo. Los resultados de este análisis permiten el desarrollo de un sistema de guiado llamado GUIDE, el cual está basado en mediciones en tiempo real de parámetros siempre presentes en un enlace WiFi. GUIDE es un sistema de guiado nodo a nodo para ambientes en exteriores que no requiere infraestructura o sistemas de localización como GPS. Opuesto a otros potenciales sistemas de guiado que podrían ser construidos a partir de un sistema de localización, en GUIDE los nodos inalámbricos pueden no saber o necesitar conocer su localización absoluta. Aunque varios algoritmos pueden ser usados para obtener direcciones de guiado a partir de mediciones del estado de una conexión inalámbrica, GUIDE se enfoca en un método de gradiente que proporciona buenos resultados. Este enfoque es llamado GUIDE-gradient y los detalles

de su funcionamiento, implementación en un dispositivo WiFi móvil, los resultados de pruebas realizadas con este sistema en un ambiente real en exteriores y simulaciones del mismo son presentados en el capítulo 2. A partir de los resultados obtenidos se exponen algunas consideraciones para mejorar el desempeño del sistema propuesto.

Como punto de partida para el diseño de un sistema de guiado en interiores, en el capítulo 3 se analiza el comportamiento de la intensidad de la señal recibida entre un nodo móvil y uno estático en distintos escenarios en interiores. En particular, se estudian los valores máximos de RSSI obtenidos bajo ciertas condiciones en línea de vista de una conexión entre este tipo de nodos. Estos estudios permiten desarrollar un método llamado PhyCon que combina la movilidad de los usuarios WiFi de una red inalámbrica y la relación cuadrática inversa entre RSSI y distancia para descubrir caminos físicos existentes entre usuarios. PhyCon determina un rango de valores de RSSI que permiten definir cuando un usuario en movimiento pasa lo suficientemente cerca de un usuario estático para establecer temporalmente condiciones de LOS entre ellos. A partir de esto, en PhyCon se introduce un nuevo concepto de proximidad llamado proximidad física, el cual se define como la condición de existencia de caminos físicos donde los nodos de una red pueden alcanzar físicamente a otros nodos, no sólo a través de espacios abiertos, sino también a través de corredores, esquinas, puertas, habitaciones, etc. Para las redes inalámbricas en interiores, creemos que el conocimiento de la existencia de conectividad física entre usuarios es un factor clave para desarrollar aplicaciones como guiado, localización, seguimiento y enrutamiento. Por ejemplo, caminos libres de obstáculos pueden ser descubiertos de una gráfica de conectividad de radio de una WLAN para guiar a los usuarios dentro de un edificio. En este mismo capítulo 3 se muestran los modos de operación de PhyCon según el tipo de red (infraestructura y ad-hoc) y su implementación en un dispositivo WiFi, así como las pruebas realizadas por éste en un ambiente real en interiores. Los resultados e implementación de PhyCon permiten el diseño y desarrollo de un sistema de guiado en interiores llamado SIGMA, propuesto en el capítulo 4. Como parte del trabajo relacionado de guiado en interiores, en el capítulo 4 se presenta un estudio de los principales sistemas de navegación propuestos en la literatura. En este mismo capítulo 4 se presenta nuestro sistema propuesto de guiado para interiores llamada SIGMA. SIGMA es un sistema de guiado que no requiere hardware adicional y que utiliza los caminos físicos descubiertos por PhyCon para definir en ellos los movimientos que hagan posible su recorrido. Con SIGMA cualquier usuario en una red WiFi

puede conocer si existe un camino físico y la forma de recorrerlo con el fin de alcanzar la posición de otro usuario. Usando la movilidad de los usuarios y las mediciones de RSSI en algunos puntos de la red, es posible crear un rastro de trayectoria el cual sirve para que futuros usuarios aprendan cuáles son los movimientos correctos que les permitan recorrer un camino físico y llegar a la posición de un usuario determinado. El rastro creado puede verse como una información de aprendizaje para que otros usuarios móviles no cometan los mismos errores al tratar de recorrer un camino físico. Por medio de simulaciones se muestra que SIGMA puede guiar a los usuarios de una red a recorrer caminos físicos entre nodos, aún cuando existan diferentes densidades de nodos en la red o el camino entre nodos sea muy largo.

## 1.9. Contribuciones de la tesis

Esta tesis estudia y plantea el uso de guiado nodo a nodo como una aplicación que permite a los usuarios de una red WLAN 802.11 tener la habilidad de obtener información que les permita saber cómo moverse para acercarse a otros usuarios. Las principales contribuciones de esta tesis son:

- 1) El análisis del comportamiento de ciertos parámetros relacionados al estado del canal inalámbrico en conexiones WiFi en interiores y exteriores. Este estudio es una contribución importante para el desarrollo de nuevos usos en las redes WLAN como es el guiado de usuarios nodo a nodo.
- 2) Basado en mediciones en tiempo real de parámetros del estado del canal inalámbrico, se presenta un sistema de guiado para exteriores llamado GUIDE, el cual no requiere de hardware adicional o dependencia de infraestructura para operar correctamente.
- 3) En el capítulo 3 se define una metodología que detecta ciertos casos de línea de vista usando únicamente parámetros de la señal inalámbrica y la movilidad de los nodos encontrada en una red en interiores. Esta metodología contribuye al análisis y planteamiento de nuevos conceptos o condiciones entre los nodos de una red como es la conectividad física. El concepto de conectividad física representa un nuevo enfoque para estudiar las rutas que los usuarios siguen, o pueden seguir en una red, y que son útiles

en investigaciones como el análisis de flujo de usuarios, determinación de la distribución de pasillos y habitaciones en un entorno desconocido, el guiado de usuarios, entre otros.

4) El método de guiado SIGMA expuesto en el capítulo 4, contribuye con una nueva forma de obtener información de manera dinámica del entorno de una red, la cual sirve para definir puntos de referencia útiles en el desarrollo de aplicaciones como localización y guiado. Para esto, evaluamos el uso de información que puede ser monitorizada en el entorno de una red por usuarios en movimiento. Usando esta información demostramos que es posible definir los movimientos requeridos para recorrer una ruta entre nodos basado en el aprendizaje de los errores de movimientos cometidos por nodos anteriores.

5) La implementación de GUIDE mostrada en el capítulo 2 y las pruebas de SIGMA presentadas en el capítulo 4, permiten demostrar la viabilidad de implementar sistemas de guiado en redes WLAN 802.11 en interiores y exteriores.

6) El concepto de guiado nodo a nodo aquí propuesto promueve el uso de las redes WiFi más allá de la transmisión de datos y permite ampliar los campos de aplicación de las mismas tanto en modo de infraestructura como en modo ad-hoc.

# Capítulo 2

## Guiado en redes WLAN 802.11 en exteriores

Más allá de guiado basado en sistemas de localización como GPS, el cual es discutido en este capítulo, no existen muchos ejemplos de sistemas de guiado que hayan sido usados en redes inalámbricas en la literatura. Sin embargo, existen varios sistemas de navegación y localización que podrían ser usados como la base de un sistema de guiado, o que pueden servir como punto de análisis para el desarrollo de éste en una red WLAN. En este capítulo, y como parte del trabajo relacionado, revisaremos primeramente algunos de los sistemas antes mencionados. Posteriormente, se presenta un estudio del comportamiento en exteriores de algunos parámetros relacionados con el estado del canal inalámbrico, el cual es la base para el desarrollo de un sistema de guiado para exteriores llamado GUIDE y cuya propuesta se detalla en este mismo capítulo.

### 2.1. Trabajo relacionado con guiado en exteriores

#### 2.1.1. Sistemas de navegación

*Sistema de posicionamiento global (GPS)*

El GPS ha sido el candidato más atractivo para implementar sistemas de guiado complementados con mapas pregrabados que se pueden descargar de Internet como google

maps [10]. El sistema GPS está basado en técnicas que miden el tiempo de llegada de las señales de varios satélites hacia un receptor GPS con el fin de estimar la localización de este último en tierra [11].

En [12] se propone un sistema de navegación basado en dispositivos GPS y tecnología sonar. En este sistema un robot se mueve sobre una trayectoria usando un módulo GPS al mismo tiempo que evita obstáculos mediante el uso de sensores sonares. Aunque GPS puede ser usado para implementar un sistema de guiado de alta precisión, éste tiene varias desventajas si se desea utilizar en nodos inalámbricos. Primero, se necesita que ambos nodos, el nodo destino y el nodo móvil, estén equipados con hardware GPS más una conexión de radio para comunicar sus coordenadas el uno al otro (por ejemplo, celular o radios WLAN). Este solo hecho descalifica a GPS para implementar un sistema de guiado con las características aquí expuestas. Segundo, los receptores GPS aumentan sustancialmente el consumo de energía en un dispositivo móvil. Aunque esto varía de acuerdo con el fabricante, un dispositivo GPS puede drenar continuamente 50-200 mW de la batería del dispositivo móvil. Finalmente, GPS sigue siendo todavía un dispositivo adicional que en ocasiones necesita ser comprado por separado, reduciendo así las posibilidades de implementación y aumentando costos.

*Sistemas de navegación inercial (INS, por sus siglas en inglés Inertial Navigation System)*

En este tipo de sistemas es posible estimar la posición y trayectoria de un móvil mediante el conocimiento de la dirección y posición donde el móvil inicio su movimiento, la velocidad a la que se mueve y el tiempo que ha estado en movimiento. Para obtener dichos datos se utilizan diferentes dispositivos que miden en el móvil ciertos parámetros como velocidad, orientación y ángulos de inclinación, además de una computadora para procesar los datos. La estimación de la posición y trayectoria de un móvil permite realizar funciones de guiado en él si se conoce la ubicación del punto a donde se desea llegar. Esto es, la trayectoria y orientación actual de un móvil puede indicar si está en una ruta correcta rumbo a un punto conocido.

Un ejemplo de sistema de navegación inercial es presentado en [13]. En este trabajo se propone un INS donde se sabe si un robot recorre adecuadamente una trayectoria predefinida por calcular su posición y dirección en todo momento. Para realizar estos cálculos los autores usaron giroscopios de estructura vibrante para medir orientación y

equilibrio, clinómetros para medir la inclinación y acelerómetros de dos ejes para medir velocidad en los ejes  $x$  e  $y$ .

En otros casos de navegación inercial podemos encontrar el uso de técnicas de odometría donde se usa la información sobre la rotación de las ruedas de un móvil para estimar cambios en su posición. Los autores en [14] proponen un INS donde utilizan codificadores rotatorios para medir la velocidad de un vehículo mientras éste realiza un recorrido en un campus universitario. En esta propuesta la trayectoria generada por el INS es comparada con la trayectoria real para medir que tan preciso es el cálculo de la posición y dirección del móvil.

Para casos de INS donde el móvil es una persona se suele utilizar un podómetro para contar el número de pasos y estimar velocidad. También existen en el mercado unidades de medición inercial (IMU, del inglés Inertial Measurement Unit) que integran en un sólo dispositivo sensores de velocidad, orientación y hasta GPS. Zalama y Feliz proponen en [15] un INS donde una persona es equipada con un IMU para realizar un recorrido en un área en exteriores mientras su trayectoria y posición es estimada.

Entre las principales desventajas de utilizar sistemas de navegación inerciales para funciones de guiado es que se requiere conocer de ante mano la ubicación del destino. Además, muchos de los sensores mencionados requieren de calibración especial para no generar errores en las mediciones. También podemos decir que muchos de los dispositivos usados en un INS requieren interfaces de conexión especiales como RS-232 para transferir datos, haciendo más difícil su implementación en cualquier dispositivo móvil de cómputo.

### *Sistemas basados en infraestructura*

En este tipo de sistemas se requiere una red con puntos de referencia para cubrir un área de interés. Estos puntos de referencia pueden ser AP, sensores de algún tipo, antenas de radiodifusión o cualquier dispositivo que pueda conocer sus coordenadas de ubicación (por ejemplo, usando un GPS) y pueda informar de éstas a otros usuarios en la red. La finalidad de usar puntos de referencia puede verse en los siguientes ejemplos.

Los autores en [16] proponen un sistema de navegación de emergencia usando una red de sensores que, por ser colocados en coordenadas predefinidas, sirven como puntos de referencia. La idea de este sistema es que estos sensores con coordenadas conocidas

realicen un monitoreo continuo en una cierta área y detecten cualquier emergencia como incendios o inundaciones. Cuando una emergencia es detectada, el sistema calcula los límites del área de riesgo y traza rutas usando los sensores de referencia para guiar a los usuarios a un punto de seguridad.

En otro ejemplo, los autores en [17] proponen un sistema de navegación donde una red de sensores planea de forma dinámica, según las condiciones del clima del área donde está desplegada esta red, las rutas que debe seguir un robot para cumplir ciertas tareas. El robot utiliza la información de coordenadas que recibe de los sensores vecinos para saber si se está moviendo en la dirección correcta.

Dentro de las principales desventajas que existen al utilizar sistemas basados en infraestructura es la necesidad de estudiar previamente el área para definir donde deben ser colocados los puntos de referencia. Además, como ya se mencionó, requerir de una red de infraestructura aumenta los costos de implementación para los propósitos de guiado aquí expuestos.

### **2.1.2. Sistemas de localización**

En redes inalámbricas como WSN se pueden encontrar diversos criterios para clasificar a un sistema de localización. Uno de los criterios más empleados para clasificarlos es si éstos estiman distancias o ángulos entre nodos usando algún parámetro relacionado con la señal inalámbrica. A estos sistemas se les conoce como range-based y los más comunes citados en la literatura son los siguientes.

Ángulo de llegada (AoA). Estos sistemas usan técnicas en las cuales un receptor especial puede medir el ángulo en el que se recibe la señal de un transmisor específico. Estas mediciones típicamente toman lugar en una estación base donde un arreglo de antenas direccionales puede determinar el ángulo de llegada [18].

Tiempo de llegada (ToA) y Diferencia en Tiempo de Llegada (TDoA). Los sistemas de localización basados en ToA, como el descrito en [19], estiman distancias mediante la medición del tiempo de retardo de propagación de una señal entre los puntos extremos de un enlace de radio. En contraste, los sistemas TDoA, como el presentado en [20], estiman la localización de un usuario mediante el cálculo de la diferencia del tiempo de llegada

de una señal que se propaga de un transmisor a tres o más receptores sincronizados. Las técnicas que utilizan ToA y TDoA requieren una sincronización de reloj muy precisa para estimar distancias exactas. El hecho de que los tiempos de propagación en redes WLAN son en el orden de cientos de nanosegundos hace difícil estimar con precisión distancias utilizando hardware comercial para WLAN (por ejemplo, una discrepancia de un microsegundo representa un error de alrededor de 300 metros).

Intensidad de la señal recibida. Estos sistemas usan mediciones de la intensidad de la señal recibida en combinación con el conocimiento de la potencia de transmisión y el modelo de propagación usado con el fin de estimar la distancia entre un transmisor y un receptor [21, 22]. Similar a las técnicas que usan ToA y TDoA, las mediciones de intensidad de la señal de varios receptores combinadas con técnicas de triangulación pueden ser usadas para reducir la incertidumbre de la localización de los nodos. Generalmente, la precisión de estas técnicas es tan buena como el modelo de propagación usado. Un inconveniente de los sistemas basados en estimación de distancias mediante mediciones RSSI es que la señal transmitida es afectada por varios factores, los cuales son difíciles de incorporar al modelo de propagación. Tales factores pueden ser, diversas obstrucciones, objetos en movimiento, la altura y orientación de las antenas.

Como podemos observar las soluciones de guiado basadas en sistemas de localización no son una alternativa práctica en el contexto de un sistema de guiado nodo a nodo. Algunas técnicas basadas en AoA o mapas de propagación experimental podrían proveer buena localización y de bajo costo, pero requieren o hardware especial o infraestructura dedicada para trabajar apropiadamente. Similarmente, las técnicas que usan ToA y TDoA requieren hardware especial para medir con precisión el tiempo de propagación de una señal inalámbrica. Con esto se puede concluir que con el fin de hacer un sistema de guiado disponible para el usuario en general, es necesario implementar dicho sistema usando hardware WiFi comercial, el cual está actualmente disponible en muchos dispositivos móviles comúnmente usados.

## **2.2. El estándar 802.11 y su capa física (PHY)**

En esta sección se describen diferentes parámetros relacionados al estado del canal inalámbrico y se estudia su uso potencial en la implementación de un sistema de guiado

nodo a nodo. Debido a que en esta tesis solamente existe el interés de usar hardware Wi-Fi estándar para desarrollar sistemas de guiado, los parámetros cuyas mediciones pueden ser obtenidas de una tarjeta comercial inalámbrica 802.11 son analizados a continuación.

### 2.2.1. Intensidad de la señal

El nivel de energía observado durante la última unidad de datos de protocolo (PDU) de recepción es reportado por medio de un parámetro conocido como indicador de intensidad de señal recibida, abreviado como RSSI como se mencionó anteriormente. En el estándar 802.11 la única restricción en los valores de RSSI es que debe haber un número mínimo de niveles en el rango de 0 a `RSSI_Max`. Esta flexibilidad tiene una serie de implicaciones. En primer lugar, aunque RSSI es usualmente un parámetro de un byte (por ejemplo, el valor de RSSI puede estar dentro del rango entre 0 y 255), los proveedores de circuitos integrados auxiliares (chipsets) WiFi pueden elegir un valor conveniente para `RSSI_Max`, y en la práctica el rango completo no se utiliza. En segundo lugar, los fabricantes de chipsets WiFi pueden también seleccionar un rango apropiado de intensidad de la señal que va a ser mapeado hacia el conjunto de valores de RSSI. En tercer lugar, la etapa de cuantificación puede ser también elegida bajo conveniencia y ésta puede no ser necesariamente constante dentro del rango de valores de RSSI.

Como una consecuencia de la libertad proporcionada por la norma, las lecturas de RSSI procedentes de diferentes conjuntos de chipsets WiFi pueden no ser comparables. Por ejemplo, en un estudio presentado en [23], Cisco Systems mide 101 valores diferentes de energía de radio frecuencia siendo su `RSSI_Max` 100, mientras que Atheros usa un valor `RSSI_Max` de 60. Sin embargo, el uso previsto de este parámetro no tiene una correspondencia específica entre sus valores y los niveles de intensidad de la señal. Los valores de RSSI no necesitan ser de granularidad fina, o tampoco de alta precisión. Esto es debido al hecho de que el parámetro se utiliza de una manera relativa, lo cual es suficiente para llevar a cabo las tareas previstas. Por ejemplo, un vendedor puede elegir un apropiado valor de RSSI como un umbral a fin de determinar si el canal está libre o no.

Una de las cuestiones que más vale la pena mencionar es que los chipsets WiFi comerciales no pueden medir un valor de RSSI por encima de 1mW [23]. La lógica detrás de este

hecho es que, aunque la potencia de transmisión puede ser decenas de veces mayor, este nivel de RSSI es suficiente para proporcionar conectividad a la velocidad de datos más alta posible. Esto significa que una vez que la tarjeta detecta 1mW o más, se considera que se ha medido el 100 % del valor de RSSI independientemente de qué tan fuerte es la intensidad real de la señal.

### **2.2.2. Calidad de la señal**

Calidad de la señal (SQ, del inglés Signal Quality) es otro parámetro mencionado en el estándar 802.11 (1999) [24]. Una definición precisa del término no se proporciona, pero se especifica que SQ está relacionada con la correlación de código DSSS PN. La falta de otras especificaciones significa que los detalles específicos de implementación pueden diferir entre los diferentes proveedores de chipsets WiFi. Aunque la especificación dada por la norma sólo se aplica al esquema de modulación DSSS, las tarjetas inalámbricas también informan de lecturas de calidad de la señal cuando se transmite usando una técnica de modulación diferente. Dado que los detalles de implementación son información confidencial, sólo podemos especular que esos valores están relacionados con la correlación promedio entre los símbolos transmitidos y recibidos. En cualquier caso, la falta de definiciones precisas no es un problema grave debido a que las lecturas SQ también se utilizan de una manera relativa.

### **2.2.3. Velocidad de transmisión de datos**

El estándar 802.11 hace uso de la modulación adaptativa [25] con el fin de tener en cuenta las condiciones actuales del canal en el proceso de transmisión. De esta manera, altas tasas de transmisión de datos se pueden lograr en distancias cortas donde la señal es suficientemente fuerte, mientras que esquemas más robustos y de baja velocidad de transmisión se utilizan para distancias más largas. Esta relación entre la velocidad de datos y la distancia puede ayudar a estimar la posición relativa de una estación inalámbrica. Sin embargo, cada proveedor es probable que utilice algoritmos diferentes para el control de la velocidad de datos de modo que la asociación entre la velocidad de datos y la distancia no pueden ser generalizadas para todos los conjuntos de chipsets WiFi. Por ejemplo en la tabla 2.1 se muestra una relación entre valores RSSI y

TABLA 2.1: Relación entre RSSI y velocidad de transmisión en equipos Cisco 802.11ab

Estándar	Velocidad de Tx	RSSI
802.11b	1 Mb/s	-92 dBm
	2 Mb/s	-86 dBm
	5.5 Mb/s	-84 dBm
	11 Mb/s	-77 dBm
802.11a	6 Mb/s	-88 dBm
	9 Mb/s	-79 dBm
	12 Mb/s	-81 dBm
	18 Mb/s	-78 dBm
	24 Mb/s	-76 dBm
	36 Mb/s	-69 dBm
	48 Mb/s	-64 dBm
	54 Mb/s	-60 dBm

velocidad de transmisión en equipos Cisco que utilizan el estándar 802.11ab [26]. Esta relación permite saber el nivel de la señal en el cual los datos pueden ser transferidos con confiabilidad cuando se tiene una cierta velocidad de datos.

#### 2.2.4. Mapas experimentales

Con el fin de determinar el parámetro que tiene el mayor potencial para ser utilizada como el componente central de un sistema de guiado, se considera importante estudiar el comportamiento de cada parámetro en la proximidad (vecindario) de un nodo de destino. Para este propósito, se crearon mapas detallados de las tres métricas antes mencionadas alrededor de un nodo de destino. El lugar que se eligió para estos experimentos fue una explanada semi-abierta ubicada dentro de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, Ciudad Universitaria), donde las personas y los edificios se encuentran dispersos en esta zona. Debido a que los mapas de propagación cambian dependiendo de las características de cada lugar, el propósito de hacer estos experimentos es sólo para obtener un panorama general en el problema de guiado.

Una vista representativa del área experimental es mostrada en la figura 2.1.a, y una fotografía aérea se muestra en la figura 2.1.b. Las dos construcciones rectangulares que se observan en ambas figuras corresponden a dos canchas de *fronton* formadas por paredes altas y gruesas. Con el fin de construir el mapa de propagación asociado a

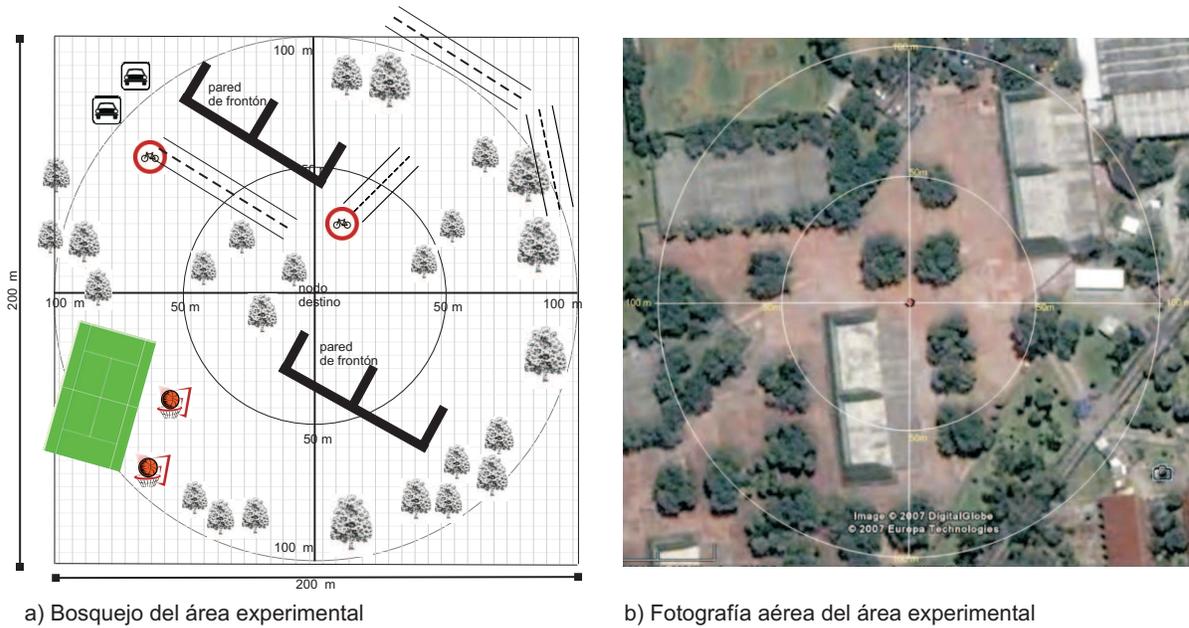


FIGURA 2.1: Área experimental en exteriores

cada parámetro, se posicionó un nodo destino (una computadora portátil equipada con interfaz WiFi) en el centro del área experimental como se muestra en la figura 2.1. Entonces colocamos un nodo móvil (un usuario cargando una computadora portátil) en diferentes lugares dentro de un cuadrado de  $(200 \times 200)m^2$  centrado en el nodo destino. Este nodo tomó muestras cada 5 metros con el fin de construir un mapa de propagación para RSSI, SQ y velocidad de transmisión. Cada mapa consistió de 1,600 mediciones tomadas en diferentes lugares del área experimental. Dada la variabilidad observada de cada métrica, aún en el mismo lugar, se tomaron varias muestras de las métricas con el fin de obtener un valor promedio de cada punto en el mapa.

Las figuras 2.2, 2.3 y 2.4 muestran los mapas resultantes para SQ, RSSI y velocidad de transmisión, respectivamente. El plano  $X-Y$  de estas figuras corresponde al área experimental y el eje  $Z$  al valor de la métrica en cada punto. Para fines de comparación, una escala de 60 unidades fue seleccionada para los ejes verticales de los tres mapas. En las figuras 2.2, 2.3 y 2.4 se puede observar que existe un comportamiento general presentado en los tres parámetros. Primeramente, como era esperado, cada parámetro presenta un valor máximo en la ubicación del nodo destino, y el valor del parámetro decae a medida que se alejan de él. Los tres mapas exhibieron puntos ciegos detrás de las paredes del frontón, donde existen condiciones de desvanecimiento lento que bloquearon la señal hasta llegar a una recepción nula.

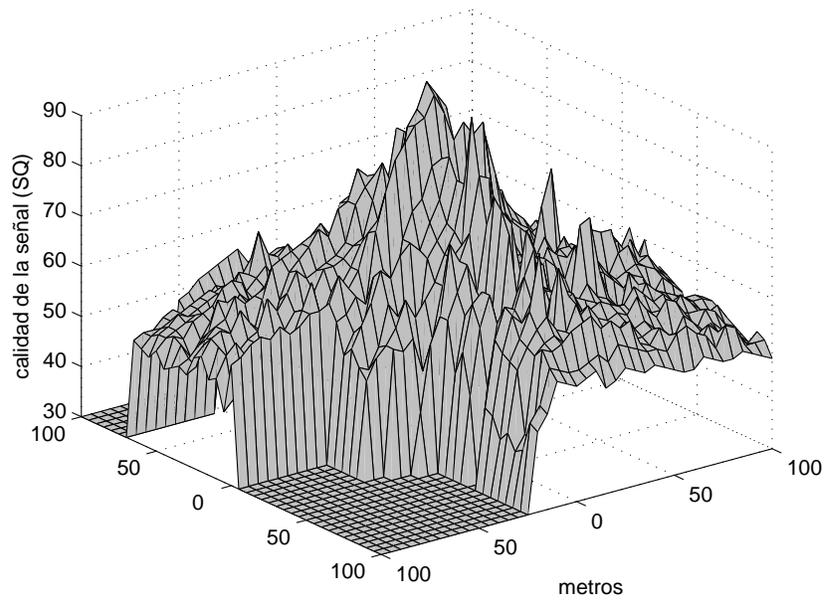


FIGURA 2.2: Mapa de propagación de SQ

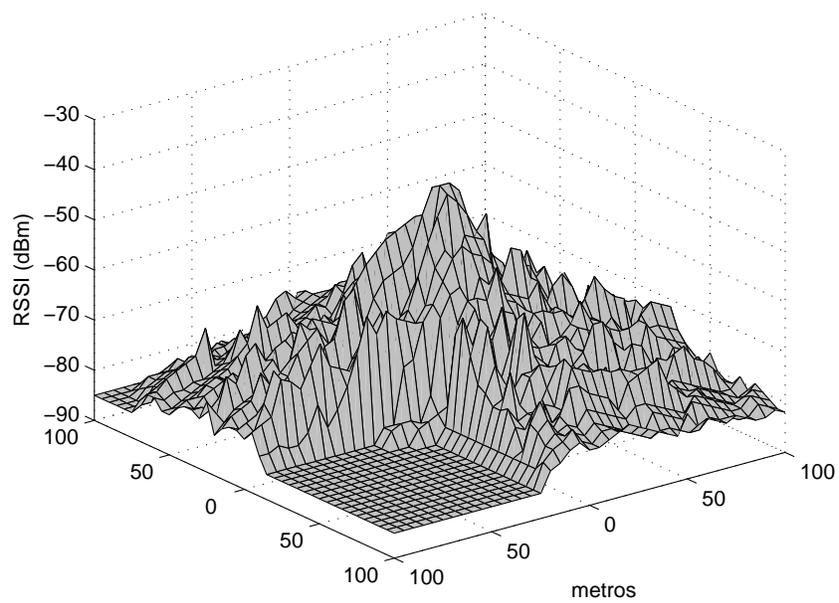


FIGURA 2.3: Mapa de propagación de RSSI

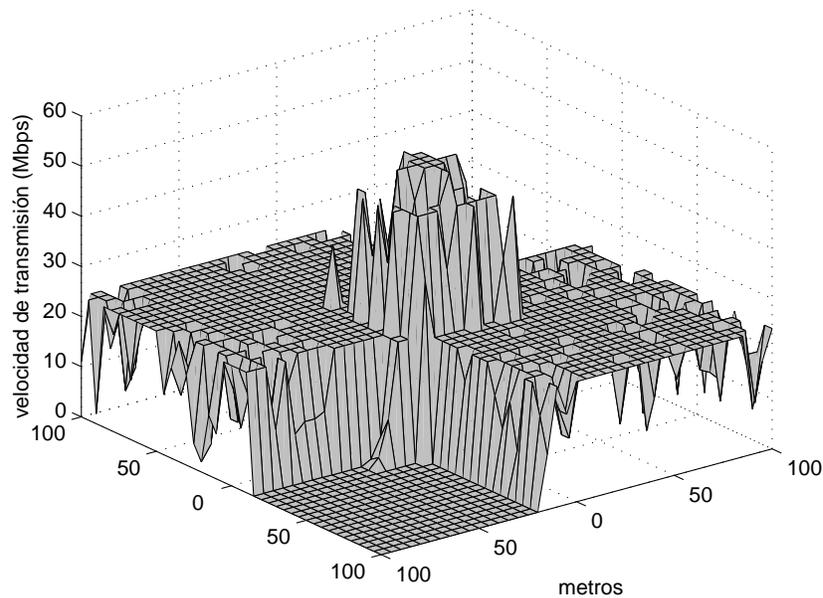


FIGURA 2.4: Mapa de propagación de velocidad de transmisión

Es posible observar que a diferencia de los mapas de RSSI y SQ que se perciben similares a simple vista, las mediciones de velocidad de transmisión muestran grandes áreas donde no existe variación en las mediciones. Para destacar este punto, en la figura 2.5 se muestran las curvas de nivel de las mediciones de velocidad de transmisión vistas desde una toma superior al mapa de propagación. Este comportamiento tiene directas implicaciones de guiado ya que significa que aún en largos movimientos del nodo móvil no pueden reconocerse cambios en las mediciones de velocidad de transmisión de datos, lo cual no proporciona información nueva de en qué dirección se desplazó el nodo móvil. Por ejemplo, un nodo móvil en la región de 24 Mbps puede caminar potencialmente una distancia larga antes de obtener una lectura diferente en la velocidad de transmisión. Del mismo modo, una vez que un nodo llega a la región 54 Mbps, el nodo está básicamente ciego y no tiene otros medios de guiado para acercarse más al nodo destino puesto que ha alcanzado la velocidad de transmisión máxima. Después de analizar las figuras 2.4 y 2.5 se puede concluir que el comportamiento presentado por la velocidad de transmisión reduce la utilidad de ésta como un parámetro candidato a ser usado por un sistema de guiado, y por lo tanto no será considerada en esta tesis.

Analizando ahora los mapas de propagación de SQ y RSSI mostrados en las figuras 2.2 y 2.3 se puede observar que son muy similares, teniendo SQ un valor máximo de mayor

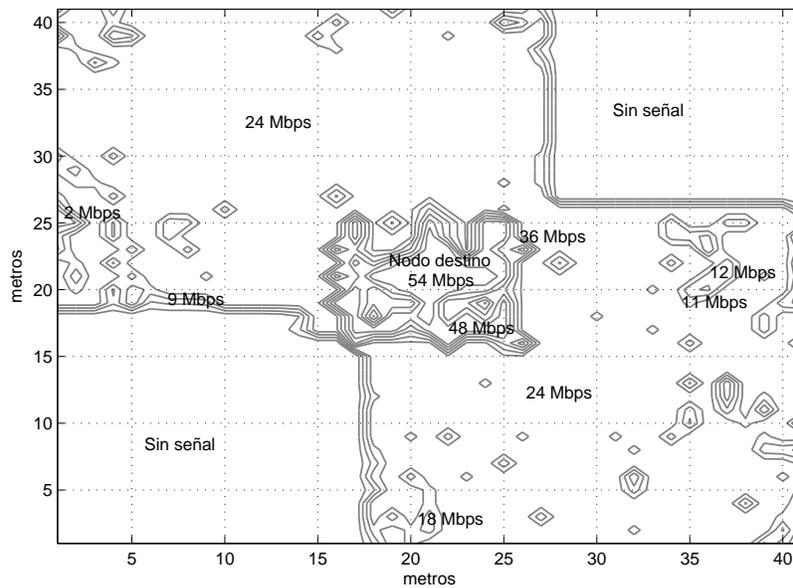


FIGURA 2.5: Curvas de nivel de las mediciones de velocidad de transmisión de datos en el área experimental

altura que el que presenta RSSI. Ambos mapas muestran mucha variabilidad de un punto a otro, y también presentan varios puntos con máximos locales. Una alta variabilidad, como vamos a ver después, es de gran ayuda para fines de guiado porque aún con pequeños movimientos se obtiene una lectura diferente de la métrica. Sin embargo, la presencia de máximos locales también va a llegar a ser el problema más serio a resolver en el diseño de un eficiente sistema de guiado como se verá posteriormente.

### 2.3. Un algoritmo de guiado para usuarios de redes WLAN en exteriores

Como se mencionó anteriormente, se considera que una característica clave de un sistema de guiado para ser ampliamente aceptado y utilizado por los usuarios inalámbricos es que esté construido a partir de hardware estándar. Éste no debe requerir hardware adicional o infraestructura dedicada para que funcione correctamente. De la misma manera, no debe requerir la intervención significativa del nodo destino y su implementación no debe

generar costos adicionales. En esta sección se describe GUIDE-gradient, un sistema de guiado que se construye en torno a todas estas premisas.

Puede haber muchos enfoques para abordar el problema de guiado. Una forma sencilla es utilizar estimación de distancias y triangulación con el fin de estimar la posición del nodo destino. Otro enfoque es tratar de determinar un vector que apunte hacia el nodo de destino (por ejemplo, un vector de gradiente). Esta tesis se centra en la técnica de gradiente, la cual es ampliamente descrita y evaluada en las siguientes secciones.

### 2.3.1. GUIDE-gradient

En esta sección se describe GUIDE-gradient, el cual no requiere de ningún medio de localización para operar.

#### *El corazón del algoritmo*

El razonamiento aquí presentado asume que el comportamiento de un criterio de proximidad (por ejemplo, RSSI o SQ) puede ser modelado usando una superficie lisa, con solo un valor máximo localizado en la ubicación del nodo destino. Al menos este modelo debe sostenerse razonablemente bien en espacios abiertos donde no hay muchos obstáculos que puedan producir reflejos significativos de la señal.

La idea básica detrás de GUIDE-gradient es determinar un vector gradiente empírico que apunte hacia la posición que corresponde al valor máximo de la superficie. Un usuario móvil puede usar esta dirección con el fin de dirigirse hacia el nodo destino. Para este fin, existen muchas maneras posibles para calcular el gradiente (ver [27, 28]). Como va a ser explicado a continuación, proponemos usar tres mediciones no colineales con el fin de calcular una aproximación del gradiente en el vecindario de los puntos de muestreo. Este método es ilustrado en la figura 2.6 donde la superficie mostrada sirve solamente para fines ilustrativos.

Para describir el método de gradiente consideramos una situación donde, como resultado de sus dos últimos movimientos, la trayectoria realizada por un nodo móvil tiene la forma de un triángulo equilátero. Consideramos también que las mediciones de un criterio de proximidad (por ejemplo mediciones de RSSI) fueron tomadas en los vértices del triángulo. Denotamos por  $A=(x_A, y_A)$ ,  $B=(x_B, y_B)$  y  $C=(x_C, y_C)$  los vértices del

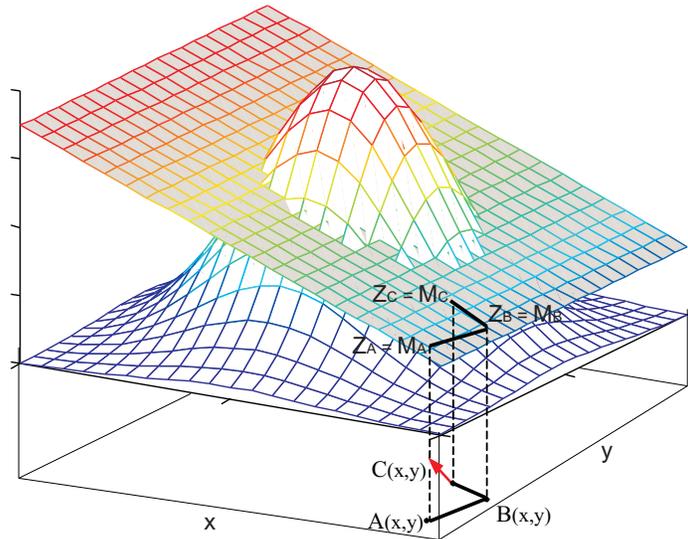


FIGURA 2.6: Aproximación del vector gradiente usando tres mediciones no colineales.

triángulo y  $M_A$ ,  $M_B$  y  $M_C$  como las mediciones correspondientes. Asumimos que  $A$  fue la posición inicial y  $C$  la posición final. Así, después de dos movimientos no colineales tenemos la siguiente tripleta  $(x_A, y_A, M_A)$ ,  $(x_B, y_B, M_B)$  y  $(x_C, y_C, M_C)$ .

Con el fin de determinar el vector gradiente consideramos primeramente que en el espacio tridimensional  $X$ - $Y$ - $Z$  (la dimensión  $Z$  corresponde a las mediciones) existe un plano el cual está completamente definido por la tripleta que acabamos de mencionar. La ecuación de un plano en su forma natural está dada por  $ax + by + cz = 1$ . Resolviendo esta ecuación para  $z$  se produce

$$z = \frac{1}{c} - \frac{a}{c}x - \frac{b}{c}y \quad (2.1)$$

y aplicando el operador  $\nabla$  resulta

$$\nabla z = -\frac{a}{c}\hat{i} - \frac{b}{c}\hat{j}. \quad (2.2)$$

El vector gradiente, dado por (2.2), apunta hacia la posición en el plano  $X$ - $Y$  correspondiente al máximo valor de la superficie. Por lo tanto, este vector puede ser usado

para determinar la dirección del siguiente movimiento. Sin embargo, en los primeros experimentos que se realizaron no tenía sentido determinar este vector con gran precisión puesto que en la práctica el ojo humano no es capaz de seguir instrucciones de guiado por debajo de  $30^\circ$ . Como un resultado de esta limitación, decidimos que no era necesario calcular el gradiente con una alta precisión, y se decidió usar el proceso de cuantificación que se describe a continuación.

Denotemos por  $\overrightarrow{AB}$ ,  $\overrightarrow{BC}$  y  $\overrightarrow{AC}$  los vectores de desplazamiento considerando los movimientos de  $A$  hacia  $B$ ,  $B$  hacia  $C$  y  $A$  hacia  $C$ , respectivamente. Consideremos el producto escalar entre el gradiente y cada uno de estos vectores de desplazamiento, pero vamos a tomar en consideración únicamente si el resultado es positivo o negativo. Como un ejemplo, vamos a revisar las condiciones que satisfacen las siguientes desigualdades,

$$\nabla z \cdot \overrightarrow{AB} < 0, \quad (2.3)$$

$$\nabla z \cdot \overrightarrow{BC} > 0 \quad y \quad (2.4)$$

$$\nabla z \cdot \overrightarrow{AC} < 0. \quad (2.5)$$

El gradiente va a tener una proyección positiva en un vector de desplazamiento si el ángulo entre ellos está en el intervalo  $[-90^\circ, 90^\circ]$ . Por lo tanto, la región que cumple con el sistema de desigualdades simultáneas (2.3)-(2.5) puede ser encontrada como la superposición de tres semiplanos (ver figura 2.7). Esta región contiene todos los gradientes que satisfacen las condiciones (2.3)-(2.5) y el procedimiento de cuantificación consiste en la representación de este conjunto con un solo vector de cuantificación. Otras condiciones con respecto al producto escalar entre el gradiente y los vectores de desplazamiento llevan a otras soluciones con otras regiones y otros vectores de cuantificación.

Ahora se considera que la desigualdad (2.3), puede ser ampliada de la siguiente forma

$$\left( -\frac{a}{c}\hat{i} - \frac{b}{c}\hat{j} \right) \cdot ((x_B - x_A)\hat{i} + (y_B - y_A)\hat{j}) < 0, \quad (2.6)$$

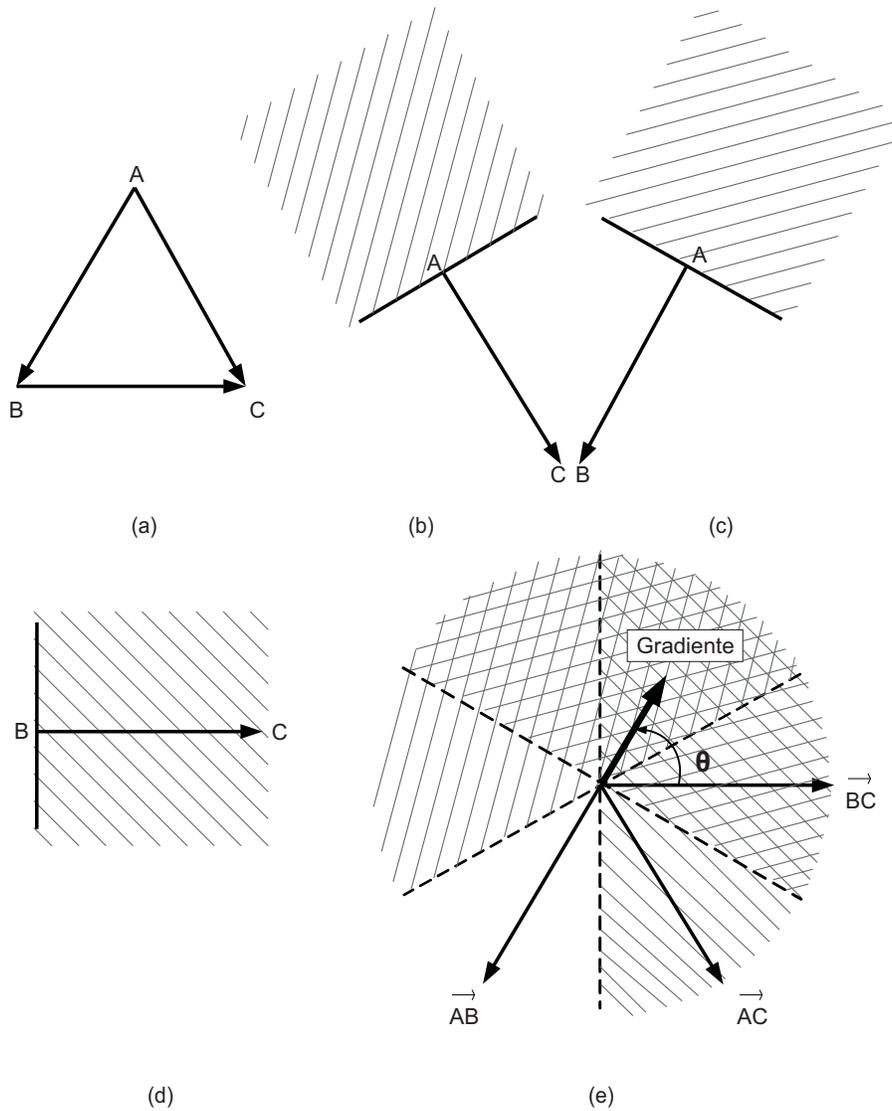


FIGURA 2.7: (a) Vectores de desplazamiento, (b) región  $\nabla z \cdot \vec{AC} < 0$ , (c) región  $\nabla z \cdot \vec{AB} < 0$ , (d) región  $\nabla z \cdot \vec{BC} > 0$  y (e) región de solución y su correspondiente vector de cuantificación.

la cual puede ser escrita como

$$-\frac{a}{c}(x_B - x_A) - \frac{b}{c}(y_B - y_A) < 0 \tag{2.7}$$

o

$$\left(\frac{1}{c} - \frac{a}{c}x_B - \frac{b}{c}y_B\right) - \left(\frac{1}{c} - \frac{a}{c}x_A - \frac{b}{c}y_A\right) < 0. \tag{2.8}$$

De (2.1) se puede observar que (2.8) es equivalente a la condición  $M_B - M_A < 0$ . Procediendo de manera similar para (2.4) y (2.5) se puede concluir que el conjunto de desigualdades (2.3)-(2.5) es equivalente a

$$M_B - M_A < 0 \quad (2.9)$$

$$M_C - M_B > 0 \quad (2.10)$$

$$M_C - M_A < 0 \quad (2.11)$$

Este resultado simplifica enormemente los cálculos ya que implica que sólo es necesario comprobar el signo de tres diferencias con el fin de determinar si el gradiente cae en una región o no. Una vez que la región donde el gradiente cae es encontrada, el correspondiente vector de cuantificación puede ser asignado.

Con el método antes descrito se puede obtener un gradiente cuantificado que apunta hacia el punto máximo. Este vector, sin embargo, es dado en términos de sus componentes  $X$ - $Y$ . Resulta más conveniente que la dirección del siguiente movimiento esté en términos del ángulo entre el gradiente cuantificado y la dirección del último movimiento (el cual es dado por el vector  $\vec{BC}$ ). Este ángulo puede ser fácilmente calculado del producto punto, es decir,

$$\cos \theta = \frac{\nabla z \cdot \vec{BC}}{|\nabla z| |\vec{BC}|}. \quad (2.12)$$

### *GUIDE-gradient*

En esta sección se introduce GUIDE-gradient, un algoritmo de guiado basado en los siguientes tres movimientos básicos: a) si después de un movimiento el criterio de proximidad mejoró, entonces el nodo móvil puede continuar en su misma dirección sin cambios en su trayectoria, b) si el criterio permaneció igual, entonces el nodo móvil recibe la orden de girar aleatoriamente  $60^\circ$  en el sentido en el que giran las manecillas de un reloj (clockwise, CW) o contrario a éstas (counterclockwise, CCW) y, c) si el criterio

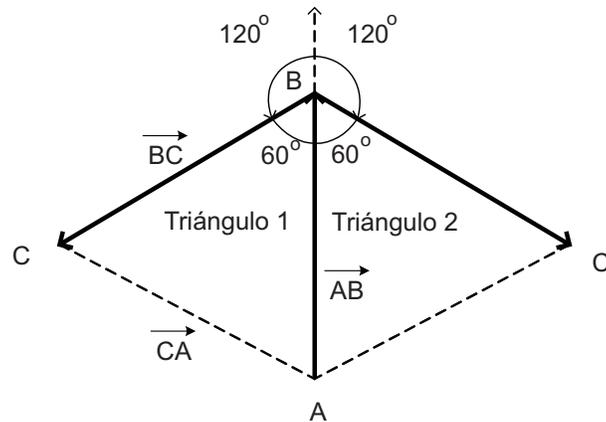


FIGURA 2.8: Triángulos virtuales creados con tres mediciones no colineales

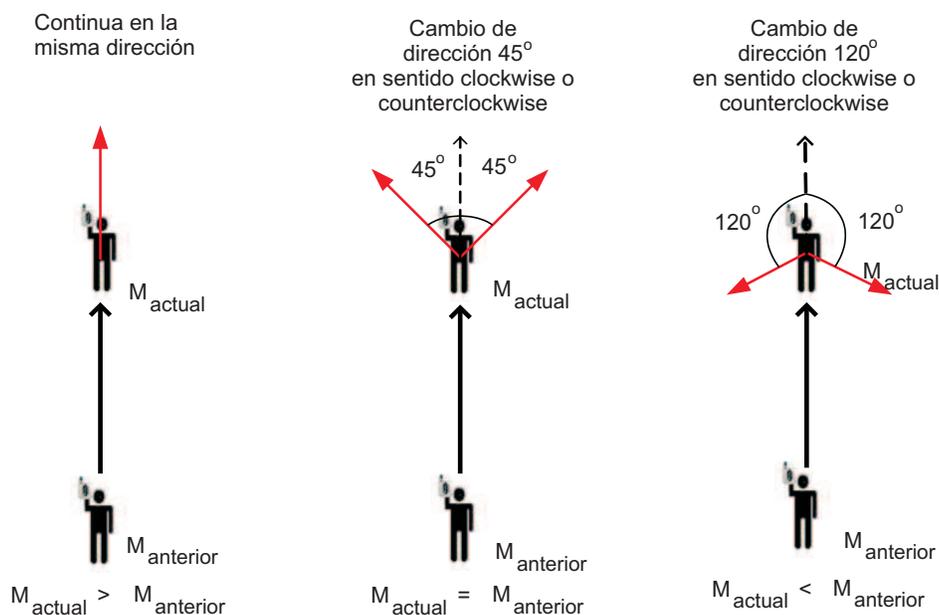


FIGURA 2.9: Criterios de decisión para seleccionar la trayectoria a seguir usando GUIDE-gradient. Las variables  $M_{actual}$  y  $M_{anterior}$  significan las mediciones actual y anterior, respectivamente.

empeoró, entonces el nodo móvil recibe la orden de girar  $120^\circ$  y moverse otra vez con el fin de crear un nuevo triángulo equilátero (de hecho, como se representa en la figura 2.8, dos triángulos pueden ser creados) y utilizar el resultado descrito en la sección anterior con el fin de encontrar la dirección de movimiento siguiente. La figura 2.9 ilustra estas tres situaciones.

Vale la pena mencionar la razón por la cual se determina que el nodo móvil se mueva  $60^\circ$  cuando el valor de la métrica fue el mismo en las posiciones actual y anterior, y que se

nueva  $120^\circ$  cuando el valor de la métrica fue mayor en la posición anterior comparado con la posición actual. Esto es debido a que estos movimientos van a crear eventualmente puntos de muestreo distribuidos uniformemente, como se ilustra en la figura 2.10.

A continuación se describen los elementos del algoritmo de guiado GUIDE-gradient.

---

**Algoritmo GUIDE-gradient**

**Entrada:** Detectar señal WiFi de un nodo estático (destino)

**Salida:** Encontrar nodo destino

**1. Inicialización**

Medir  $M_A$ .

Moverse  $c$  metros en línea recta en una dirección aleatoria. Medir  $M_B$ .

Aleatoriamente girar  $120^\circ$  CW o CCW. Moverse  $c$  metros. Medir  $M_C$ .

Utilizar la dirección de giro seleccionada en el punto anterior y  $\{M_A, M_B, M_C\}$  con el fin de encontrar la dirección del siguiente movimiento buscando ésta con la correspondiente entrada en la tabla 2.2

**2. Loop**

Moverse  $c$  metros en línea recta.

**if** nodo destino es encontrado **then**

fin de GUIDE.

**else**

ir al paso 3.

**end if**

**3.** Asignar  $M_A \leftarrow M_B$  y  $M_B \leftarrow M_C$ . Medir  $M_C$ .

Comparar  $M_C$  y  $M_B$ . Los siguientes casos son posibles:

**if** ( $M_C \geq M_B$ ) **then**

No hay cambio de trayectoria.

**end if**

**if** ( $M_C == M_B$ ) **then**

Aleatoriamente girar  $60^\circ$  CW o CCW.

**end if**

**if** ( $M_C \leq M_B$ ) **then**

Aleatoriamente girar  $120^\circ$  CW o CCW.

Moverse  $c$  metros en línea recta.

Calcular una nueva dirección según la tabla 2.2

**end if** Ir al paso 2

---

La implementación de GUIDE-gradient basada en el algoritmo antes descrito así como los resultados de experimentos son presentados en la siguiente sección.

## 2.4. Implementación de GUIDE-gradient

Para la implementación y prueba de GUIDE-gradient se utilizó una computadora portátil Toshiba Tecra A5 con sistema operativo Ubuntu (kernel 2,6,15 – 23 – 386) equipada

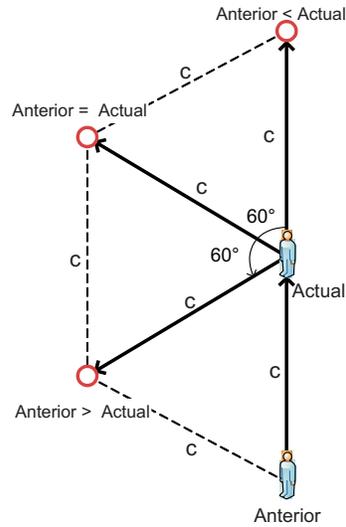


FIGURA 2.10: Distribución espacial de los puntos de muestreo

TABLA 2.2: Acción en el punto C

$M_B - M_A$	$M_C - M_B$	$M_C - M_A$	Acción
(a) Triángulo 1 de la Figura 2.8*			
+	+	+	60° CW
+	+	-	**
+	-	+	120° CW
+	-	-	180°
-	+	+	0°
-	+	-	60° CCW
-	-	+	**
-	-	-	120° CCW
(b) Triángulo 2 de la Figura 2.8			
+	+	+	60° CW
+	+	-	**
+	-	+	120° CW
+	-	-	180°
-	+	+	0°
-	+	-	60° CCW
-	-	+	**
-	-	-	120° CCW

\*Notación:  $M_A$ ,  $M_B$  y  $M_C$  denotan los valores de los parámetros medidos en los puntos A, B y C, respectivamente.

\*\* Estos casos nunca suceden, cuando  $C > B > A$  no es posible que  $C < A$  y por otro lado si  $C < B < A$  no es posible que  $C > A$ .

con una tarjeta inalámbrica Intel PRO/Wireless 2200BG 802,11g. Para desarrollar la aplicación de GUIDE-gradient se utilizó el lenguaje de programación Java.

GUIDE-gradient hace uso las herramientas de Linux Wireless Extensions y Wireless Tools [29], para interactuar con el controlador de un dispositivo inalámbrico y obtener información de bajo nivel como son las estadísticas de una conexión inalámbrica (por ejemplo, velocidad de transmisión, RSSI y SQ), estos valores son obtenidos por el sistema de guiado en cada punto de prueba.

Durante las pruebas que se mencionan más adelante, y debido a los efectos de desvanecimiento lento comunes en áreas en exteriores, se encontró que existe una alta variabilidad de las mediciones de las métricas incluso en un mismo punto. Por lo tanto, el sistema de guiado toma varias muestras en cada punto hasta que la desviación estándar no cambie significativamente con muestras adicionales. Una vez que la desviación estándar se estabiliza, se considera el valor promedio de las muestras tomadas para ser el valor representativo de ese punto de prueba. Se encontró que el número de muestras necesarias para que la desviación estándar se estabilice depende de los escenarios, la distancia y el parámetro que se mide. Para ilustrar este fenómeno se colocaron dos computadoras portátiles separadas por una cierta distancia y se tomaron varias muestras de SQ y RSSI. Este experimento fue repetido para diferentes distancias. Las figuras 2.11(a-d) muestran cómo la desviación estándar se estabiliza a medida que el número de muestras aumenta.

Las figuras 2.11 (a) y (b) se refieren a las pruebas donde la separación entre computadoras fue de 20 metros usando SQ y RSSI, respectivamente. Como se puede observar en ambas figuras el valor de la desviación estándar comienza a estabilizarse después de 30 muestras. Así, después de este número de muestras se puede usar el valor promedio del parámetro como un valor representativo. Cuando la distancia entre las dos computadoras se incrementa, por ejemplo 80 metros, la desviación estándar requiere más muestras antes de estabilizarse (ver Figuras 2.11 (c) y (d)). Se especula que este comportamiento ocurre debido a que una mayor distancia hace más débil la señal recibida en el receptor, por lo tanto es más propicia a ser afectada por el ruido, la interferencia, los objetos en movimiento y el medio ambiente.

Aunque GUIDE-gradient realiza varias mediciones antes de calcular una nueva dirección, el usuario no nota el retraso, debido a que estas mediciones ocurren en un segundo o dos.

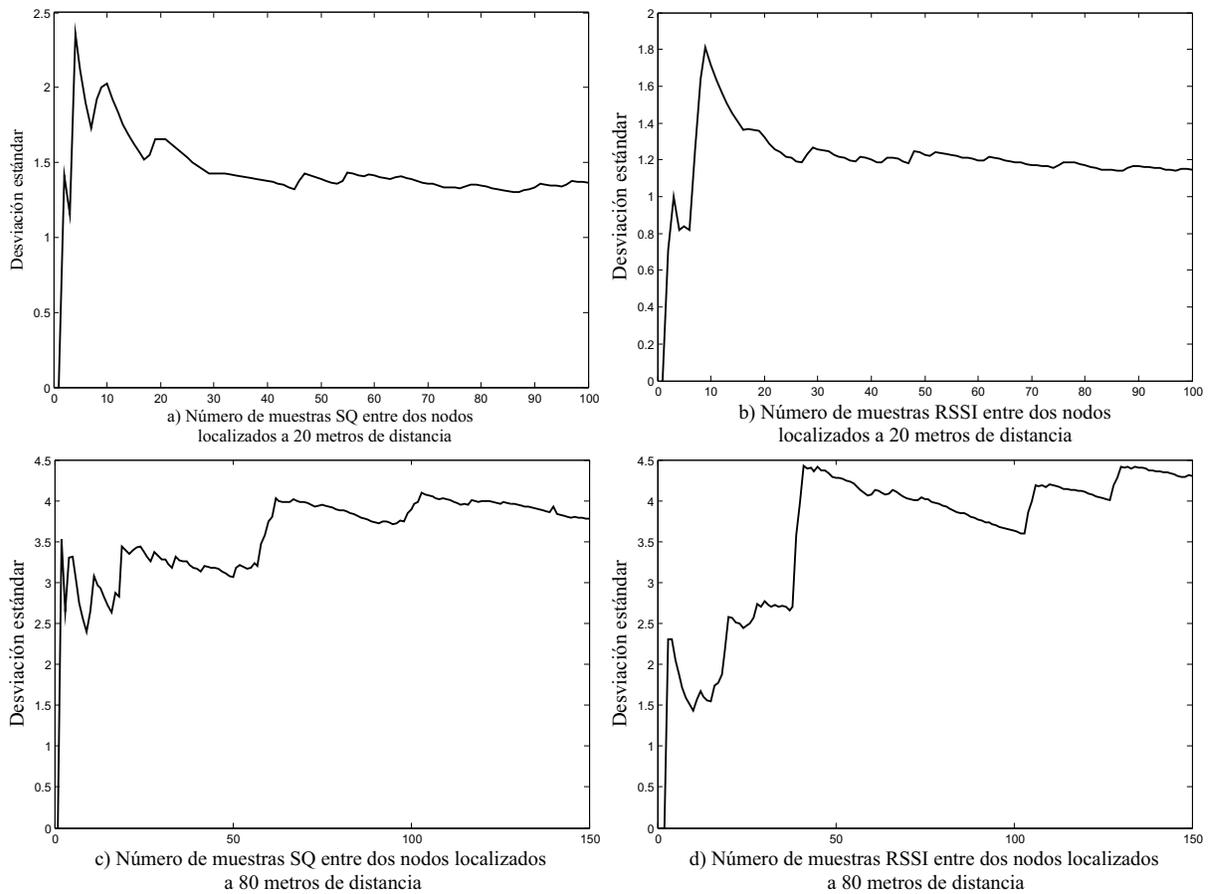


FIGURA 2.11: Desviación estándar de SQ y RSSI entre dos nodos localizados a 20 y 80 metros de distancia el uno del otro.

Las indicaciones de guiado son dadas al usuario por medio de indicaciones gráficas y comandos de voz pregrabados. Se observó que, para un usuario común, las indicaciones proporcionadas por el sistema de guiado fueron fáciles de seguir si se utiliza la imagen conocida de un reloj de manecillas en lugar de una escala en grados. En la figura 2.12 se muestra una imagen de la interfaz gráfica que tiene el usuario. La interfaz muestra un ejemplo de un área de prueba de poco más de 4,000  $m^2$ .



FIGURA 2.12: Interfaz gráfica de GUIDE-gradient

## 2.5. Experimentos y Resultados

### 2.5.1. Experimentos de guiado en un escenario real

La interfaz gráfica de usuario de GUIDE-gradient hace uso de una imagen satelital sólo para fines ilustrativos. Tal imagen no juega ningún papel en el funcionamiento del sistema. En todos los experimentos de guiado el nodo móvil fue inicialmente posicionado en el centro del área experimental y el nodo destino fue colocado a cien metros de distancia en una posición arbitraria. Estos puntos aparecen en las figuras en posiciones etiquetadas como “Inicio” y “Nodo destino”, respectivamente. La distancia que el nodo móvil recorre entre cada punto de muestreo (punto donde se mide el parámetro) fue de 20 metros.

En la figura 2.13 se muestra un ejemplo de una trayectoria completa de guiado durante el uso de GUIDE-gradient. En esta figura se muestra los movimientos realizados por el nodo móvil junto con el valor del parámetro medido en cada punto de muestreo. En este experimento el usuario detuvo su movimiento cuando él o ella alcanzaron una distancia de menos de 20 metros respecto al nodo destino. Para marcar este punto se definió un círculo alrededor del nodo destino de 20 metros de radio. Cuando el programa de Java (que tiene implementado el algoritmo de guiado) comienza su ejecución, el usuario debe indicar en la interfaz gráfica su velocidad de movimiento aproximada que usará, de

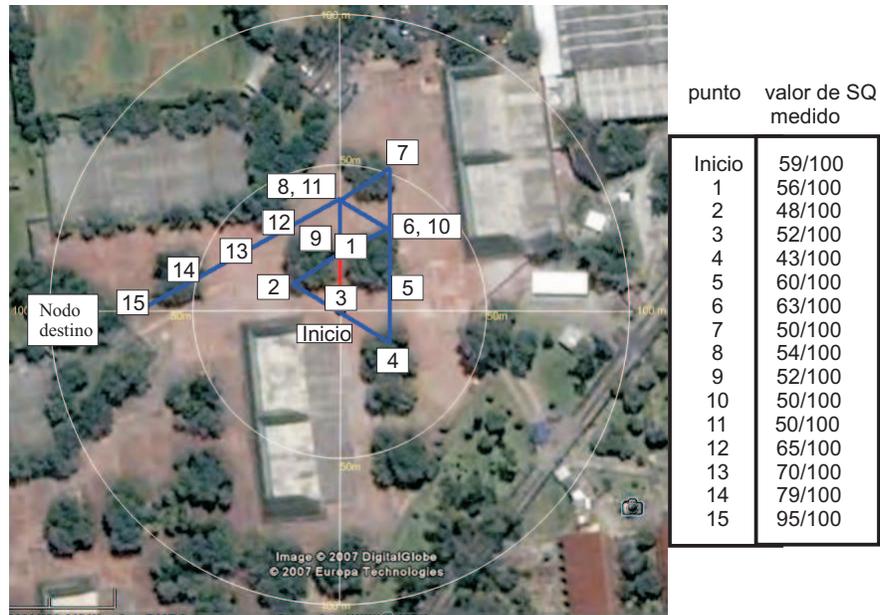


FIGURA 2.13: Experimento de GUIDE-gradient usando SQ

manera que el programa pueda determinar aproximadamente el tiempo que le tomará al usuario moverse una distancia deseada.

*Experimentos con GUIDE-gradient*

La figura 2.13 muestra un experimento de guiado usando el algoritmo GUIDE-gradient con SQ como métrica. Se puede observar que a pesar de que hay varios impedimentos para el guiado, después de unos pocos movimientos el sistema de guiado fue capaz de encontrar al nodo destino. A modo de ejemplo se detallan las decisiones en la trayectoria que tomó el nodo móvil usando GUIDE-gradient.

- Inicio (punto 0). El nodo mide un valor SQ de 59/100 y (aleatoriamente) se mueve a una dirección que corresponde a la parte superior de la figura 2.13.
- Punto 1. El nodo mide un valor SQ de 56/100 el cual es peor que el observado en el punto 0. Por lo tanto, el nodo gira 120° en sentido CCW en este caso.
- Punto 2. El nodo mide un valor SQ de 48/100. Los puntos 0-2 forman un triángulo equilátero. Según las reglas mostradas en la tabla 2.2, el nodo gira 120° CCW.

- Punto 3. El nodo mide un valor SQ de 52/100, el cual es mejor que el observado en el punto 2, por lo tanto, el nodo continúa moviéndose a lo largo de la misma trayectoria.
- Punto 4. El nodo mide un valor SQ de 43/100, el cual es peor que el observado en el punto 3. Por lo tanto, el nodo gira 120° CCW.
- Punto 5. El nodo mide un valor SQ de 60/100. Los puntos 3-5 forman nuevamente un triángulo equilátero. Como explicamos antes, el valor local del gradiente es calculado (usando la tabla 2.2) el cual hace que el nodo continúe moviéndose a lo largo de la misma dirección (gira 0°).
- Punto 6: El nodo mide un valor SQ de 63/100. El nodo continúa moviéndose a lo largo de la misma trayectoria.
- Punto 7: El nodo mide un valor SQ de 50/100. Por lo tanto, el nodo gira 120° CCW.
- Punto 8: El nodo mide un valor SQ de 54/100. Los puntos 6-8 forman un triángulo equilátero. Según la tabla 2.2 el nodo gira 60° CCW.
- Punto 9: El nodo mide un valor SQ de 52/100. El nodo gira 120° CCW.
- Punto 10: El nodo mide un valor SQ de 50/100. Los puntos 8-10 forman un triángulo equilátero y según la tabla 2.2, el nodo gira 120° CCW.
- Punto 11: El nodo mide un valor SQ de 50/100. El nodo cambia su dirección 60°.
- Puntos 12-15: En estos puntos el valor de SQ sigue mejorando, el nodo continúa moviéndose a lo largo de la misma trayectoria eventualmente alcanzando al nodo destino dentro de una distancia de 20 metros.

En la figura 2.13 se observa que el nodo móvil se las arregla para estar más cerca del nodo de destino. También se observa que éste se mueve en círculos durante unos minutos antes de dirigirse directamente al nodo destino, lo cual podría deberse a los árboles ubicados alrededor de la posición de inicio y a la presencia de máximos locales del parámetro usado en el área. Recordemos que las mediciones de SQ como de RSSI no son inmunes a los efectos de propagación.

## 2.5.2. Simulaciones

Se utilizaron los datos mostrados en la sección 2.2.4 con el fin de simular el área experimental y, de este modo, realizar un gran número de experimentos de guiado. En esta sección se presentan los resultados.

Las figuras 2.14, 2.15 y 2.16 muestran la función de distribución acumulada (CDF) de la distancia recorrida por el nodo móvil antes de acercarse a 10, 20 y 30 metros del nodo destino, respectivamente. En cada figura se muestran diferentes curvas donde GUIDE-gradient utilizó movimientos de 10, 20 y 30 metros entre cada punto de medición con SQ y RSSI como parámetro. Para estos experimentos se dibujó un círculo con un radio de 100 metros centrado en el nodo destino, después se seleccionaron varios puntos sobre el círculo con una separación de 5 grados que servirían como puntos de inicio donde el nodo móvil comienza su recorrido. Para cada punto de inicio, se consideraron 8 trayectorias iniciales diferentes y separadas 45 grados. Por lo tanto, cada curva representa los resultados de cerca de 500 diferentes experimentos de guiado. Debido a que existen algunos puntos ciegos detrás de las paredes del frontón, no se pudo realizar experimentos en los puntos ubicados en esas zonas. En estas figuras también se ilustra el desempeño de un sistema de guiado ideal, en el que el nodo móvil se mueve directamente al nodo de destino.

En la figura 2.14 se muestra el desempeño de GUIDE-gradient para una precisión de 10 metros. Esto es, cuando el nodo móvil logra llegar a una posición en el área que lo separa 10 m máximo respecto al nodo destino. En esta figura se observa que el mejor desempeño fue obtenido cuando el nodo móvil usa movimientos de 20 metros entre cada punto de muestreo, mientras el peor desempeño corresponde a 30 metros. Cuando se usan movimientos de 30 metros, se encontró que el nodo móvil algunas veces se movió sobre el área de destino (un círculo con 10 metros de radio) entre los puntos de muestreo (recordemos que en nuestro algoritmo el nodo móvil no toma mediciones cuando se está moviendo sino hasta el siguiente punto de muestreo). Sorprendentemente, usando movimientos de 20 metros se obtuvo un mejor desempeño comparado con 10 metros. Se cree que esto sucede porque con movimientos de 10 metros se realizan más paradas intermedias durante el guiado, donde las mediciones de ruido pueden confundir al algoritmo de guiado, opuesto a usar movimientos de 20 metros.

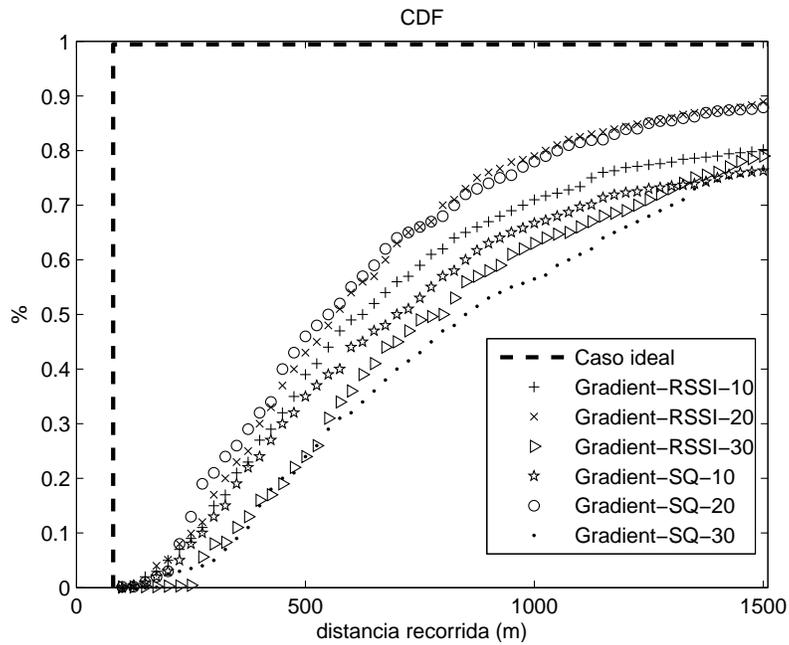


FIGURA 2.14: Gráficas de las CDFs de GUIDE-gradient con 10 metros de precisión

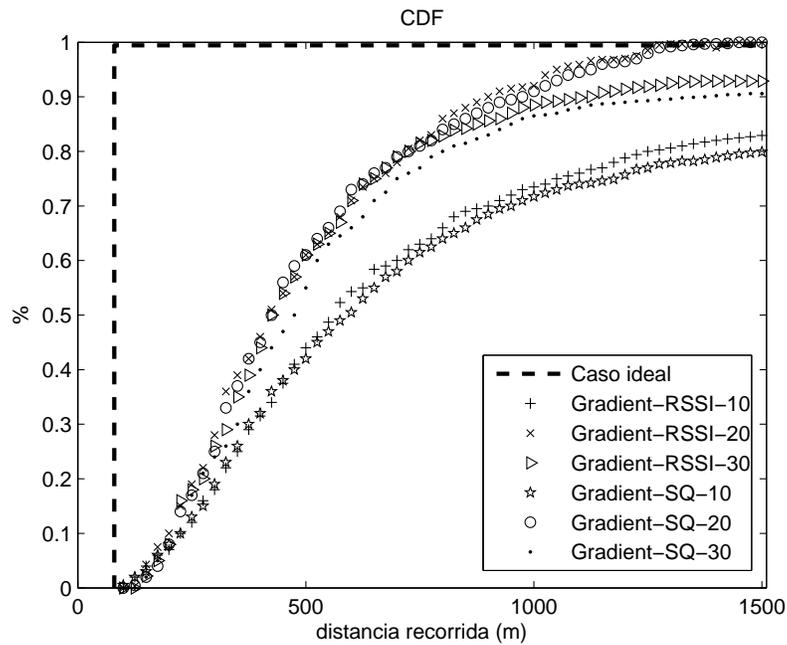


FIGURA 2.15: Gráficas de las CDFs de GUIDE-gradient con 20 metros de precisión

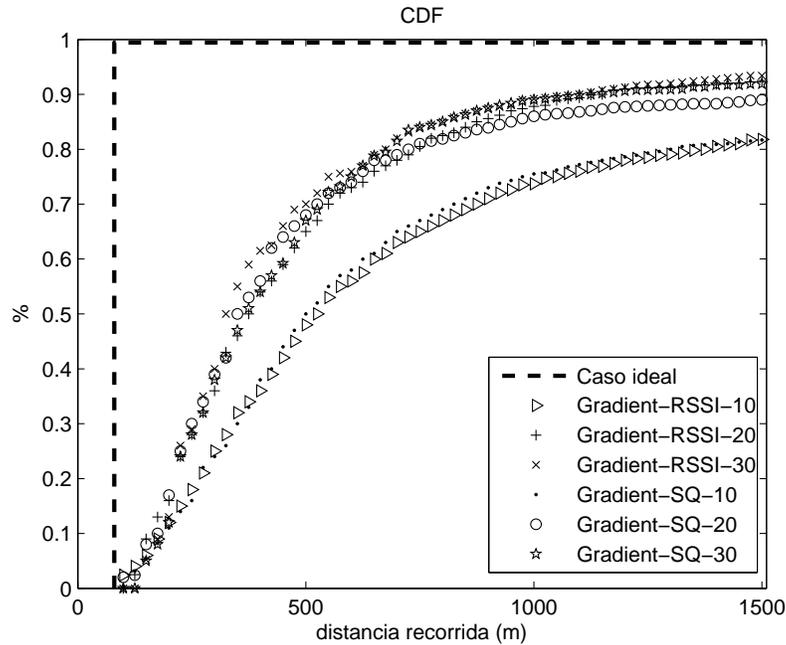


FIGURA 2.16: Gráficas de las CDFs de GUIDE-gradient con 30 metros de precisión

En la figura 2.15 el área de destino es más grande comparada con la figura 2.14 (un círculo con 20 metros de radio). Las curvas que corresponden a usar GUIDE-gradient con movimientos de 20 metros obtuvieron nuevamente el mejor desempeño. Las curvas correspondientes a 30 metros obtuvieron mejor desempeño comparado con la figura 2.14. Creemos que esta situación ocurre principalmente debido a que el nodo móvil sale menos frecuentemente de la zona de destino durante sus movimientos comparado con la figura 2.14.

En la figura 2.16 se incrementó el área de destino a un círculo de 30 metros de radio. En esta figura las curvas de movimientos de 20 y 30 metros obtuvieron el mejor desempeño, mientras las curvas con movimientos de 10 metros obtuvieron el peor desempeño.

Observando las figuras 2.14, 2.15 y 2.16 se concluye que usando movimientos de 10 metros en GUIDE-gradient con SQ y RSSI no suele ser una buena opción. Esto sucede porque de punto a punto, puede que no haya suficiente variabilidad del parámetro que se está midiendo. Esto, a su vez, creará más triángulos en el guiado donde el nodo móvil

pierde tiempo. Del mismo modo, el desempeño de guiado usando movimientos más grandes mejora a medida que el área de destino se vuelve similar o mayor en tamaño que la distancia que el nodo móvil recorre entre cada punto de muestreo.

## 2.6. Consideraciones para GUIDE-gradient

Hay un número de consideraciones que deben tomarse en cuenta para un correcto funcionamiento de GUIDE-gradient en algunas situaciones prácticas. En particular, las siguientes situaciones son consideradas en este sistema.

Como se explicó en la operación de GUIDE-gradient, los nodos móviles siempre se mueven a lo largo de trayectorias rectilíneas de acuerdo con las instrucciones dadas por el sistema. En áreas abiertas, esto puede no ser una tarea difícil de cumplir, sin embargo, en zonas semi-abiertas, los obstáculos podrían no permitir a un usuario moverse a lo largo de la trayectoria deseada. Por ejemplo, puede suceder que un nodo móvil se encuentre con una pared y que sea obligado a moverse a un lado. Si el nodo se mueve en una trayectoria diferente a la especificada por el sistema claramente se engaña al sistema, ya que la ubicación calculada por el sistema y la ubicación real del usuario serán diferentes. En tales casos, es necesario que el usuario tenga una forma de decirle al sistema la trayectoria que está usando realmente.

En GUIDE-gradient esto se resuelve usando la interfaz gráfica para el usuario mostrada en la figura 2.12. Cuando un obstáculo bloquea la trayectoria deseada del usuario, el usuario debe detenerse, seleccionar la opción de reajuste (Reset) y visualmente seleccionar una nueva trayectoria. La opción Reset tiene el efecto de reiniciar el proceso de guiado, eliminando de la memoria los movimientos anteriores. En la figura 2.17 se muestra un ejemplo de esta situación cuando después de alcanzar el punto 3, un obstáculo no permite que un usuario pueda seguir avanzando según lo indicado por el algoritmo. En ese momento el usuario se detiene, restablece el algoritmo con la opción Reset y luego comienza a moverse a lo largo de una trayectoria elegida aleatoriamente. En la figura 2.17 la sucesión de puntos de 1' a 3' y la sucesión de puntos de 1'' a 12'' corresponden a dos separados e independientes intentos para que el nodo móvil alcanzara al nodo destino.

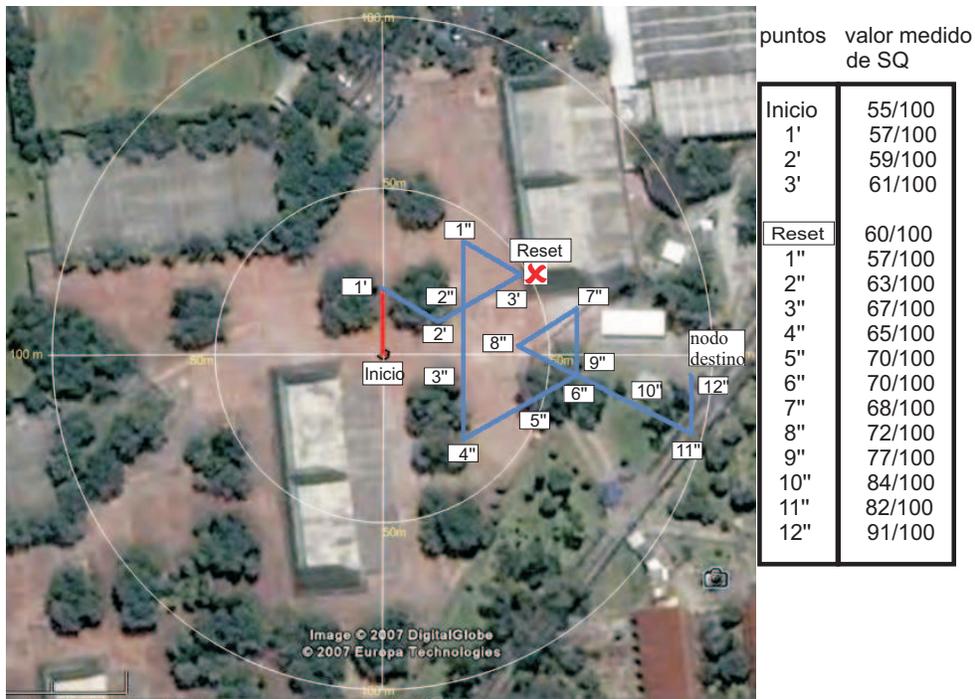


FIGURA 2.17: Ejemplo de GUIDE-gradient donde un obstáculo no permite continuar con la trayectoria deseada

Otra situación tiene que ver con lo que sucede si durante el proceso de guiado un usuario móvil pierde la conexión con el nodo destino por haberse movido fuera del rango de transmisión de éste. Esta situación será un caso común cuando el usuario móvil se encuentra en el borde del rango de transmisión del nodo destino. En este caso tomamos una solución simple donde el usuario móvil debe volver al punto anterior donde todavía podía recibir la señal del nodo destino.

### 2.6.1. Convergencia

Durante los experimentos y simulaciones de GUIDE no se presentaron casos donde se generaran bucles (loops) en la trayectoria de un usuario móvil, pero esta posibilidad no puede descartarse. La formación de bucles es posible debido a la presencia de obstáculos en el área de cobertura de un nodo destino y podrían ocasionar que un usuario móvil se mueva únicamente en una determinada área sin alcanzar nunca al nodo destino. Para solucionar este problema proponemos que GUIDE genere un sistema de coordenadas relativas donde se asignen coordenadas  $(x,y)$  a cada punto de visitado por un nodo móvil

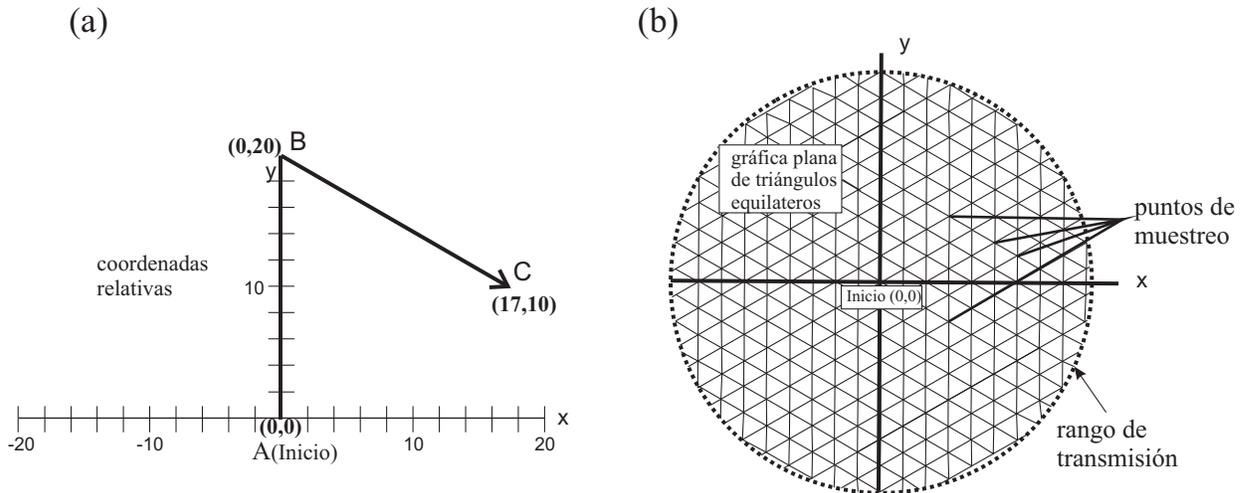


FIGURA 2.18: Coordenadas virtuales y gráfica plana de triángulos equiláteros que forman los puntos de muestreo usando GUIDE

(puntos de muestreo). El sistema de coordenadas relativas puede generarse si al principio del guiado se toma en cuenta que las coordenadas  $(0,0)$  y  $(0,20)$  se refieren al primero y al segundo punto de muestreo, respectivamente. Para el segundo punto de muestreo se considera que el valor de la coordenada  $y$  es igual a 20 porque la distancia entre puntos de muestreo es de 20 metros. En caso de que esta distancia sea otra (como fue el caso de 10 y 30 metros en las simulaciones), se considerará ese valor en la coordenada  $y$  del segundo punto de muestreo. En la figura 2.18(a) podemos observar cómo se aplica el criterio anterior en los puntos de muestreo  $A$ ,  $B$  y  $C$ , que corresponden al primero, segundo y tercer punto de muestreo visitado por un nodo móvil, respectivamente. En esta figura partiendo del punto  $B$  el nodo móvil realizó un giro de  $120^\circ$  y avanzó 20 metros hasta llegar al punto  $C$ . Según el sistema de coordenadas relativas al punto  $C$  le corresponden las coordenadas relativas  $(17,10)$ . Las coordenadas de cualquier otro punto visitado pueden ser calculadas sabiendo la orientación y módulo del vector de desplazamiento que se genera cuando el usuario móvil realiza un movimiento.

Por otro lado, en la figura 2.18(b) observamos como la posición de “Inicio” de un usuario móvil define el centro de un círculo cuya circunferencia está definida por el rango de transmisión de este usuario. Según la distribución espacial que tienen los puntos de muestreo durante el uso de GUIDE-gradient (ver figura 2.10), en dicho círculo puede definirse una gráfica plana de triángulos equiláteros (que llamaremos gráfica de entorno) cuyos vértices y lados de cada triángulo representan posibles puntos de muestreo y vectores de desplazamiento, respectivamente. Llevando un historial de las coordenadas

relativas de los puntos de muestreo que el usuario móvil visita dentro de su gráfica de entorno es posible identificar la formación de un loop cuando una secuencia de coordenadas se repita en el historial de coordenadas que se lleve de estos puntos. De esta manera, cuando un loop sea detectado, GUIDE-gradient hará uso de un nuevo criterio de movimiento que indicará al usuario moverse fuera de la zona del loop hacia una zona no antes visitada en la gráfica de entorno. Como el nodo destino se encuentra en algún punto dentro de la gráfica de entorno y el usuario móvil se mueve en zonas diferentes dentro de esta gráfica, se asegura que eventualmente el nodo destino será encontrado, aún cuando el nodo móvil tenga que visitar en su totalidad el área de entorno en el peor de los casos.

## 2.7. Guiado nodo a nodo en redes ad-hoc

En esta sección se analiza cómo un sistema de guiado se puede generalizar a sistemas ad-hoc multisaltos. Similar a la tecnología WLAN, hasta el momento no ha habido muchas investigaciones relacionadas con guiado de usuarios en las redes ad-hoc. En estas redes puede haber varios nodos intermedios, trabajando como retransmisores o relevos en el camino de comunicación entre el nodo móvil y el nodo de destino. La figura 2.19 ilustra un ejemplo de una ruta multisaltos involucrando dos nodos intermedios. Si bien el problema de guiado en redes ad-hoc multisaltos puede parecer mucho más complejo que un problema WLAN (un solo salto) que hemos estado estudiando, puede ser fácilmente resuelto si dividimos el problema multisaltos en varios problemas de un solo salto. Asumiendo que un protocolo de enrutamiento puede encontrar una ruta entre el móvil y los nodos destino, el nodo móvil sólo tiene que acercarse al primer nodo de la ruta (el nodo A en la figura 2.19) utilizando GUIDE-gradient. Una vez alcanzado el primer nodo en la ruta, el nodo móvil ahora está más cerca del segundo nodo y así sucesivamente hasta finalmente alcanzar el nodo destino.

En un contexto multisaltos, el nodo móvil sólo tiene que ser consciente de las identidades (es decir, direcciones IP o MAC) de los nodos intermedios en la ruta a medida que se acerca al nodo destino. La mayoría de los protocolos de enrutamiento para redes ad-hoc proporcionan dicha información de diferentes maneras. Por ejemplo, el protocolo de enrutamiento DSR [30] incluye la lista completa de los nodos que cada paquete debe

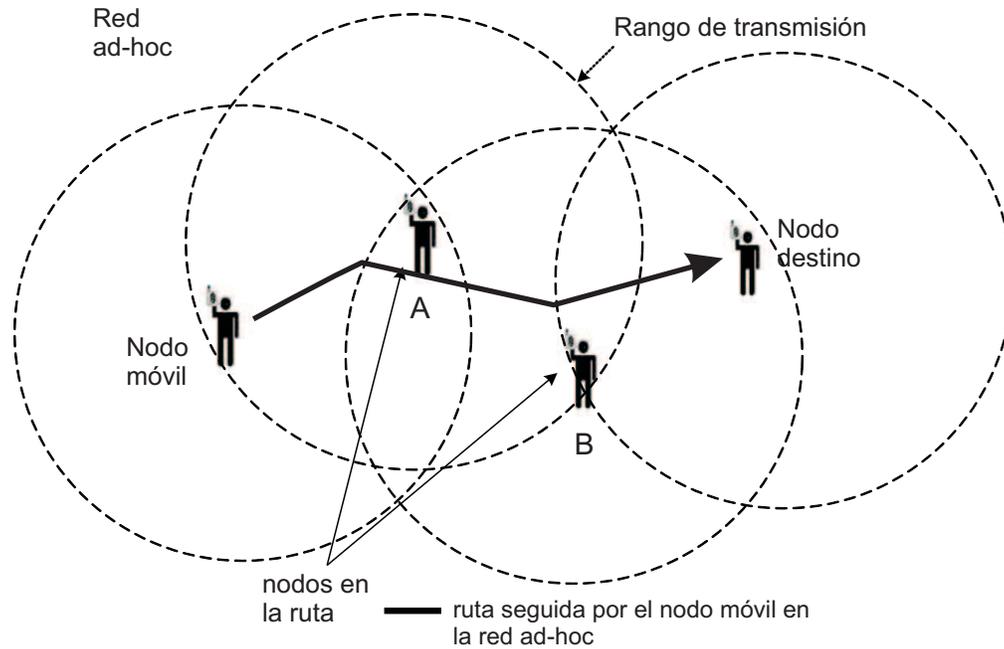


FIGURA 2.19: Guiado de usuarios en un ambiente multisaltos.

visitar a medida que este viaja del nodo origen al nodo destino. Protocolos basados en vectores de distancia (por ejemplo, AODV [31]) no proporcionan la lista completa de los nodos intermedios en las rutas, pero cada nodo intermedio tiene conocimiento de la identidad del siguiente nodo en la ruta. Sin embargo, este problema puede ser resuelto de varias maneras incluyendo agregar señalización extra o por medio de escuchar el tráfico y calcular qué nodo está transmitiendo paquetes hacia qué nodo.

## 2.8. Conclusiones del capítulo

Con base en el estudio aquí desarrollado sobre el comportamiento de algunos parámetros relacionados al estado del canal inalámbrico en ambientes en exteriores, se encontró que los valores medidos de RSSI y SQ presentan mucha variabilidad en distintos puntos de medición, aún cuando estas mediciones se hagan en puntos que están separados por una distancia corta (3-5 metros). Este hecho es de gran ayuda para funciones de guiado ya que cuando un móvil realiza mediciones de estos parámetros y se presentan cambios en los valores obtenidos, es posible diferenciar un punto de medición de otro y obtener información nueva de en qué dirección se desplazó el móvil.

La propuesta de guiado aquí presentada basa su funcionamiento en el estudio antes mencionado sobre la variabilidad de RSSI y SQ en exteriores. Esta propuesta llamada GUIDE calcula un gradiente local en la vecindad de un nodo móvil que tiene una conexión WiFi con un nodo destino. El vector gradiente resultante de este cálculo apunta hacia la máxima variabilidad del parámetro usado lo que permite conocer la dirección de movimiento que debe tomar el nodo móvil para llegar al nodo destino. Durante la fase de implementación de GUIDE se utilizó un proceso de cuantificación que permite sintetizar en un sólo vector aquellos vectores gradiente que pertenecen a una misma región. Este hecho simplifica los cálculos de la dirección resultante de un vector gradiente y permite definir instrucciones de guiado mucho más fáciles de seguir para los usuarios.

Durante las pruebas de GUIDE en un área en exteriores se observó que la existencia de máximos locales de valores de RSSI o SQ en el área de cobertura de un nodo destino puede ocasionar que la dirección estimada, dada por un vector gradiente, no apunte siempre hacia la ubicación de este nodo destino. Se observó que calcular nuevamente un vector gradiente en puntos de muestreo uniformemente distribuidos en el área y no antes visitados, ayuda a corregir y encontrar la dirección hacia el nodo destino. Concluimos que entre mayor sea la densidad de obstáculos en la zona de guiado mayor será el número de veces que sea necesario recalcularse el vector gradiente.

## Capítulo 3

# Conectividad física en redes WLAN 802.11 en interiores usando movilidad

En este capítulo un aspecto diferente de conectividad es presentado llamado conectividad física, el cual definimos como la condición de existencia de caminos físicos donde los nodos de una red pueden alcanzar físicamente a otros nodos, no sólo a través de espacios abiertos, sino también a través de caminos donde sea necesario recorrer pasillos, cruzar puertas, atravesar habitaciones, etc. Consideramos que el conocimiento de conectividad física es un factor clave para el desarrollo de nuevas aplicaciones como, localización, encaminamiento físico y guiado nodo a nodo. A continuación detallamos el concepto de conectividad física y su problema de detección entre usuarios.

### 3.1. Conectividad física

Muchas de las aplicaciones que existen en las redes inalámbricas como son la detección de intrusos [32], localización [33], monitoreo [34], entre otras, requieren información de proximidad para trabajar apropiadamente, entendiendo por proximidad como una condición que establece qué tan lejos o cerca están dos nodos el uno del otro. El uso de

información de proximidad, por ejemplo, puede permitir que un nodo móvil sea localizado dentro de una WLAN conociendo su proximidad con otros nodos cuya localización es conocida [35]. En redes inalámbricas de sensores, las mediciones de un sensor pueden ser correlacionadas en el dominio del espacio si se cuenta con información de proximidad de otros sensores desplegados en la misma región.

Con el fin de estimar proximidad o distancia entre nodos, varias técnicas han sido propuestas en la literatura usando varios métodos de estimación. Estos métodos son usualmente clasificados en libres de estimación de distancias (*range-free*) y basados en estimación de distancias (*range-based*), éstos últimos fueron revisados en la sección 2.1.2. Los métodos *range-free* están basados en esquemas de proximidad y conectividad. Por ejemplo, se dice que existe una cercanía entre dos nodos siempre y cuando uno esté dentro del rango de transmisión del otro. Aunque la precisión de los métodos *range-free* puede incrementarse usando técnicas de trilateración [36], su precisión es menor que la obtenida por los métodos *range-based*. Sin embargo, para ambos tipos de métodos su rendimiento usualmente es afectado por obstáculos, lo cual afecta la libre propagación de las ondas de radio en mayor medida en ambientes en interiores ocasionando efectos como atenuación, difracción y reflexión. Como resultado de estos problemas de propagación se producen errores en la estimación de distancias y localización. Adicional a estos problemas, podemos decir que cualquier método *range-based* o *range-free*, aun haciendo una estimación precisa de la distancia que existe entre dos nodos, no puede determinar si éstos pueden alcanzarse mediante el recorrido de algún camino físico en presencia de obstáculos. En algunos casos, el uso de técnicas de detección de condiciones de línea de vista (LOS) podría ayudar en gran medida a determinar la conectividad física entre nodos. Sin embargo, en esta tesis consideramos que la conectividad física entre nodos debe de ir más allá de la existencia de condiciones de LOS, permitiendo a los nodos acercarse a otros nodos a través de un camino disponible en el inmueble. Por lo tanto, concluimos que es difícil para estos métodos determinar si existe conectividad física entre nodos usando únicamente mediciones de una señal inalámbrica (ver la figura 1.2 como un ejemplo).

Como se ya se ha comentado, para las redes inalámbricas en interiores la existencia de conectividad física entre usuarios es un factor clave para desarrollar guiado nodo a nodo. Por ejemplo, caminos libres de obstáculos pueden ser descubiertos de una gráfica de conectividad de radio en una WLAN para guiar a los usuarios dentro de un edificio.

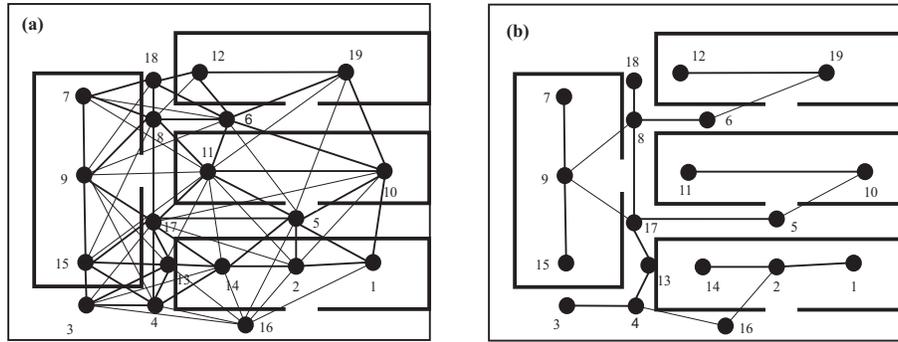


FIGURA 3.1: Gráfica de conectividad de una red WLAN en interiores (a), Gráfica de conectividad física (b)

En espacios amplios como aeropuertos o centros comerciales, la conectividad física puede permitir a los usuarios a deducir el mapa del lugar y encontrar las rutas de evacuación de emergencia.

La figura 3.1.a muestra una gráfica típica de conectividad de radio WiFi donde los rectángulos en negro representan las habitaciones de un área en interiores. La discontinuidad en el perímetro de cada rectángulo representa la puerta disponible de cada habitación, mientras que las separaciones entre rectángulos representan los pasillos del área. Los nodos (representados con pequeños círculos) están conectados con otros nodos siempre que estén dentro de su rango de transmisión. En esta figura, por ejemplo, para que el nodo 3 se comuniqué con el nodo 1 se necesita una ruta por varios nodos intermedios trabajando como retransmisores, también conocida como ruta multisaltos. Se dice que dos nodos están conectados entre ellos siempre que existe una ruta que los conecta. La figura 3.1.b, por otro lado, muestra una gráfica de conectividad física del mismo escenario en interiores de la figura 3.1.a. Como podemos ver en la figura 3.1.b, una gráfica de conectividad física puede ser obtenida de la gráfica de la figura 3.1.a al seleccionar aristas que representan un camino físico donde es posible desplazarse y llegar de un nodo a otro. Similar al ejemplo de la ruta multisaltos de la figura 3.1.a, también existe el concepto de encaminamiento por conectividad física. Esto es, para que el nodo 3 llegue al nodo 1, primero deberá alcanzar al nodo 4, después alcanzar al nodo 16, después alcanzar al nodo 2, y finalmente alcanzar al nodo 1.

A continuación se discuten algunos métodos encontrados en la literatura relacionados con la detección de proximidad física y condiciones de LOS en redes inalámbricas.

## 3.2. Trabajo relacionado con conectividad

El problema de conectividad física considerado en este capítulo está relacionado principalmente a tres áreas en redes inalámbricas llamadas enrutamiento, localización y proximidad. Algunos trabajos relevantes y relacionados con estas áreas son revisados a continuación.

### 3.2.1. Enrutamiento

El enrutamiento es un término usado tradicionalmente en redes ad-hoc que se refiere a la habilidad de los nodos para comunicarse con otros nodos directamente o a través de otros nodos que tienen la función de retransmisores. La información de enrutamiento es útil para conocer si algunos nodos están aislados del resto de la red y para determinar la mejor ruta para enviar paquetes de un nodo origen a un nodo destino [37]. El concepto de detectar conectividad discutido en esta tesis, sin embargo, es diferente al término de enrutamiento tradicional usado en redes ad-hoc. En esta tesis se considera que detectar conectividad física o enrutamiento físico, es la habilidad de los nodos para identificar caminos físicos que les permitan desplazarse y alcanzar a otros nodos en la red. Sin embargo, aunque diferentes en significado y operación, hay aspectos que hacen similares al enrutamiento en redes ad-hoc y el enrutamiento físico. Por ejemplo, el enrutamiento físico muestra el mejor camino físico para que dos nodos se alcancen el uno al otro. De manera similar, una forma de modelar una ruta física es indicando las identidades de los nodos encontrados a lo largo de la ruta física, parecido a una ruta tradicional en enrutamiento multisaltos en redes ad-hoc. Sin embargo, el propósito de tener nodos intermedios en una ruta física es solamente proveer pistas para que un nodo en movimiento encuentre estos nodos en condiciones de LOS y saber así que se está moviendo a lo largo del camino correcto hacia un nodo destino. En nuestro conocimiento no existen trabajos en la literatura que traten con enrutamiento físico, que se considera como un factor clave para desarrollar futuras aplicaciones como guiado en interiores.

### 3.2.2. Localización

Otra área relacionada al problema de conectividad física que se trata en este capítulo es localización. Como se mencionó anteriormente, los sistemas de localización pueden ser clasificados como *range-based* o *range-free*. Ambos tipos implican usar modelos de propagación o técnicas de triangulación o lateración para estimar la posición de un nodo. Sin embargo, la desventaja de los sistemas de localización basados en métodos *range-based*, por un lado, es que pueden exhibir inexactitudes extremas debido problemas de propagación de la señal. Por otro lado, los sistemas basados en métodos *range-free* dependen de condiciones de conectividad [38, 39] y la mayoría de ellos requieren que algunos nodos sean colocados en posiciones conocidas (anclajes) con el fin de establecer un sistema de coordenadas de referencia que establezca posiciones absolutas para el resto de los nodos. Si el número de saltos que separan un par de nodos se puede determinar usando estos puntos de anclaje, entonces un conjunto de estimaciones de distancias puede ser generado. Dado este conjunto de distancias, la ubicación de un nodo se puede resolver utilizando métodos analíticos. Un ejemplo de sistemas de localización *range-free* que utilizan puntos de anclaje son los que usan técnicas de huellas digitales (conocidos como fingerprint). Estos sistemas se basan en el pregrabado de información de RSSI de múltiples estaciones base que proporcionan un mapa de propagación asociado a puntos físicos dentro de un área de interés [40]. Sin embargo, como también ya se comentó, aún si métodos *range-based* y *range-free* pueden establecer la ubicación de los nodos dentro de una red inalámbrica en interiores, éstos no pueden identificar la disponibilidad de camino físico o ruta entre ellos.

### 3.2.3. Proximidad

Otra área relacionada a la conectividad física es la proximidad. Proximidad es un término usualmente asociado por una función que satisface una condición geométrica particular. La métrica de proximidad más usada en la literatura es la distancia Euclidiana entre dos puntos. Un método común para detectar proximidad es que un nodo detecte quién está dentro de su rango de transmisión, que se refiere a una situación donde dos nodos pueden intercambiar información directamente sin requerir nodos intermedios [41]. Sin embargo, aunque relacionados, los métodos de proximidad no pueden decir si hay un

camino físico que conecta dos nodos. La única área que se ocupa de este problema es el trabajo relacionado con el descubrimiento de condiciones de línea de vista en enlaces inalámbricos. Esto es, cuando el enlace que conecta a dos nodos tiene condiciones de LOS, significa básicamente que los dos nodos pueden verse entre sí y se encuentran en el mismo espacio (por ejemplo, habitación, oficina, laboratorio, corredor etc.) Hay varios trabajos en la literatura relacionados con el problema de descubrir condiciones de LOS. A continuación mencionaremos algunos de ellos.

Las comunicaciones por infrarrojo se han usado comúnmente para detectar si un enlace presenta condiciones de LOS o no. Este tipo de comunicaciones requieren que el transmisor y el receptor se encuentren en la misma habitación de manera que la señal de infrarrojo pueda alcanzar al receptor [42]. Generalmente, cualquier obstáculo puede ser detectado cuando un enlace de infrarrojo se pierde debido a que una señal de infrarrojo no puede penetrar materiales como concreto, madera, acero y ladrillo. En [43] los autores proponen un método de localización donde un robot se mueve autónomamente usando estaciones bases equipadas con chips de radiofrecuencia y leds infrarrojos. Un inconveniente de este método es la dependencia de usar infraestructura dedicada y hardware específico para trabajar apropiadamente. Otros métodos para detectar enlaces con condiciones de LOS están basados en enfoques estadísticos. En [44], múltiples estaciones base fueron desplegadas en un área para definir la distribución estadística de mediciones de ToA en LOS entre un nodo móvil y las estaciones base. Con estos estudios nuevas mediciones de ToA pueden ser comparadas con la distribución estadística de ToA en LOS con el fin de establecer si tienen condiciones de LOS o no. Esta metodología es aplicada generalmente para detectar nodos móviles a través de una ruta parcialmente obstruida (conocida como near-line-of-sight, NLOS), bajo la premisa que las métricas de una señal inalámbrica como mediciones de ToA y RSSI varían más en condiciones de NLOS que en LOS. El principal inconveniente de los enfoques estadísticos es la necesidad de pre estudiar el comportamiento de la propagación de la señal en el área de interés. Explorar si una señal de radio puede ser modelada por una distribución conocida es otra manera de abordar el problema de detección de LOS. En [45], las variaciones de RSSI sobre condiciones de LOS son descritas por una distribución de Rice. Los autores en [46] proponen detectar condiciones de LOS en ambientes celulares mediante el uso del factor de estimación de la distribución Rice. En [47], las condiciones de NLOS son modeladas usando una distribución de Rayleigh. Sin embargo, los resultados presentados en

[48] muestran que para frecuencias menores a 4 GHz en ambientes en interiores y bajo condiciones de LOS, la amplitud de una señal puede ser modelada con una distribución Rice o una Rayleigh. Así este método no puede ser usado en frecuencias como 2.4 GHz (802.11b/g) para diferenciar entre condiciones de LOS y NLOS. Por el contrario, el estudio desarrollado en [49] concluye que la distribución de mediciones de RSSI es difícil asociarla a una distribución definida en ambientes en interiores. Más aún, incluso si los métodos para detectar condiciones de LOS pudieran descubrir la conectividad física, lo harían sólo en los casos donde los nodos pueden verse directamente. En este trabajo consideramos que la conectividad física debe detectarse más allá de la existencia de condiciones de LOS, permitiendo a los nodos llegar a otros nodos a través de cualquier ruta disponible.

En resumen, los métodos de enrutamiento, localización y proximidad proporcionan información sobre la ubicación de los nodos y algunas pistas sobre si éstos están ubicados o no en la misma habitación, pero no pueden establecer si existe un camino físico que conecte cualquier par de nodos ubicados en habitaciones diferentes, y mucho menos establecer cuál es la mejor ruta física o vía de conexión entre ellos, así como proporcionar los medios para avanzar a lo largo de tales trayectorias. El método de detección de proximidad que a continuación se presenta, y que es llamado PhyCon, llena estos vacíos introduciendo un criterio de movilidad (PhyCon-Mobility) de manera que los nodos móviles sean capaces de detectar temporalmente sus propias condiciones de LOS con nodos estáticos mediante el uso de un rango de valores de RSSI, así como el descubrimiento de rutas físicas entre nodos estáticos considerando el intervalo de tiempo entre detecciones consecutivas de LOS con nodos estáticos. Más importante aún, PhyCon logra estos objetivos mediante el comportamiento normal de movilidad de los nodos que se presenta en redes inalámbricas en interiores. PhyCon representa una forma simple y eficiente para descubrir rutas de conectividad física entre nodos inalámbricos en ambientes en interiores que pueden desencadenar una serie de nuevas aplicaciones incluyendo guiado.

### 3.3. PhyCon

En esta sección se describe PhyCon, un método basado en movilidad capaz de descubrir caminos con conectividad física entre nodos estáticos en redes inalámbricas en interiores. PhyCon está compuesto de dos principales componentes que son detección de línea de vista (LOS) y detección de caminos con conectividad física (*PCP*). A continuación cada componente va a ser explicado a detalle.

#### 3.3.1. Detección de condiciones de LOS

En esta sección se describe un conjunto de experimentos con el fin de determinar un rango de valores de RSSI para detectar condiciones de LOS entre un nodo móvil y uno estático. El uso de este rango va a ser usado en la sección 3.3.2 por PhyCon para descubrir conectividad física entre nodos estáticos. Como se verá después, este método permite a PhyCon descubrir un alto porcentaje de caminos con conectividad física usando el comportamiento normal de movilidad de los usuarios en una red WLAN en interiores.

Hay varios modelos de propagación de radio que describen el comportamiento de una señal en diferentes entornos donde ésta se propaga. En general, el valor de RSSI disminuye a medida que la distancia entre nodos se incrementa. En ambientes en interiores donde existen paredes, mobiliario, puertas y otros obstáculos, podemos esperar que un enlace inalámbrico alcance su valor de RSSI máximo cuando la distancia entre los nodos es la más corta y no existan obstáculos presentes, siendo éste un caso de condiciones de LOS que va a ser considerado el resto de este capítulo. Similarmente, un valor máximo de RSSI también puede ser alcanzado cuando la distancia entre nodos sea la más corta posible aún cuando la señal de radio se propague a través de un camino bloqueado por obstáculos. A este último caso se le considera como condiciones de NO-LOS, el cual difiere de NLOS al no existir condiciones parciales de LOS. Con el fin de definir el rango de valores de RSSI en condiciones de LOS y diferenciar éste de condiciones NO-LOS se analiza el comportamiento de valores de RSSI entre nodos móviles y estáticos bajo condiciones LOS y NO-LOS en escenarios en interiores. Para el desarrollo de los experimentos dos lugares fueron seleccionados: el tercer piso del Instituto de Investigación en Matemáticas Aplicadas y Sistemas (IIMAS) y un edificio de laboratorios, ambos localizados en las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM,

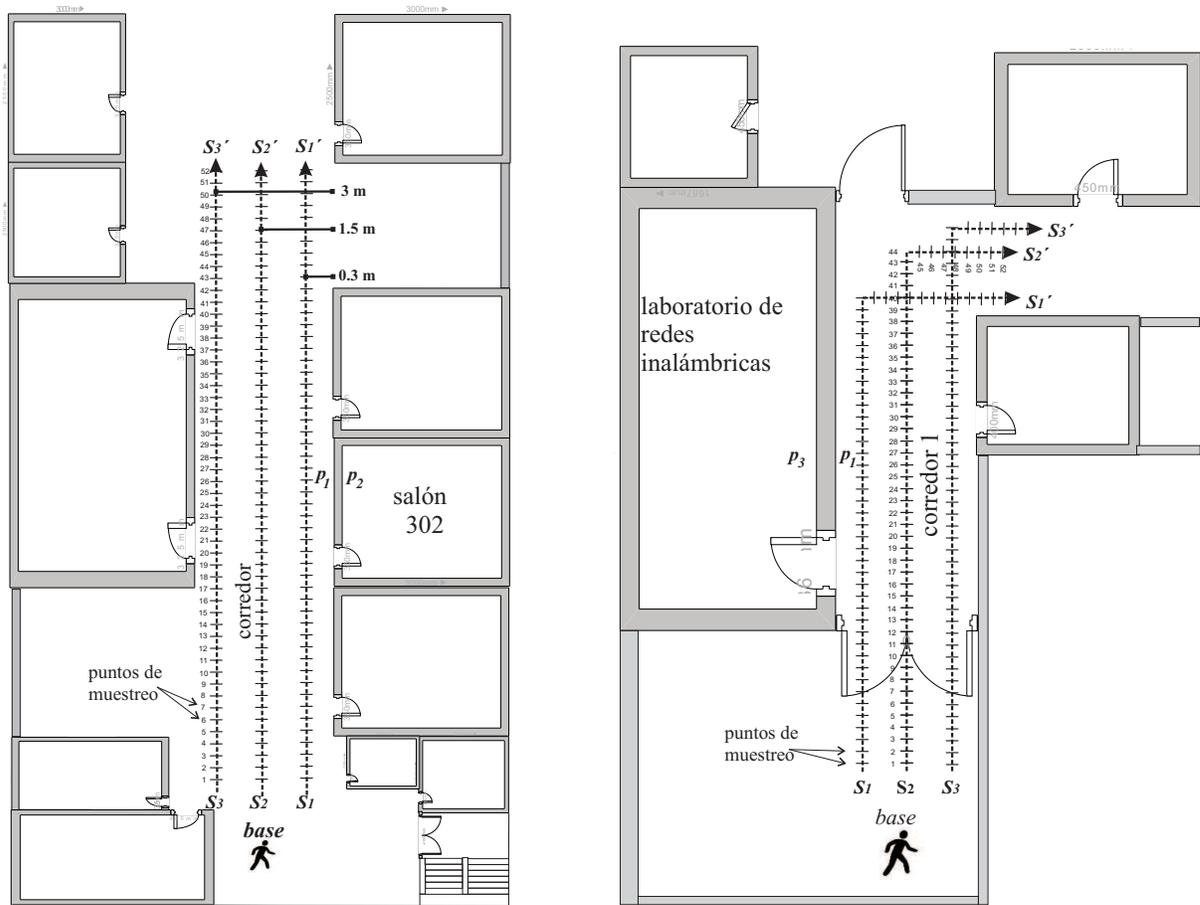
Ciudad Universitaria). Estos edificios representan escenarios típicos en interiores donde dos tipos de paredes utilizados comúnmente en construcciones son encontradas: pared falsa (panel hecho de yeso) y pared de ladrillo.

Para ilustrar las condiciones de LOS de un enlace, se utilizó el esquema mostrado en la figura 3.2.a donde se observa el plano del tercer piso del edificio del IIMAS. En este esquema un nodo móvil (una persona cargando una laptop) fue colocado en el punto marcado como *base* localizado en el corredor. Por otro lado un nodo estático fue colocado en el punto  $p_1$ , donde existe línea de vista entre ambos nodos. Para representar condiciones de NO-LOS se consideraron dos casos: a) un camino bloqueado por paredes falsas y b) un camino bloqueado por paredes de ladrillo. El esquema para paredes falsas es similar al descrito para condiciones de LOS, con la única diferencia que el nodo estático fue colocado en el punto marcado como  $p_2$ , dentro del salón 302. La pared de este salón es una pared falsa de 60 mm de grosor. Para representar condiciones de NO-LOS usando paredes de ladrillo usamos el tercer piso del edificio de laboratorios. El mapa de este piso se muestra en la figura 3.2.b donde se colocó un nodo estático en el punto marcado como  $p_3$ . La pared entre el laboratorio y el corredor, marcado como “corredor 1”, es una pared de ladrillo de 160 mm de grosor. Un nodo móvil fue colocado en el punto marcado como “base”. Los puntos  $p_2$  y  $p_3$  representan dos casos donde la distancia entre la trayectoria de un nodo móvil y la ubicación de un nodo estático en condiciones de NO-LOS es la más corta.

Con el fin de estudiar las posibles trayectorias que un nodo móvil puede seguir a través del corredor seleccionado, se consideraron tres trayectorias en cada caso. Estas trayectorias son  $S_1 \rightarrow S_1'$ ,  $S_2 \rightarrow S_2'$ , and  $S_3 \rightarrow S_3'$ , marcadas por líneas punteadas en las figuras 3.2.a y 3.2.b. La distancia recorrida por el nodo móvil a lo largo de cada trayectoria fue aproximadamente de 52 m.

Debido a que diferentes dispositivos 802.11 comerciales pueden mostrar variabilidad mientras realizan mediciones de parámetros de una señal de radio, cuatro dispositivos comerciales equipados con diferentes chipsets 802.11 fueron usados para los experimentos:

- Laptop Dell Inspiron equipada con un chip Intel PRO/Wireless 3945ABG 802.11g.
- Laptop Sony Vaio equipada con un chip Atheros AR9285 802.11g.



a) Esquema planteado para los experimentos dentro del edificio del IIMAS (LOS y pared falsa)      b) Esquema planteado para los experimentos dentro del edificio de laboratorios (pared real)

FIGURA 3.2: Esquema de experimentos realizados para determinar el rango *LOS-RSSI*

- Laptop Hp Mini 1101 equipada con un chip Ralink RT2500 802.11g.
- Punto de acceso Cisco Broadband Router equipado con un chip Broadcom BCM5352 802.11g.

Se consideraron cuatro combinaciones entre un nodo móvil y uno estático involucrando los dispositivos antes mencionados de la siguiente manera: Para la primera y segunda combinación, una persona cargando la laptop Dell Inspiron fue usada como nodo móvil, y el punto de acceso Cisco Broadband Router y la laptop Sony Vaio como nodos estáticos, respectivamente. Para la tercera y cuarta combinación, una persona cargando la laptop HP Mini 1101 fue usada como nodo móvil, y el punto de acceso Cisco Broadband Router y la laptop Sony Vaio como nodos estáticos, respectivamente. Para cada combinación, se

consideraron condiciones de LOS y condiciones de NO-LOS usando pared falsa y pared de ladrillo como se describió anteriormente. Durante los experimentos los nodos móviles enviaron paquetes ICMP de solicitud (del inglés Internet Control Message Protocol) a los nodos estáticos usando el comando ping cada 0.5 segundos.

Para cada combinación entre dispositivos con diferentes chipsets 802.11, el nodo móvil correspondiente recorrió varias veces las tres posibles trayectorias usando una velocidad constante de aproximadamente 1 m/s, siempre empezando desde su punto inicial definido hasta llegar a su punto final definido. El nodo móvil tomó muestras RSSI de los mensajes ICMP de respuesta cada 1 m, aproximadamente, así cada trayectoria tuvo 52 puntos de muestreo. Los valores promedio de RSSI de cada uno de los 52 puntos de muestreo fueron calculados y los resultados se muestran a lo largo de la figura 3.3 con sus respectivos intervalos de confianza del 95 %.

Los resultados en las figuras 3.3.a, 3.3.b, 3.3.c y 3.3.d muestran un incremento en el valor de RSSI a medida que la distancia entre el nodo móvil y el nodo estático se reduce. Como se esperaba, el valor máximo de RSSI es alcanzado cuando la distancia entre el nodo móvil y el nodo estático es la más corta para todas las cuatro combinaciones. Por otro lado, se puede observar que hay un rango de valores de RSSI con condiciones de LOS el cual no puede ser alcanzado por ningún caso en condiciones de NO-LOS (pared falsa o de ladrillo). Este rango es llamado *LOS-RSSI*, y puede ser expresado como  $-34 \text{ dBm} \leq \text{LOS-RSSI}$  para dispositivos 802.11g. Así, la presencia de un valor RSSI medido dentro del rango *LOS-RSSI* permite distinguir entre condiciones de LOS y NO-LOS de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} -34 \text{ dBm} &\leq \text{RSSI}, && \text{condiciones de LOS.} \\ -34 \text{ dBm} &> \text{RSSI}, && \text{condiciones de NO-LOS.} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Un caso especial se puede presentar cuando dos nodos móviles pasen cerca el uno del otro a medida que se mueven en un mismo espacio. Por ejemplo, del esquema mostrado en la figura 3.2.a, si un nodo móvil recorre la trayectoria  $S_1 \rightarrow S_1'$  mientras que un segundo nodo móvil recorre la trayectoria  $S_3' \rightarrow S_3$ , entonces ambos nodos móviles van a considerar erróneamente que el otro nodo es un nodo estático en condiciones LOS.

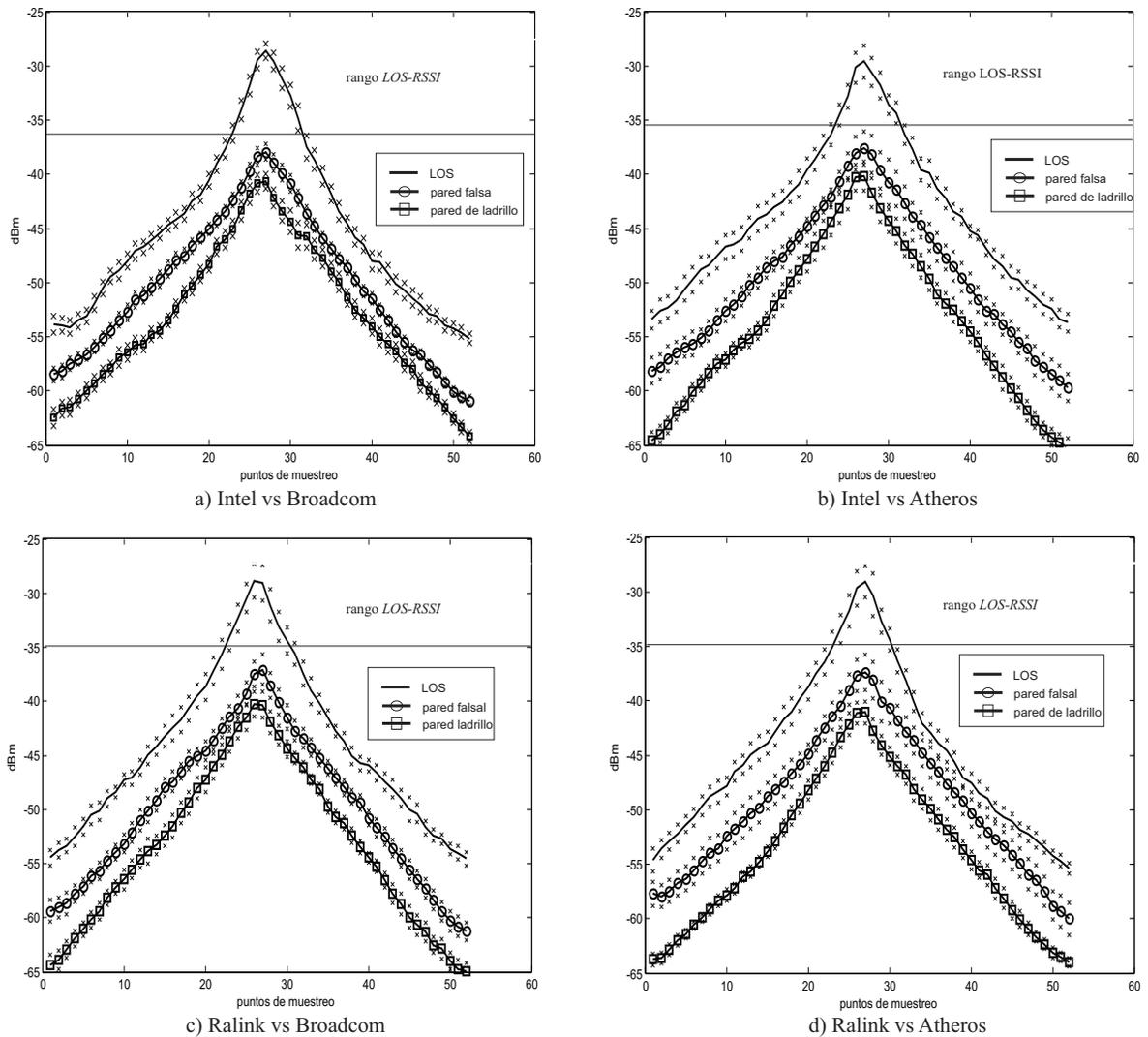


FIGURA 3.3: Valor promedio de mediciones de RSSI hechas bajo condiciones LOS y NO-LOS usando paredes falsas y de ladrillo, a lo largo de trayectorias de 52 puntos de muestreo usando diferentes chips 802.11

Para resolver este problema presentamos el comportamiento de valores de RSSI medidos entre dos nodos que se mueven sobre un mismo corredor, llamado este comportamiento como caso móvil-móvil (ver figura 3.4). Como se puede observar en esta figura, el rango *LOS-RSSI* permanece similar a los casos móvil-estático; lo que cambia sin embargo, es que el tiempo promedio que el rango *LOS-RSSI* es alcanzado es el doble en casos móvil-estático comparado con casos móvil-móvil. Este último comportamiento puede ser usado para eliminar casos móvil-móvil.

Con el fin de estudiar la probabilidad de error (por ejemplo, un enlace que alcanza

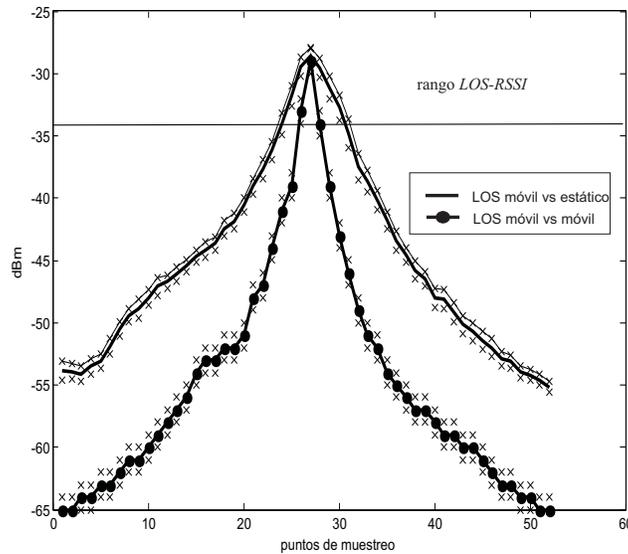


FIGURA 3.4: Experimentos con los casos móvil-estático vs móvil-móvil en condiciones de LOS y NO-LOS

valores RSSI dentro del rango *LOS-RSSI* pero que actualmente está bloqueado por una pared), se obtuvo la función de densidad de probabilidad (PDF) de los valores RSSI máximos que se alcanzaron en cada experimento, ver figura 3.5. En esta figura, se puede observar que la probabilidad de afirmar que un enlace tiene condiciones de LOS cuando en realidad tiene condiciones de NO-LOS es del 10.2%. Como resultado podemos concluir que el uso del rango *LOS-RSSI* es una manera simple y práctica de diferenciar entre condiciones de LOS y NO-LOS para nodos localizados muy cerca el uno del otro en redes WLAN en interiores. El único problema de este método es que un nodo móvil puede no detectar nodos estáticos en condiciones de LOS si no pasa lo suficientemente cerca del nodo estático para medir valores RSSI dentro del rango *LOS-RSSI*. Esta situación es poco probable que suceda en lugares en interiores como oficinas donde las habitaciones y corredores muestran típicamente dimensiones pequeñas. Sin embargo, esta situación puede aparecer en espacios en interiores donde los cuartos pueden tener dimensiones más grandes como por ejemplo en aeropuertos, centros comerciales, etc. Aún así, si un nodo móvil no pudiera detectar un nodo estático en condiciones de LOS, es posible que otro nodo móvil con una trayectoria diferente pueda hacer la detección. En este punto es importante mencionar que PhyCon involucra un enfoque colaborativo, de manera que una vez que un nodo móvil descubre un camino físico (como veremos más adelante), éste almacena dicha información en un servidor local de manera que esta información pueda ser compartida y usada entre todos los nodos que implementen PhyCon.

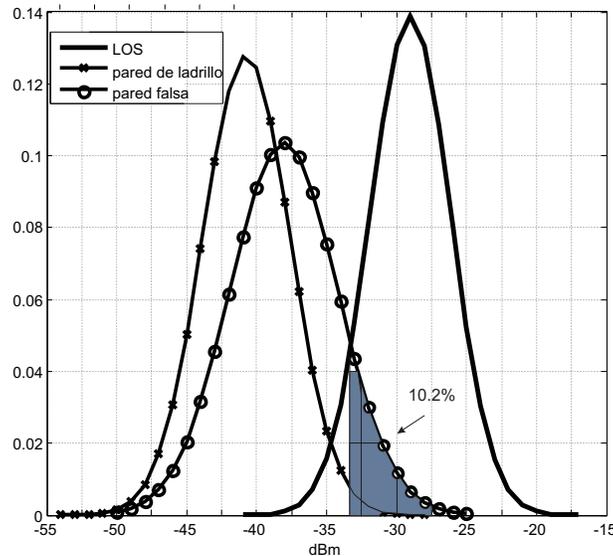


FIGURA 3.5: PDF del máximo valor RSSI alcanzado durante los experimentos de condiciones de LOS

### 3.3.2. Descubriendo caminos con conectividad física (*PCP*)

Esta sección describe como PhyCon usa el método de detección de condiciones de LOS (descrito previamente) para establecer caminos con conectividad física entre nodos estáticos en redes WLAN en interiores. Para facilitar la explicación, se define primero la notación usada.

1)  $t_{M^k S_j}^{LOS}$ . Denota el instante de tiempo en el que el rango *LOS-RSSI* es alcanzado entre un nodo móvil  $M^k$  y un nodo estático  $S_j$ .

2) *Conectividad física entre dos nodos estáticos* ( $PCP_{S_i-S_j}$ ). Denota un camino entre dos nodos estáticos  $S_i$  y  $S_j$  ( $i \neq j$ ) detectado por el nodo móvil  $M^k$  en diferentes instantes de tiempo usando el rango *LOS-RSSI*.

3) *Longitud de un* ( $t_{S_i-S_j}^{PCP}$ ). Es el tiempo de recorrido entre los instantes de tiempo  $t_{M^k S_i}^{LOS}$  y  $t_{M^k S_j}^{LOS}$ .

La figura 3.6 ilustra como PhyCon descubre un camino con conectividad física entre dos nodos estáticos ubicados a lo largo de un corredor. En esta figura el nodo móvil  $M^k$  recorre la trayectoria marcada por la línea punteada. En el punto  $p_2$  el enlace entre el nodo  $M^k$  y el nodo  $S_1$  alcanza un valor incluido dentro del rango *LOS-RSSI* y el nodo  $M^k$  guarda el instante de tiempo  $t_{M^k S_1}^{LOS}$ , ocurrido en el punto  $p_2$ . Similarmente, en

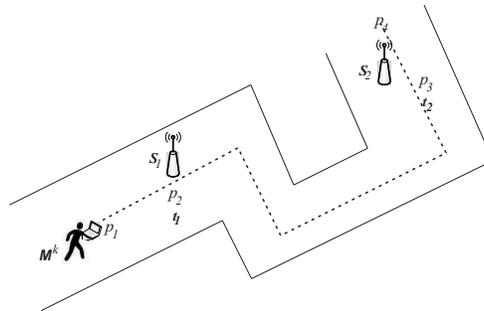


FIGURA 3.6: El método PhyCon

el punto  $p_3$  el enlace entre el nodo  $M^k$  y el nodo  $S_2$  es detectado con condiciones de LOS, y el nodo  $M^k$  guarda el instante de tiempo  $t_{M^k S_2}^{LOS}$ , ocurrido en el punto  $p_3$ . Así, el camino con conectividad física que conecta a los nodos  $S_1$  y  $S_2$  ( $PCP_{S_1-S_2}$ ) es detectado, creando una nueva arista en una gráfica de conectividad física.

### 3.3.3. Optimizando rutas en gráficas de conectividad física

Podría ser el caso que algunos  $PCPs$  encontrados usando el método antes descrito tengan una longitud muy larga, siendo difícil para los usuarios recorrerlos. Este es el caso particular si un  $PCP$  muy largo involucra cruzar puertas y hacer varios cambios de dirección que pueden hacer difícil el adivinar la ruta correcta para que un nodo móvil se mueva a lo largo del mismo  $PCP$  sin desviarse. Como resultado es necesario reemplazar, cuando sea posible,  $PCPs$  con longitudes largas y proveer a los usuarios móviles con más pistas acerca del camino a seguir. Esta meta puede ser alcanzada mediante el uso de un mecanismo de optimización de rutas como lo es una gráfica de Gabriel (GG) [50]. Una GG es una gráfica plana donde dos nodos  $S_i$  y  $S_j$  están conectados por una arista si y sólo si el círculo con diámetro  $|S_i S_j|$  (definido como área de búsqueda, *search area*) no contiene otros nodos. Esta condición de proximidad implica que si un nodo  $S_k$  está dentro del círculo con diámetro  $|S_i S_j|$ , entonces el cuadrado de la distancia entre  $S_i$  y  $S_j$  es mayor o igual a la suma del cuadrado de las distancias entre cada uno de estos puntos y  $S_k$ , esto es,

$$d(S_i, S_j)^2 \geq d(S_i, S_k)^2 + d(S_k, S_j)^2 \quad (3.2)$$

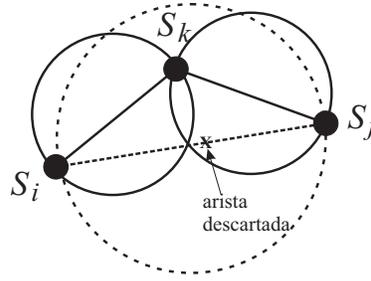


FIGURA 3.7: Condición de proximidad en una gráfica de Gabriel

Un ejemplo de una GG es mostrado en la figura 3.7. La arista que une a los nodos  $S_i$  y  $S_j$  no es una arista de Gabriel debido a que el círculo con diámetro  $|S_i S_j|$  contiene al nodo  $S_k$ . Por otro lado  $(S_i, S_k)$  y  $(S_k, S_j)$  son aristas de Gabriel debido a que los círculos con diámetro  $|S_i S_k|$  y  $|S_k S_j|$  no contienen otros nodos, respectivamente. De este ejemplo, cuando un nodo móvil encuentra el nodo intermedio  $S_k$  a medida que se mueve sobre la ruta  $S_i \rightarrow S_k \rightarrow S_j$ , esto es una pista de que se está moviendo en el camino correcto hacia  $S_j$ . Las aristas con una longitud corta en un camino o ruta en interiores tienen la característica de presentar menor número de puertas por cruzar o cambios de dirección.

Con el fin de descartar *PCPs* con longitudes grandes es necesario introducir primero un costo de conectividad física entre los nodos  $S_i$  and  $S_j$  de la siguiente manera:

$$W_{M_{S_i-S_j}^k}^{PCP} = (t_{S_i-S_j}^{PCP})^\alpha; \quad 1 \leq \alpha \leq 2 \quad (3.3)$$

donde  $\alpha$  es el exponente de costo de *PCP*. Un *PCP* con un alto costo puede ser reemplazado por dos o más *PCPs* que tengan menor costo, siempre y cuando existan nodos intermedios, mediante el uso de la condición de GG, definida en (3.2), en términos de costos de proximidad como se muestra a continuación.

$$W_{M_{S_i-S_j}^k}^{PCP} \geq W_{M_{S_i-S_k}^k}^{PCP} + \dots + W_{M_{S_{j-1}-S_j}^k}^{PCP} \quad (3.4)$$

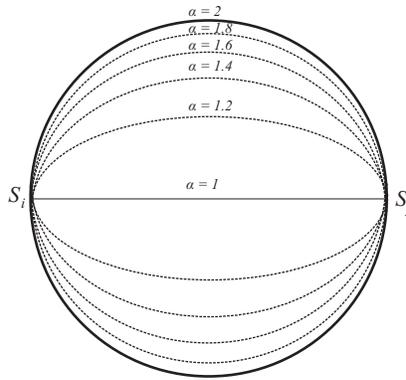


FIGURA 3.8: Variación del área de búsqueda en una GG

donde el valor de  $\alpha$ , definido en (3.3), determina la forma del área de búsqueda en una GG (ver figura 3.8). Esto es, cuando  $\alpha = 2$  el área de búsqueda es un círculo, cuando  $1 < \alpha < 2$ , el área de búsqueda llega a ser una elipse donde el tamaño de su área se incrementa a medida que el valor de  $\alpha$  se aproxima a 2. Cuando  $\alpha = 1$  en la figura 3.8 por ejemplo, PhyCon busca nodos intermedios que estén a lo largo de la línea recta  $PCP_{S_i-S_j}$ .

El uso de la ecuación 3.4 permite a PhyCon optimizar gráficas de conectividad física de manera que se muestren  $PCPs$  con longitudes cortas, incrementando así el número de nodos intermedios a lo largo de un  $PCP$ . La operación de PhyCon en pseudocódigo es mostrada más adelante en este capítulo.

### 3.3.4. Modos de operación de PhyCon

Para que PhyCon pueda operar correctamente es necesario que a medida que los nodos móviles se mueven dentro del rango de transmisión de los nodos estáticos escuchen los paquetes que éstos transmiten en la red. Con el fin de que los nodos móviles realicen mediciones de RSSI de estos paquetes es necesario que los nodos estáticos realicen transmisiones con alguna periodicidad. En PhyCon se definen dos modos de operación para alcanzar este objetivo los cuales se llaman modo pasivo y modo activo. En el modo pasivo, los nodos móviles escanean una lista de canales y esperan a escuchar las tramas *beacon* que son transmitidas por los nodos estáticos. En modo ad-hoc los puntos de acceso y otros nodos transmiten usualmente tramas *beacon* para anunciar su presencia a otros nodos. Por cada *beacon* recibido, un nodo móvil puede medir su valor RSSI y

**Algoritmo PhyCon****Entrada:** Definir  $\alpha$ **Salida:** Detectar conectividad física entre nodos estáticos

1. Nodo móvil  $M^k$  monitorea el RSSI de la señal del nodo  $S_i$ 
  - if**  $RSSI \geq LOS-RSSI$  **then**
    - $MS-LOS$  es detectado
    - Almacenar  $t_{M_{S_i}^k}^{LOS}$
  - else**
    - Ir al paso 1.
  - end if**
2.  $M^k$  monitorea el RSSI de la señal del nodo  $S_j$ 
  - if**  $RSSI \geq LOS-RSSI$  **then**
    - $MS-LOS$  es detectado
    - Almacenar  $t_{M_{S_j}^k}^{LOS}$
  - else**
    - Ir al paso 2.
  - end if**
3.  $PCP_{S_i-S_j}$  es detectado
4.  $t_{S_i-S_j}^{PCP} = t_{M_{S_i}^k}^{LOS} - t_{M_{S_j}^k}^{LOS}$
5.  $W_{M_{S_i-S_j}^{PCP}} = (t_{S_i-S_j}^{PCP})^\alpha$
6. Optimizar  $PCP_{S_i-S_j}$  mediante el uso de GG

la dirección MAC del nodo fuente asociado. Este modo permite a los nodos móviles recolectar mediciones de RSSI sin transmitir algún mensaje, y pueden recibir suficiente información para aplicar correctamente el criterio 3.1 para detectar si o no un nodo estático está en condiciones de LOS. El modo activo es usado para obtener mediciones RSSI de nodos estáticos que no transmiten tramas *beacon*, el cual es el caso de nodos conectados a AP. Contrario a los puntos de acceso y a los nodos ad-hoc, los clientes conectados a los puntos de acceso no siempre transmiten paquetes, y por lo tanto, sus señales pueden no estar siempre disponibles para medir valores de RSSI. Para resolver este problema, un nodo móvil debe primero conectarse a un punto de acceso en modo promiscuo y obtener la lista de todos los nodos que actualmente estén conectados a ese AP. Este requerimiento puede ser hecho por alguna utilidad de software diseñada para monitoreo de redes como por ejemplo nmap [51]. Una vez que esta lista es obtenida, el nodo móvil puede enviar mensajes ICMP de solicitud a cada nodo de la lista, forzando así a los nodos a transmitir. Finalmente, el nodo móvil captura todos los mensajes ICMP de respuesta entre cualquier nodo y el punto de acceso para obtener directamente el valor RSSI de la señal de los nodos conectados al punto de acceso.

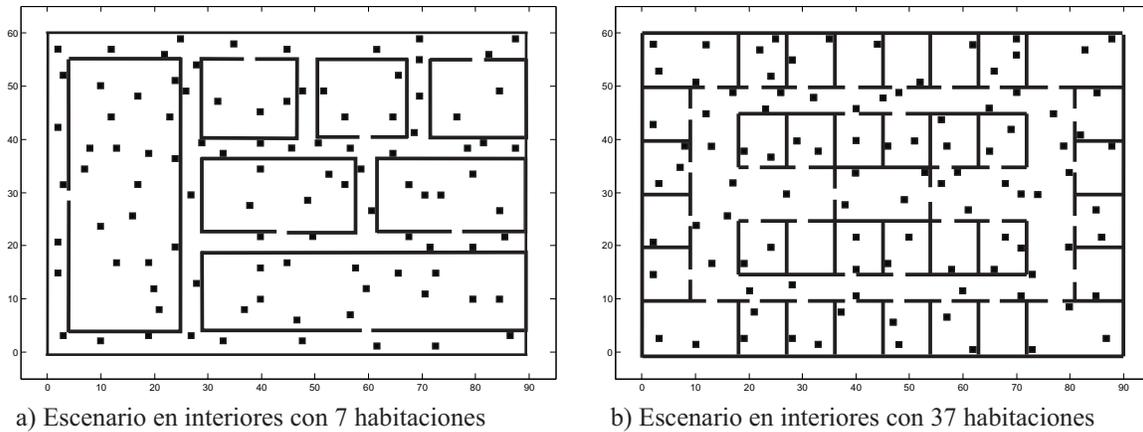


FIGURA 3.9: Escenarios en interiores usados para la simulación de PhyCon

### 3.3.5. Evaluación y resultados

Con el fin de evaluar el desempeño de PhyCon una serie de experimentos fueron desarrollados, primero en un simulador de eventos discretos desarrollado en Matlab 7.6 y después en una red de prueba compuesta por varias PC, AP, y computadoras portátiles.

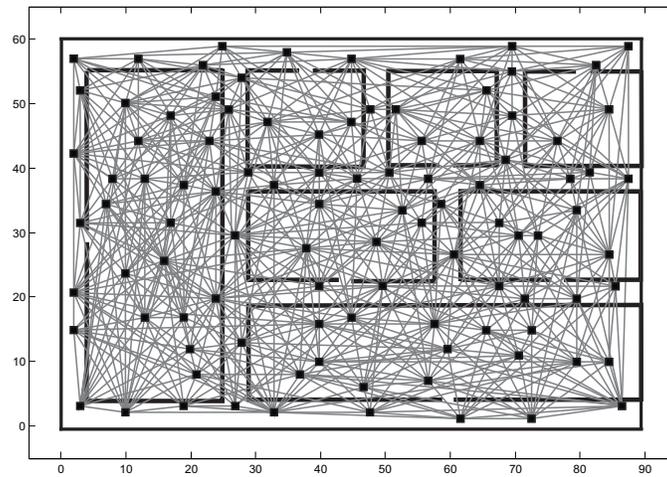
#### 3.3.5.1. Simulaciones

Para evaluar el desempeño de PhyCon se implementó un simulador de eventos discretos con la herramienta de software Matlab 7.6. En esta implementación se simularon dos escenarios en interiores de 90 m x 60 m donde dos esquemas fueron considerados. El esquema del escenario 1 se muestra en la figura 3.9.a. En este escenario se colocaron 7 rectángulos para simular habitaciones de dimensión variable. La discontinuidad en el perímetro de cada rectángulo representa la única puerta disponible de cada habitación, mientras las separaciones entre rectángulos representan los corredores o pasillos del área. El esquema del escenario 2 es mostrado en la figura 3.9.b., donde se colocaron 37 rectángulos para simular pequeñas habitaciones y, de la misma manera que en el escenario 1, las puertas en cada habitación son representadas por una discontinuidad en el perímetro de cada rectángulo. En ambos escenarios se colocaron aleatoriamente 100 nodos y el tiempo de simulación fue de 1200 segundos. Se seleccionaron aleatoriamente 50 nodos a lo largo del tiempo de simulación para que éstos cambiaran de posición en la red usando una velocidad constante de 1 m/s. Los movimientos de estos nodos fueron permitidos sólo a través de los pasillos, dentro de las habitaciones y moviéndose

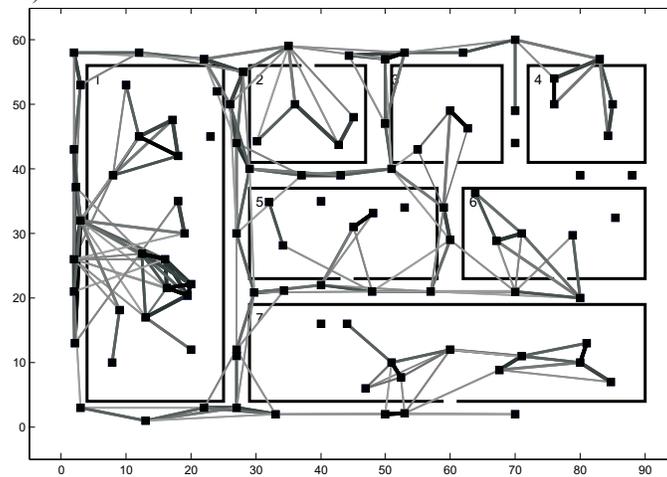
de una habitación a un pasillo o viceversa a través de la puerta correspondiente. En las simulaciones los nodos estáticos transmitieron tramas *beacon* al menos cada segundo de manera que los nodos en movimiento cercanos pudieran medir el valor RSSI y establecer si o no entre un nodo estático y uno móvil había condiciones de LOS. El modelo de propagación que se utilizó es el modelo en espacios libres considerando un coeficiente de atenuación si la señal WiFi cruzó una pared en línea recta en una conexión entre cualquier par de nodos.

Las simulaciones se enfocaron en medir el número de *PCP* encontrados en la red a medida que los nodos móviles se movían dentro de la red. Durante las simulaciones, si un nodo cambió su estado de estático a móvil, entonces todos sus *PCP* detectados fueron eliminados antes de comenzar su movimiento. Por el otro lado, una vez que un nodo cambió su estado de móvil a estático, nuevos *PCP* que conectan este nodo con otros nodos estáticos esperarán a ser descubiertos por los nodos móviles que pasen cerca.

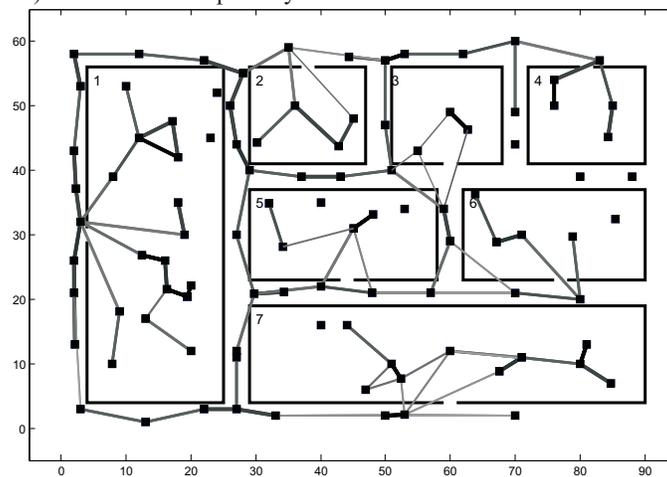
Las figuras 3.10.a y 3.11.a muestran las aristas de la gráfica de conectividad de radio para el esquema del escenario 1 y escenario 2, respectivamente. Las líneas en ambas figuras conectan a los nodos que están dentro del rango de transmisión de otros nodos utilizando un modelo de propagación en interiores que considera el número de paredes involucradas entre cualquier enlace en la red. Como mencionamos anteriormente, es difícil detectar caminos con conectividad física de estas figuras usando solamente su valor RSSI, motivando así la idea de usar PhyCon. Las figuras 3.10.b y 3.11.b muestran el número de *PCP* detectados por PhyCon durante la simulación con  $t_{S_i-S_j}^{PCP} \leq 20$  segundos para el escenario 1 y el escenario 2, respectivamente. Como se puede observar en estas figuras, todos los *PCP* mostrados se refieren a *PCP* disponibles y que conectan nodos estáticos en la red. Con el fin de reducir el número de *PCP* mostrados en las figuras cuando no se ha aplicado la optimización de rutas (usando la ecuación 3.4), se muestran solamente los *PCP* que tienen una longitud de  $t_{S_i-S_j}^{PCP} \leq 20$  segundos. Aplicando el método de optimización con  $\alpha = 2$  en los *PCP* mostrados en las figuras 3.10.b y 3.11.b se obtienen los resultados mostrados en las figuras 3.10.c y 3.11.c, respectivamente. Como se puede ver en estas figuras, *PCP* con longitudes largas fueron reemplazados por *PCP* con longitudes cortas, creando caminos físicos con más nodos intermedios que proveen más pistas para que los nodos móviles puedan seguirlas mientras se mueven en un determinado *PCP*.



a) Gráfica de radio conectividad

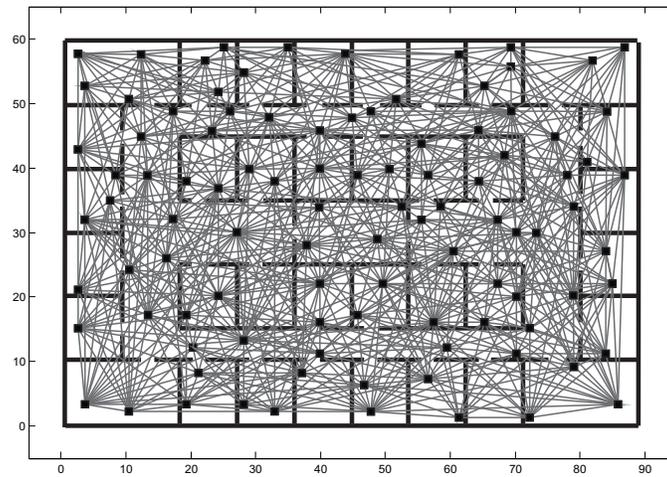


b) PCP detectados por PhyCon.

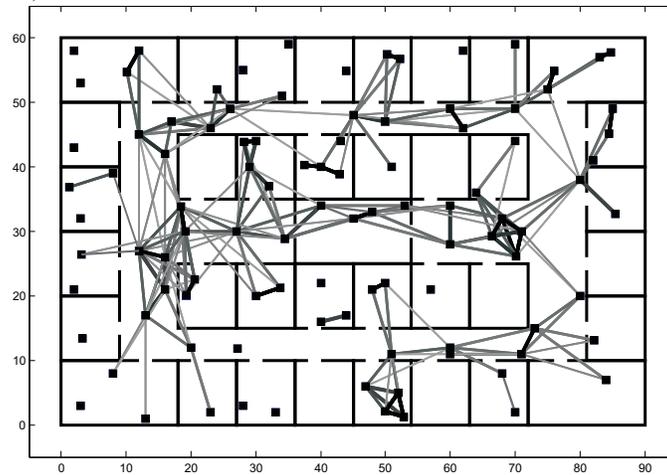


c) PCP detectados por PhyCon aplicando el método de optimización.

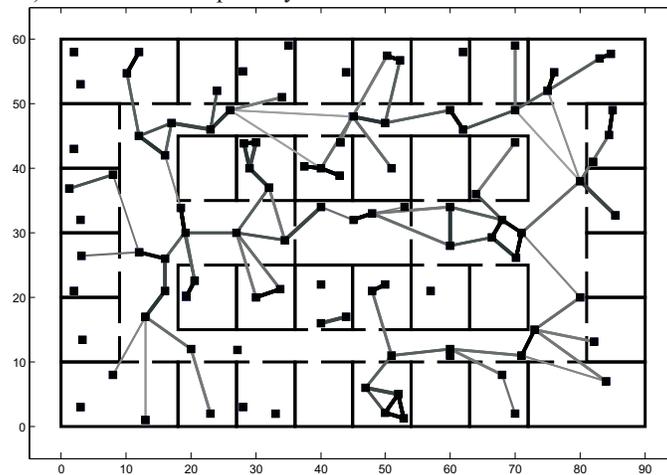
FIGURA 3.10: Simulación de PhyCon con 100 nodos usando el escenario 1



a) Gráfica de radio conectividad



b) PCP detectados por PhyCon



c) PCP detectados por PhyCon aplicando el método de optimización

FIGURA 3.11: Simulación de PhyCon con 100 nodos usando el escenario 2

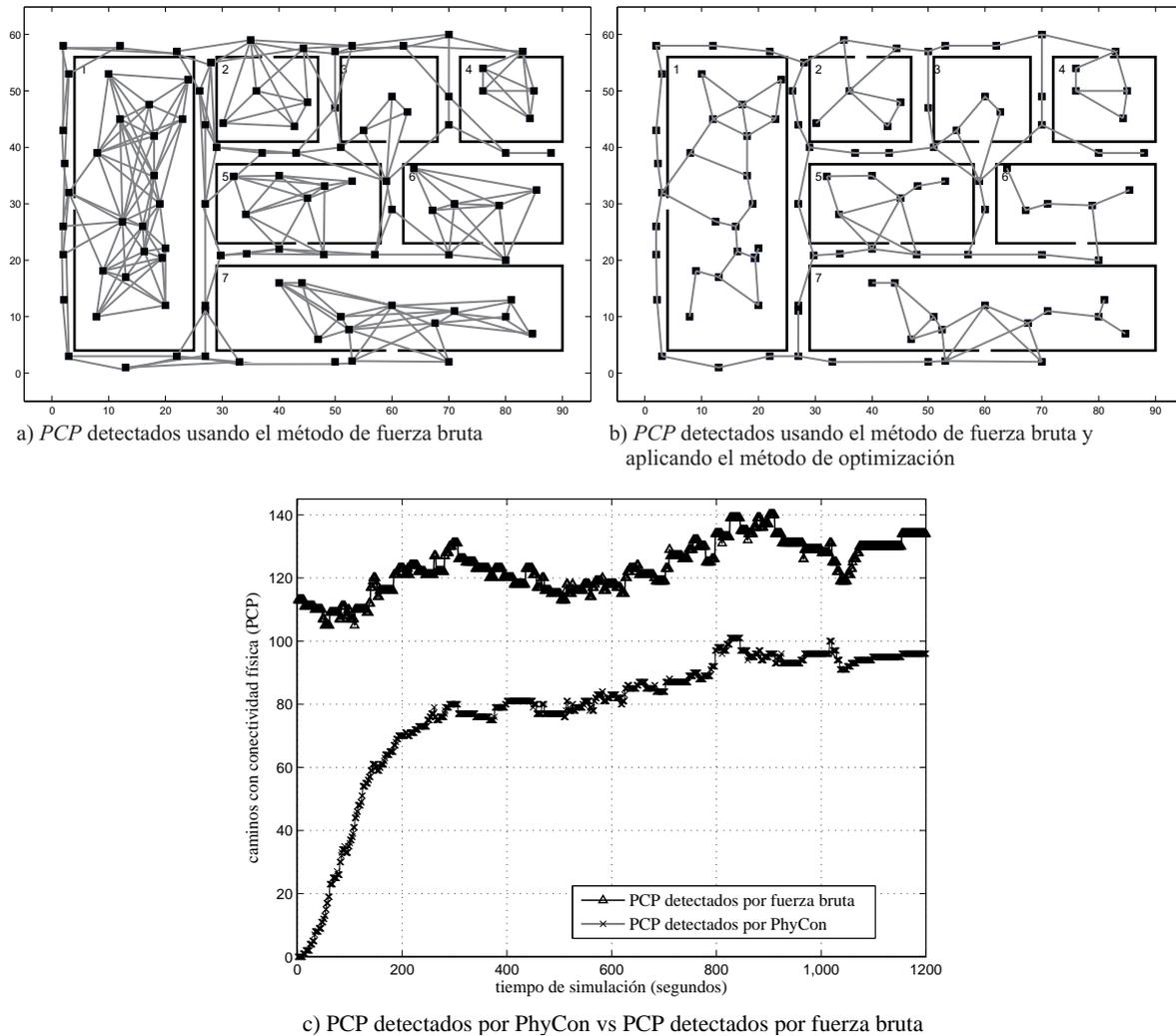


FIGURA 3.12: Simulación de *PCP*s usando el escenario 1

Con el fin de comparar el número de *PCP* descubiertos por PhyCon se implementó un método de fuerza bruta en el que todos los posibles *PCP* fueron encontrados usando  $t_{S_i-S_j}^{PCP} \leq 20$  durante el tiempo de simulación. El método de fuerza bruta se basa en usar el tiempo de recorrido que se requiere para moverse de un nodo a cualquier otro nodo en la red (a una velocidad definida) tomando en cuenta los caminos físicos que existan en el mapa del escenario correspondiente. Esto es, un nodo es conectado con otro nodo si existe un camino físico que conecte a ambos nodos y que su tiempo de recorrido sea menor o igual a 20 segundos usando una velocidad de 1 m/s. Las figuras 3.12.a y 3.13.a muestran los *PCP* detectados usando fuerza bruta para el escenario 1 y el escenario 2, respectivamente. Aplicando el método de optimización con  $\alpha = 2$  a los *PCP* obtenidos por fuerza bruta de las figuras 3.12.a y 3.13.a se obtienen los resultados mostrados

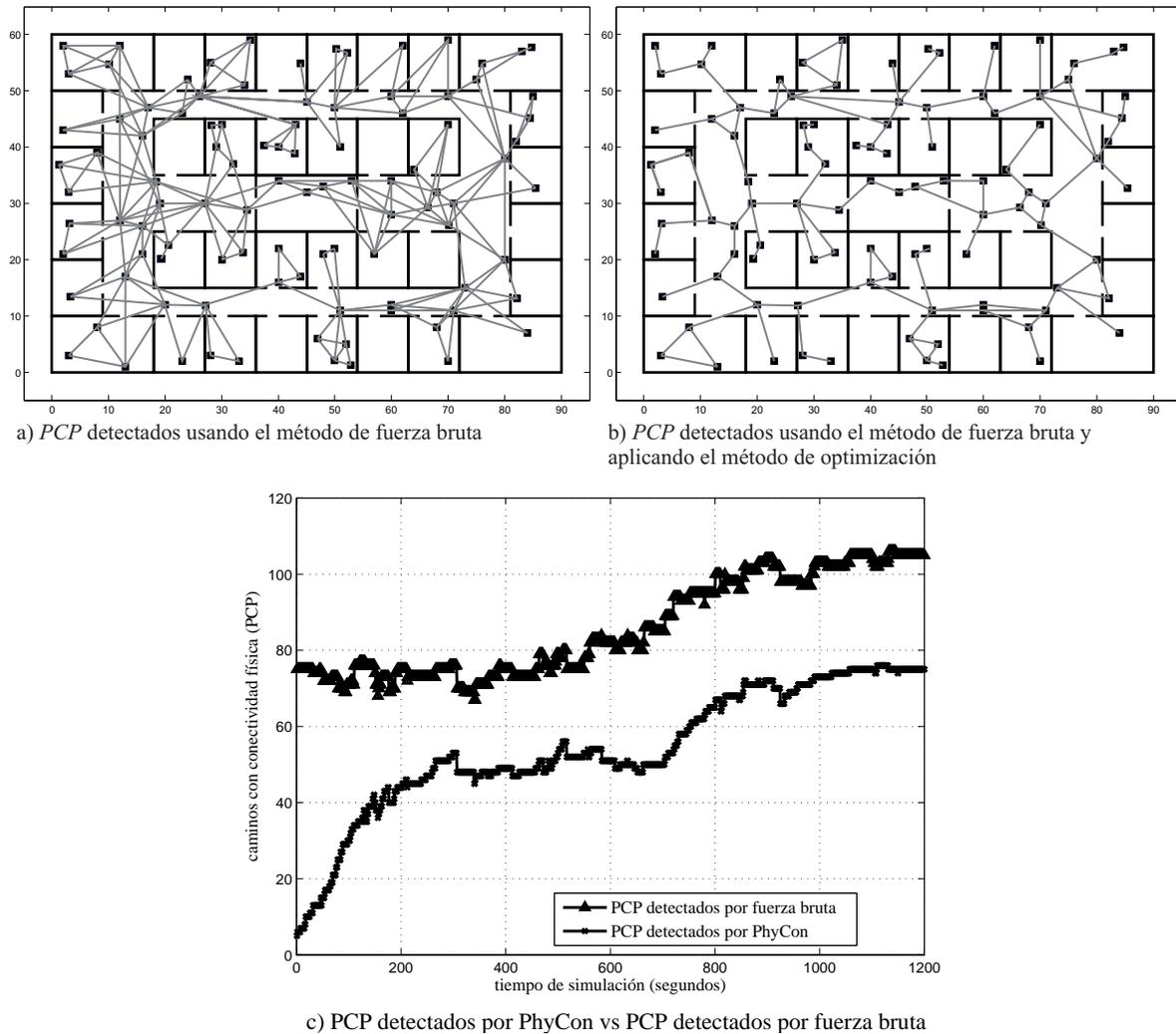


FIGURA 3.13: Simulation de *PCP*s usando el escenario 2

en las figuras 3.12.b y 3.13.b para el escenario 1 y 2, respectivamente. Estas gráficas representan los resultados ideales que debieron haberse obtenido si todos los *PCP* se hubieran detectado durante la simulación de PhyCon, y posteriormente optimizando dichos *PCP*. Las figuras 3.12.c y 3.13.c muestran el número de *PCP* detectados por PhyCon y por el método de fuerza bruta (sin optimizar) durante el tiempo de simulación usando  $t_{S_i-S_j}^{PCP} \leq 20$  para ambos escenarios. En estas figuras se puede observar que la tasa de *PCP* detectados por PhyCon se incrementa rápidamente durante los primeros 200 segundos de simulación, disminuyendo esta tasa posteriormente. Este comportamiento es básicamente el resultado de no tener *PCP* detectados por PhyCon al principio de la simulación. De forma similar, se puede observar que el número de *PCP* descubierto por PhyCon se aproxima a un 70-80% de todos los *PCP* existentes y descubiertos por el

TABLA 3.1: Estadísticas finales de la simulación de PhyCon en dos escenarios

Escenario	Nodos conectados por un <i>PCP</i>	Nodos desconectados	Distancia promedio recorrida por nodo
Escenario 1	91	9	79.98 m
Escenario 2	84	16	61.44 m

método de fuerza bruta (sin aplicar optimización). Los *PCP* no detectados por PhyCon fueron el resultado de nodos móviles que no pasaron lo suficientemente cerca de algunos nodos estáticos para descubrir condiciones de LOS con ellos. Similarmente, hay una diferencia menor entre el número de *PCP* descubierto por PhyCon y por el método de fuerza bruta para el escenario 2 comparado con el escenario 1. Este comportamiento es el resultado de tener habitaciones y pasillos con dimensiones más pequeñas en el escenario 2, lo cual hace menos probable que los nodos móviles no puedan detectar condiciones de LOS con nodos estáticos cercanos a medida que se mueven dentro del escenario. La tabla 3.1 muestra algunas estadísticas de ambos escenarios después de la simulación de PhyCon. Como podemos observar en esta tabla el número final de nodos conectados por *PCP* es mayor en el escenario 1 que en el escenario 2. Este comportamiento es el resultado de que, en promedio, en el escenario 1 los nodos móviles recorrieron una mayor distancia que en el escenario 2. El resultado anterior es debido a que en el escenario 1 los obstáculos (paredes) son de mayor dimensión que en el escenario 2, y por lo tanto son más difíciles de rodear por los nodos para llegar a otra área en la red. Adicional a lo anterior, en el escenario 2 existen más nodos aislados (nodos que no tienen vecinos en la misma habitación o pasillo) que en el escenario 1 haciendo más difícil que un nodo móvil encuentre condiciones LOS con estos nodos.

La figura 3.14 muestra un comparativo entre los resultados obtenidos por PhyCon en los dos escenarios (figuras 3.10.c y 3.11.c) y los resultados ideales (figuras 3.12.b y 3.13.b). En esta figura podemos ver que para el escenario 1 el número total de *PCP* descubiertos por PhyCon y optimizados es de 93. Esta cantidad corresponde al 77.5% respecto a los 120 *PCP* ideales que debieron haberse descubierto para este escenario. Por otro lado, para el escenario 2 el número total de *PCP* descubiertos por PhyCon y optimizados es de 86. Esta cantidad corresponde al 72.8% respecto a los 118 *PCP* ideales que debieron haberse descubierto para este escenario.

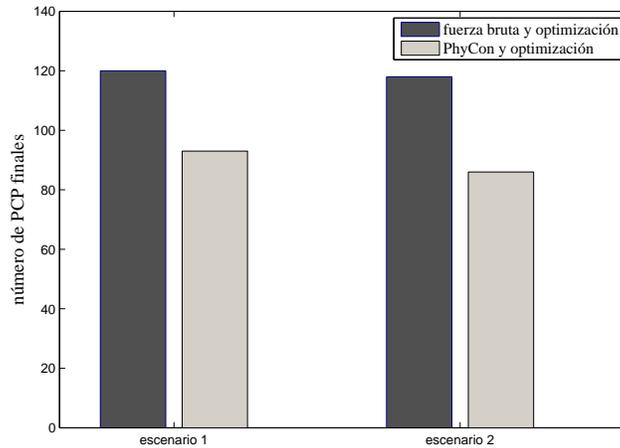


FIGURA 3.14: Comparación entre *PCP* encontrados por PhyCon y *PCP* encontrados por fuerza bruta en los escenarios de prueba 1 y 2

### 3.3.5.2. Experimentos en una red WLAN en interiores

Para la implementación y prueba de PhyCon, una red WLAN fue desplegada en el tercer piso del edificio de laboratorios mencionado en la sección 3.3.1. La red inalámbrica desplegada en este edificio fue compuesta por 13 computadoras de escritorio, 3 AP y 13 computadoras portátiles que se movieron en diferentes momentos del experimento (laptops). Todos los dispositivos estuvieron equipados con una tarjeta inalámbrica 802.11g y todas las laptops y computadoras de escritorio fueron conectadas a uno de los 3 AP disponibles en el área para conectarse a internet. Las laptops corrieron una implementación de PhyCon y fueron llevadas por estudiantes y profesores que colaboraron en el proyecto. Se usaron 13 laptops Sony Vaio PCG-71C11U como nodos móviles equipadas con un chipset Atheros AR9285 802.11g. Como se mencionó anteriormente, PhyCon requiere de utilidades de software para interactuar con el controlador de red con el fin de recaudar información de RSSI del dispositivo inalámbrico así como de información de la red como lo son los clientes conectados a un AP, las redes WLAN disponibles (scanning) y los paquetes de datos circulando en la red (sniffers). Sin embargo, estas utilidades son independientes de PhyCon, el cual puede trabajar con cualquier herramienta de software capaz de proporcionar esta información. Para implementar PhyCon en los dispositivos móviles se usó software de uso libre detallado a continuación.

- Linux Ubuntu version 8.04 con Wireless Tools 27+28 pre13-1Ubuntu2.

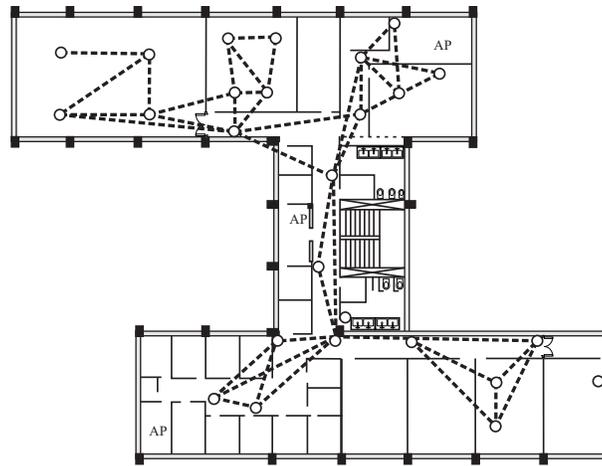
- Nmap version 4.53-3. Nmap usado para determinar los clientes conectados actualmente en una red.
- fping version 2.4b2. fping usado para enviar paquetes ping packets a un cierto número de destinos.
- tcpdump version 3.9.8-2. tcpdump usado para capturar el tráfico de una red.

El despliegue de nodos en la red es mostrado en la figura 3.15.a. Los puntos de acceso son etiquetados como  $AP$ , mientras los círculos denotan el resto de los nodos. Durante los experimentos, los nodos móviles llevaron a cabo diversos movimientos dentro del escenario operando en modo activo. Es importante mencionar que se usó solamente el comportamiento normal de movilidad de los estudiantes que participaron en el proyecto durante 3 horas. De la misma manera que en la sección 3.3.5, definimos un valor máximo de  $t_{S_i-S_j}^{PCP} \leq 20$  segundos para reducir el número de  $PCP$  mostrados en las gráficas. Como podemos observar en la figura 3.15.a, los  $PCP$  detectados conectan pares de nodos según existe un camino con conectividad física.

La figura 3.15.b ilustra las aristas filtradas de la gráfica de la figura 3.15.a mediante el uso del método de optimización con un valor de  $\alpha = 2$ . Como resultado se puede ver que los  $PCP$  en esta figura representan o caminos libres de obstáculos (nodos en el mismo cuarto o corredor) o caminos libres de obstáculos adyacentes como lo son las habitaciones o corredores contiguos con una puerta o intersección común.

### 3.4. Conclusiones del capítulo

El concepto de conectividad física así como la metodología aquí expuesta para detectar esta condición en nodos estáticos de una red WiFi en interiores permite analizar las posibilidades de movimiento del resto de los usuarios de esa misma red. Como se vio en las simulaciones para detectar conectividad física, las posibilidades de movimiento de un nodo se relacionan con el número de nodos estáticos que puede alcanzar por medio de caminos físicos detectados. También observamos que una gráfica de conectividad física suele estar en constante cambio a medida que los nodos cambian de un estado estático a un estado en movimiento y viceversa. Por lo tanto, la longevidad de un  $PCP$  detectado toma importancia respecto a que puede proporcionar información de que tan



a) Caminos con conectividad física detectados por PhyCon

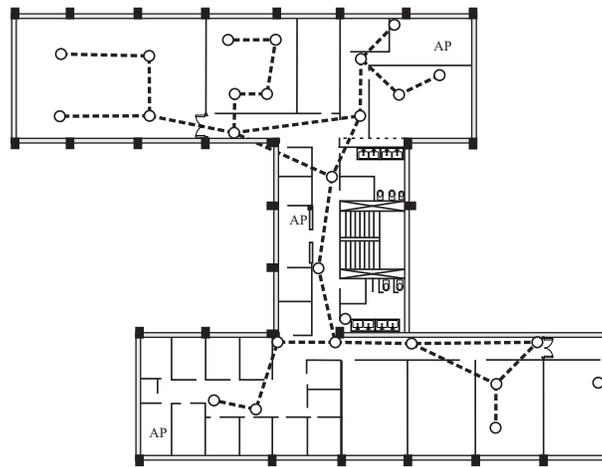
b) Caminos con conectividad física después de aplicar el método de optimización con  $\alpha = 2$ 

FIGURA 3.15: Red experimental desplegada para las pruebas de PhyCon

probable es que los nodos estáticos del *PCP* sigan en su misma posición, a menos que se tenga la información de que por su *id* no son un tipo de nodos que suelen cambiar de posición como una impresora o un AP. Finalmente, podemos decir que la longitud de un *PCP* puede inducir información sobre los obstáculos que existen entre un par de nodos. Aunque no suele ser una regla general, es común que entre mayor longitud tenga un *PCP* mayor es el número de cambios de dirección o número de puertas que cruzar para recorrerlo. Por tal motivo el proceso de optimización aquí propuesto permite reemplazar, cuando es posible, *PCP* de longitudes largas con *PCP* de longitudes cortas que tienen un mayor número de pistas para llegar de un nodo a otro. Como se verá en el capítulo siguiente, este hecho es de gran ayuda para desarrollar funciones de guiado.

# Capítulo 4

## Guiado en redes WLAN 802.11 en interiores usando conectividad física

Primeramente en este capítulo se presenta un panorama general sobre cómo en la literatura se ha desarrollado el guiado de personas y dispositivos móviles en ambientes en interiores. Posteriormente, se describe a detalle una propuesta de guiado nodo a nodo para redes inalámbricas en interiores llamada SIGMA.

### 4.1. Trabajo relacionado con guiado en interiores

De manera similar que en guiado en exteriores, las propuestas de guiado para interiores han surgido de la idea de resolver el problema de saber dónde está ubicado un usuario e indicarle cómo llegar a un lugar deseado. Muchas de las soluciones proponen realizar una inversión para implementar sistemas de localización y otras más requieren información de referencia como el mapa del inmueble en cuestión. A continuación analizamos algunas de estas propuestas.

Para situaciones de emergencia podemos encontrar algunos sistemas de navegación como el propuesto en [52]. En este trabajo, los autores consideran usar una red inalámbrica de sensores dentro de un edificio para monitoreo de emergencias como incendios. Para realizar servicios de guiado, los sensores son clasificados según su ubicación en el inmueble como por ejemplo sensores en escaleras, sensores de puertas de salida, sensores en

corredores y un sensor que sirve como nodo central (sink) donde se procesa la información de toda la red. Cualquier emergencia detectada activa al sink para dar servicio de guiado a usuarios. Este servicio consiste en generar rutas de escape multisaltos entre los sensores desplegados para guiar a los usuarios a la salida más cercana.

Otro ejemplo de sistemas de navegación con infraestructura en interiores es presentado en [53]. En este sistema se propone utilizar etiquetas RFID en un inmueble para identificar entradas, intersecciones, escaleras, etc. Estas etiquetas tienen un código de identificación que se almacena en una base de datos. Cada usuario del sistema está equipado con un lector de RFID para leer los códigos de las etiquetas, además de un teléfono inteligente que recibe estas lecturas por medio de una conexión Bluetooth. Usando una aplicación instalada en un teléfono móvil, un usuario puede seleccionar un destino (de una lista de destinos posibles) y la aplicación traza una ruta desde la ubicación del usuario hacia el destino seleccionado usando los códigos de las etiquetas RFID.

Actualmente, es común encontrar propuestas en la literatura de aplicaciones de navegación inercial para espacios en interiores. Como se mencionó en la sección 2.1, la navegación inercial permite inferir la trayectoria y ubicación actual de un móvil mediante el conocimiento de su velocidad, orientación y lugar donde comenzó a desplazarse. Si en áreas en interiores se agrega la información del mapa del entorno donde el móvil se desplaza, entonces es posible determinar cuándo y hacia dónde el móvil debe moverse para seguir una trayectoria deseada. Algunos ejemplos de sistemas de navegación inercial en interiores son los siguientes.

En [54] los autores proponen un sistema de navegación en interiores usando el acelerómetro y brújula de un teléfono celular, además del mapa digital de un edificio. Dados un punto origen y uno destino, el sistema de navegación puede calcular, mediante el uso del mapa digital, la ruta exacta a seguir para desplazarse entre estos puntos. Cuando un usuario sigue esta ruta, el sistema de navegación implementado en su teléfono sabe si el usuario está en el camino correcto debido a que la velocidad y orientación del usuario es monitoreada en todo momento.

En otro ejemplo, los autores en [55] proponen utilizar la cámara de un teléfono inteligente para capturar los códigos de diferentes matrices de datos que se encuentran impresos en los murales de cada piso de un edificio. Estas matrices de datos contienen información de descarga en Internet para acceder al mapa del piso correspondiente, y la ubicación del

usuario en el mismo. Cuando el usuario empieza a caminar, una aplicación instalada en el teléfono del usuario dibuja paso por paso su ubicación a lo largo del mapa descargado. La ubicación y trayectoria se estiman mediante el uso de los datos que registra la brújula y acelerómetro del teléfono.

Una combinación de sistemas de navegación inercial con infraestructura es encontrada en [56]. En este trabajo los autores proponen desplegar un conjunto de AP en un inmueble y crear un conjunto de huellas digitales (fingerprint) de valores de RSSI en dicho lugar. Mediante el uso de los valores de RSSI que se midan de cada AP en un determinado punto se estima en éste su correspondiente distribución de probabilidad de RSSI. Para estimar la ubicación de un usuario, los autores desarrollaron una aplicación de navegación que se ejecuta en un teléfono celular y que utiliza un modelo de propagación en interiores, el mapa del inmueble y el sistema de huellas digitales antes mencionado. Después de que un usuario es localizado usando el método anterior, se puede estimar su trayectoria y orientación mediante las mediciones que hagan el acelerómetro y brújula digital de su teléfono.

Por otro lado, existen propuestas muy simples de sistemas de navegación en interiores que requieren únicamente el mapa digital del inmueble donde se va a guiar a un usuario. Por ejemplo, la aplicación *FastMall* [57] posee información de mapas digitales de varios centros comerciales de la ciudad de Nueva York, y está disponible para dispositivos móviles. En estos mapas están detalladas las ubicaciones de las tiendas, restaurantes, escaleras, baños, etc., así como los horarios de servicio de cada tienda dentro de un centro comercial. Un usuario de esta aplicación debe indicar en el mapa de interés su ubicación actual y un lugar de destino deseado (por ejemplo, un restaurante). Una vez indicados estos datos, la aplicación devuelve una secuencia de instrucciones de guiado como la siguiente: a) baje las escaleras que están a 5 metros de usted, b) camine en dirección al banco, c) al llegar al banco de vuelta a la izquierda y d) el restaurante esta a 10 metros. Bajo estas circunstancias, la aplicación no comprueba nunca si el usuario siguió o no las instrucciones adecuadamente.

Como ya se ha comentado, el principal inconveniente de utilizar sistemas de navegación inercial es la necesidad de usar hardware adicional para medir en un móvil su velocidad y dirección como es el caso del acelerómetro y la brújula digital [58], respectivamente. Además, tanto en sistemas inerciales como basados en infraestructura se requiere de

información extra como el mapa del entorno para realizar un estudio previo del lugar en cuestión y determinar las posibles rutas de movimiento que están disponibles en el inmueble.

## 4.2. Un algoritmo de guiado para usuarios de redes WLAN en interiores

En el capítulo anterior definimos el algoritmo PhyCon que permite detectar caminos físicos entre nodos de una red. Sin embargo, para fines de guiado, la información que se obtiene de PhyCon no es suficiente para definir los movimientos a seguir para guiar a un nodo a la posición de otro. Por ejemplo, en la figura 4.1.a se muestra un área en interiores formada por cuatro habitaciones ( $h_1, h_2, h_3$  y  $h_4$ ) y tres corredores ( $c_1, c_2$  y  $c_3$ ). Dentro de esta área está desplegada una red de 9 nodos inalámbricos representados por círculos con un número en su interior que indica el identificador de nodo en la red. Para fines ilustrativos hemos marcado con líneas punteadas la conectividad física descubierta por PhyCon entre el nodo 1 y el resto de los nodos, y de la cual se genera el árbol de conectividad mostrado en la figura 4.1.b. El peso de cada arista en este árbol ha sido estimado usando la ecuación 3.3 de la sección 3.3.3 con  $\alpha = 2$  y con una velocidad de movimiento de 1 m/s. Como se describió en el capítulo anterior, los valores de cada  $t_{S_1-S_j}^{PCP}$  utilizados para calcular el peso de cada arista indican el tiempo requerido para moverse desde el nodo 1 a cada uno de los nodos restantes usando la velocidad de movimiento antes mencionada. Sin embargo, esta información de tiempo dada por  $t_{S_1-S_j}^{PCP}$  no determina cómo debe recorrerse cada  $PCP_{S_1-S_j}$  (arista en el árbol). La información de guiado faltante en este árbol de conectividad es, por ejemplo, que para recorrer la arista  $1 \rightarrow 2$  el nodo 1 debe avanzar por  $c_2$  en sentido opuesto a la posición del nodo 3, dar vuelta a la derecha en el cruce con el corredor  $c_3$ , seguir por  $c_3$  hasta llegar a la puerta de  $h_3$  y cruzar ésta para encontrar al nodo 2.

En este capítulo proponemos y evaluamos SIGMA, un sistema de guiado para usuarios de redes inalámbricas en interiores que utilicen dispositivos WiFi. SIGMA determina precisamente cómo recorrer físicamente cada  $PCP$  de un árbol de conectividad creado por PhyCon, empleando para ello una metodología de tipo *stigmergy* [59]. Este tipo de metodología propone básicamente que por medio de monitorizar o modificar el entorno

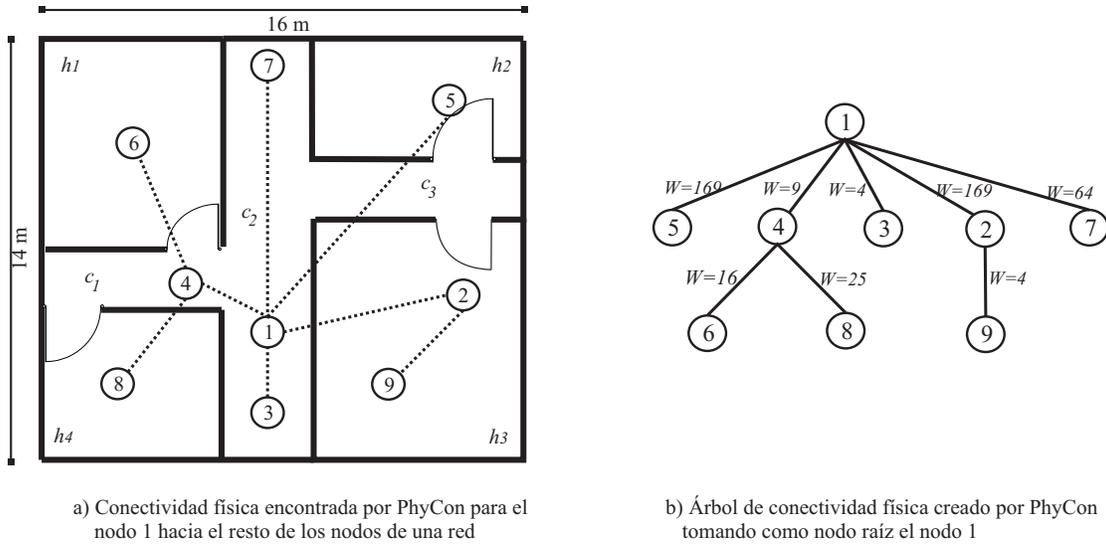


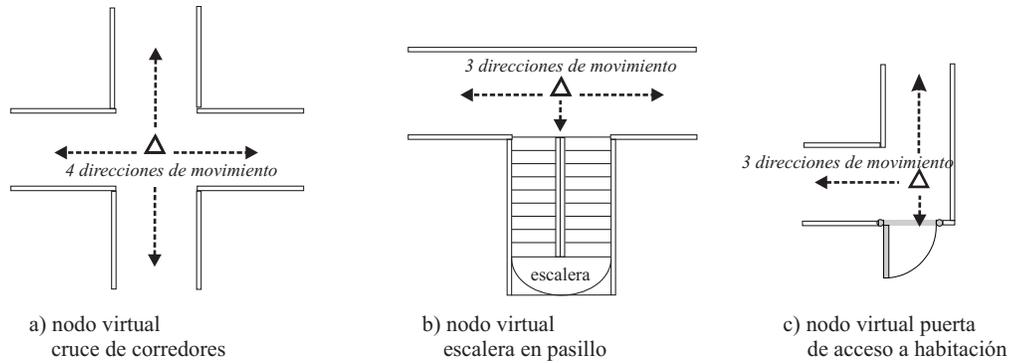
FIGURA 4.1: Conectividad física y árbol de conectividad para una red inalámbrica en interiores

donde se encuentran ciertos individuos, éstos puedan comunicarse y coordinarse indirectamente para seguir un cierto comportamiento o desarrollar alguna tarea. Bajo esta idea, SIGMA propone que para un  $PCP_{S_i-S_j}$ , un nodo (individuo) explore aleatoriamente los caminos físicos adyacentes (entorno) de  $S_i$  hasta encontrar a  $S_j$  dejando un rastro de su trayectoria que consiste principalmente en mediciones de RSSI de  $S_j$  y de puntos de referencia (descritos en la sección 4.4) encontrados durante su recorrido. El rastro dejado sirve para que futuros nodos utilicen menos movimientos aleatorios, cometan menos errores y aprendan los movimientos necesarios para recorrer el  $PCP_{S_i-S_j}$ . A diferencia de otros sistemas de navegación que utilizan brújulas digitales y acelerómetros para determinar la trayectoria que ha seguido un nodo móvil, SIGMA no requiere de hardware adicional para definir rastros de trayectoria.

Antes de detallar cómo funciona SIGMA, enunciamos la terminología y premisas usadas por este sistema.

### 4.3. Terminología

En SIGMA se usan diferentes tipos de nodos que en conjunto permiten descubrir, determinar y aprender la forma de recorrer un camino físico entre nodos descubierto por


 FIGURA 4.2: Nodos *virtuales* con 3 o más direcciones de movimiento posibles

PhyCon. A continuación mencionamos cada uno de estos nodos y términos utilizados por SIGMA.

Nodo *estático* ( $S_i$ ). Dispositivo con interfaz WiFi que no cambia su ubicación y tiene un identificador único en la red ( $id$ ) como lo es una dirección MAC o IP.

Nodo *móvil* ( $M^k$ ). Persona portando algún dispositivo portátil equipado con WiFi con un  $id$  en la red. Usando el rango *LOS-RSSI*, definido en 3.1, es posible detectar condiciones de LOS entre un nodo *móvil* y uno *estático* ( $t_{M^k S_i}^{LOS}$ ).

Nodos *Origen* y *Destino*. Si dos nodos *estáticos* en una red son cada uno un punto extremo de un camino físico que conecta a ambos nodos, entonces al nodo cuya posición sirve como punto de inicio para recorrer este camino de un extremo a otro le llamamos nodo *Origen*. Por otro lado, al nodo cuya posición sirve como punto final de recorrido de este camino físico se le conoce como nodo *Destino*. Ambos tipos de nodos tienen un  $id$  en la red.

Nodo *virtual* ( $\Delta$ ). Punto en la red donde existen tres o más direcciones de movimiento. Ejemplos de nodos virtuales son cruce de corredores, puertas de transición entre un corredor y una habitación y acceso a escaleras o elevadores desde pasillos. En la figura 4.2 se muestran algunos ejemplos de nodos virtuales marcados con un triángulo, donde las direcciones de movimiento se encuentran marcadas con flechas en líneas punteadas. Este tipo de nodos no tienen un  $id$  en la red.

Nodo *sink*. Nodo donde se guarda y mantiene una “tabla de guiado”, la cual consiste en un arreglo matricial donde se almacena el rastro (descrito en 4.4) que deja un nodo *móvil* al explorar los caminos físicos entre un nodo *Origen* y uno *Destino* en una red. Además

de la tabla de guiado, un nodo *sink* también guarda la información de los árboles de conectividad descubiertos por PhyCon. Adicional a sus tareas de almacenamiento, un nodo *sink* debe permanentemente estar conectado a la red para que su información siempre esté disponible al resto de los nodos.

## 4.4. Premisas y criterios de movimiento

Las siguientes premisas y criterios establecen las habilidades y funciones de un nodo *móvil*.

a) Estimar distancia de recorrido. Si un nodo *móvil* mantiene una velocidad promedio y esta velocidad es conocida, entonces podrá estimar la distancia recorrida entre dos puntos si lleva un registro del tiempo que le toma desplazarse entre estos puntos.

b) Detectar nodos *virtuales*. Esta premisa es razonable si consideramos que los nodos *móviles* de una red son personas que visualmente pueden detectar estos puntos con el solo hecho de observar su entorno <sup>2</sup>. En la figura 4.3.a se muestra el escenario de la figura 4.2 donde se han agregado nodos *virtuales*. Como podemos observar, la posición de un nodo *estático* como el nodo 4 puede coincidir con la posición de un nodo *virtual*. Detectar nodos *virtuales* permite crear un nuevo árbol de conectividad como el mostrado en la figura 4.3.b y, como veremos más adelante, estos nodos sirven como puntos de referencia para crear el rastro dejado por un nodo *móvil*.

c) Detectar direcciones de movimiento. Un nodo *móvil* puede detectar el número de posibles direcciones de movimiento (NDM) que tiene en cualquier punto de una red. Similar a la premisa anterior, una persona puede determinar visualmente en cuantas diferentes direcciones le es posible moverse.

d) Criterio de Numeración de Direcciones de Movimiento (CNDM). Cuando un nodo *móvil* llega a la posición de un nodo *virtual*, cada dirección de movimiento disponible debe ser numerada. Esta numeración se realiza tomando en cuenta la dirección actual del nodo *móvil* y el sentido en el que giran las manecillas del reloj (CW), donde la

---

<sup>2</sup>El tema de detectar elementos en el entorno de un nodo como puertas está fuera del objetivo de este capítulo. Para detalles de este tema ver [60] donde se propone que los nodos detecten puertas con solo usar información visual modelando éstas con un conjunto de parámetros que caracterizan su forma y apariencia.

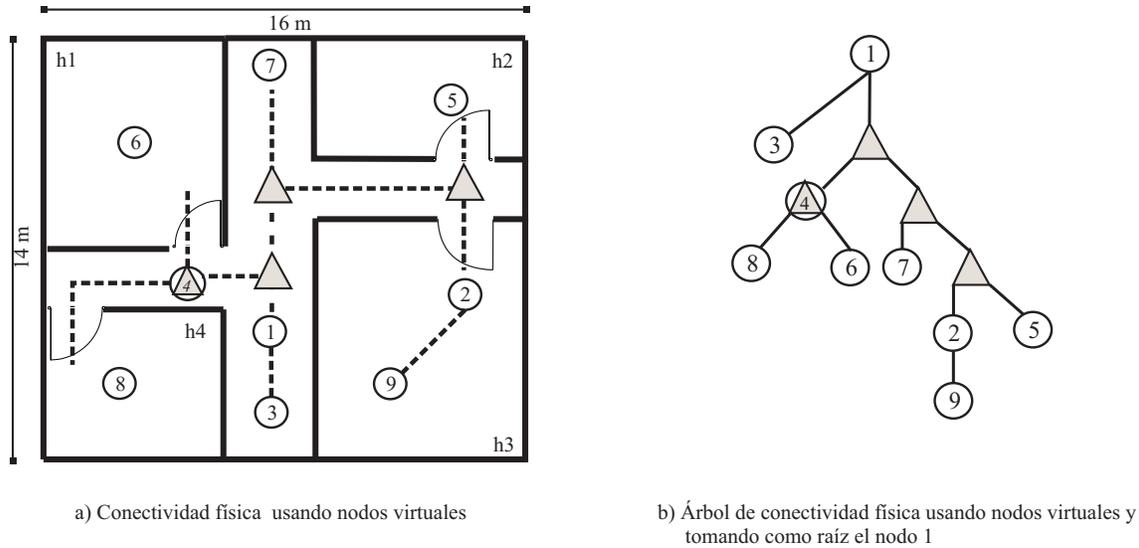


FIGURA 4.3: Conectividad física y árbol de conectividad usando nodos virtuales para una red inalámbrica en interiores

dirección opuesta a la dirección actual del nodo móvil será la opción con el número más alto asignado. En la figura 4.4 se muestran algunos ejemplos donde se empleó este criterio. En esta figura la dirección actual del nodo *móvil* es marcada con una línea continua. Como se puede observar en la figura 4.4.c, la dirección de movimiento actual podría ser no numerada si al llegar a un nodo *virtual* el nodo *móvil* no tiene la opción de continuar con esta dirección.

e) Criterio de Exploración de Habitaciones (CExH). Un nodo *móvil* que recorre un camino  $PCP_{S_i-S_j}$  y actualmente está ubicado dentro de una habitación, puede explorar visualmente las dimensiones de ésta y deducir la distancia máxima que puede recorrer en ella en línea recta. Si además de deducir esta distancia conoce el valor  $t_{S_i-S_j}^{PCP}$  que lo separa del nodo  $S_j$ , entonces puede deducir también si es posible que  $S_j$  se encuentre o no dentro de la misma habitación que él.

f) Encontrar puntos de referencia. Cuando un nodo *móvil* ( $M^k$ ) detecta un nodo *virtual* o se establecen condiciones LOS entre él y un nodo *estático*  $S_i$  ( $t_{M^k S_i}^{LOS}$ ), entonces se considera que  $M^k$  ha encontrado un punto de referencia en la red.

g) Rastro de trayectoria. Cuando un nodo *móvil* encuentra consecutivamente dos puntos de referencia (anterior y actual) en la red, debe registrar los siguientes datos que definen el rastro de trayectoria entre estos puntos.

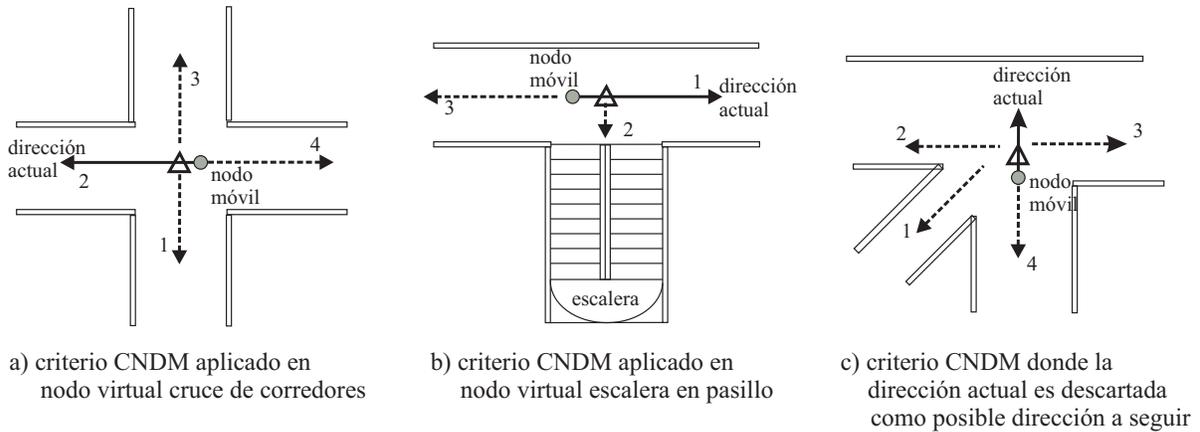


FIGURA 4.4: Criterio CNDM aplicado en nodos virtuales

- i. Nodo  $S_i (i=id)$  o *virtual* encontrado a una distancia  $d$  respecto al punto de referencia anterior.
- ii. El valor de RSSI de la señal del nodo *Destino* aumentó (+) o disminuyó (-) entre el punto de referencia anterior y el actual.
- iii. La dirección seleccionada en el punto de referencia anterior fue aleatoria o tiene algún número de dirección según el criterio CNDM.
- iv. La distancia recorrida entre ambos puntos de referencia.

Como mencionamos anteriormente, se requiere que un nodo *móvil* explore los caminos de un  $PCP_{S_i-S_j}$  para definir en ellos los movimientos necesarios para desplazarse del nodo  $S_i$  al nodo  $S_j$ . Como una premisa de inicio, se considera que el nodo *móvil* se encuentra ubicado cerca del nodo  $S_i$ , detectando en él condiciones de LOS mediante el uso del rango  $LOS-RSSI$ . Bajo estas condiciones, el nodo  $S_i$  representa un primer punto de referencia detectado, y por lo tanto no existen puntos de referencia anteriores. Para este caso de inicio  $M^k$  registra únicamente el *id* de  $S_j$  como rastro de trayectoria de ese nodo. A continuación se detalla el funcionamiento de SIGMA.

## 4.5. Método de guiado SIGMA

En esta sección describimos cómo opera SIGMA, el cual es un método de guiado basado en el monitoreo de parámetros siempre presentes en una red como son el tiempo de recorrido de un nodo *móvil* y el valor RSSI de nodos estáticos en diferentes puntos de

referencia. Estos parámetros permiten a un nodo *móvil* dejar un rastro de su trayectoria que define cómo moverse de un nodo *estático* a otro. SIGMA divide su operación en las siguientes tres fases:

Fase 1. Obtención de ruta óptima.

Fase 2. Exploración de la ruta.

Fase 3. Usar tablas de guiado.

### 4.5.1. Obtención de ruta óptima

Un objetivo fundamental de SIGMA es definir los movimientos que deben seguirse para poder recorrer un  $PCP_{S_i-S_j}$  que conecta al par de nodos  $S_i$  y  $S_j$  (*Origen* y *Destino*, respectivamente), y el cual ha sido previamente descubierto por PhyCon. Para ello, cualquier nodo *móvil*  $M^k$  que desee recorrer este camino deberá consultar el árbol de conectividad del nodo  $S_i$  y usar este árbol como entrada de un algoritmo de minimización de recorrido como Dijkstra [61] para calcular la ruta más corta (óptima) hacia el nodo  $S_j$ . La ruta calculada por Dijkstra puede incluir nodos intermedios según la conectividad física existente en la red, creando una ruta multisaltos como la siguiente:

$$S_i \xrightarrow{t_{S_i-S_m}^{PCP}} S_m \xrightarrow{t_{S_m-S_n}^{PCP}} S_n \xrightarrow{t_{S_n-\dots}^{PCP}} \dots \xrightarrow{t_{\dots-S_j}^{PCP}} S_j$$

donde:

$S_i, S_j$  son los nodos *Origen* y *Destino*, respectivamente.

$S_m, S_n, \dots$  son nodos intermedios.

$t_{S_{i,m,n}-S_{m,n,j}}^{PCP}$  es el tiempo de recorrido entre cada salto descrito en la sección 3.3.2.

El valor  $t_{S_i-S_j}^{PCP}$  se obtiene despejando éste de la fórmula 3.3 como se muestra a continuación, donde  $\alpha$  debe ser definida previamente:

$$t_{S_i-S_j}^{PCP} = (W_{M_{S_i-S_j}^k}^{PCP})^{1/\alpha} \quad (4.1)$$

### 4.5.2. Exploración de la ruta

En la fase anterior se describió cómo obtener la ruta óptima (nodos intermedios y tiempo entre cada salto) para desplazarse de un nodo *Origen* un nodo *Destino*. En esta segunda fase, SIGMA hace uso de un método llamado BPDR (Búsqueda en Profundidad con criterios de Distancia y RSSI), el cual hace que un nodo *móvil*  $M^k$  explore los caminos entre saltos que conectan cada par de nodos de una ruta óptima. Esto es, en caso de que existan nodos intermedios, el nodo *móvil* explorará primero el camino entre el nodo *Origen* y el primer nodo intermedio. Una vez alcanzado este primer nodo intermedio, el nodo *móvil* explorará el camino entre el primero y el segundo nodo intermedio y así sucesivamente hasta explorar el camino entre el último nodo intermedio y el nodo *Destino*. La finalidad de BPDR de explorar estos caminos es detectar en ellos la(s) dirección(es) a seguir que definen cómo recorrer la ruta completa entre los nodos *Origen* y *Destino*.

#### *Búsqueda en Profundidad con criterios de Distancia y RSSI (BPDR)*

Con el fin de describir el funcionamiento de BPDR supondremos el siguiente escenario. En la figura 4.5 tenemos un área en interiores donde están ubicados cinco nodos estáticos ( $S_i, S_j, S_k, S_m$  y  $S_n$ ) y un nodo *móvil*  $M^k$ . En particular, el nodo  $S_i$  representa un nodo *Origen* y se encuentra ubicado sobre el corredor 1, el nodo  $S_j$  representa un nodo *Destino* y está ubicado dentro de la habitación 3, finalmente el nodo  $M^k$  está ubicado al lado derecho de  $S_i$ . Con el fin de ubicar posiciones y direcciones de movimiento hemos marcado 11 puntos en el área con las etiquetas ( $p1, p2, p3, \dots, p11$ ), algunos de estos puntos coinciden con la posición de nodos virtuales marcados con un triángulo. La ruta descubierta por Dijkstra es  $S_i \rightarrow S_m \rightarrow S_n \rightarrow S_j$ . El objetivo es que  $M^k$  explore los caminos adyacentes a  $S_i$  y defina las direcciones de movimiento que le permitan llegar a  $S_j$ . Como condición previa, y como se aprecia en la figura,  $M^k$  no deberá explorar caminos que impliquen recorrer más de 31 metros. Esta condición es debido a que PhyCon define un valor de  $t_{S_i-S_j}^{PCP} = 31s$  garantizando que existe un camino de 31 metros (usando una velocidad de 1 m/s) de recorrido entre  $S_i$  y  $S_j$ , pero cualquier otro camino de otra longitud mayor o menor no está garantizado.

En primera instancia, y para lograr su objetivo,  $M^k$  explorará los caminos físicos adyacentes al nodo  $S_i$  hasta encontrar a  $S_m$ . Una vez encontrado  $S_m$ , explorará los caminos

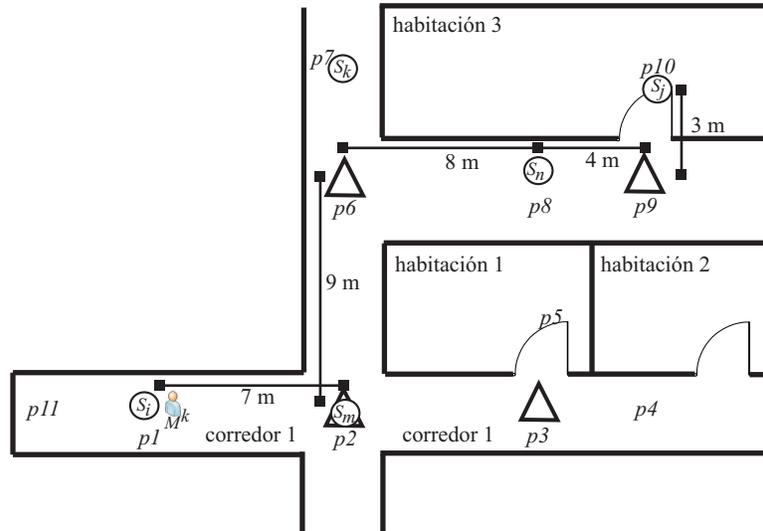


FIGURA 4.5: Escenario en interiores donde se explora el camino entre un nodo *Origen* y uno *Destino*.

físicos adyacentes a  $S_m$  hasta encontrar a  $S_n$  y, finalmente, explorará los caminos adyacentes a  $S_n$  hasta encontrar a  $S_j$ . Como primer paso, y siendo  $S_i \rightarrow S_m$  el primer salto en la ruta (donde  $S_m$  se considera como el nodo *Destino* momentáneo),  $M^k$  identifica cuántas direcciones de movimiento (NDM) existen en su posición actual (posición de inicio). Una vez identificado el valor de NDM,  $M^k$  selecciona una dirección aleatoria, se mueve sobre ella mientras muestrea el valor RSSI de la señal del nodo  $S_m$  y registra la distancia que va recorriendo ( $dist$ ).  $M^k$  se moverá en la dirección seleccionada hasta que una de las siguientes condiciones se cumpla.

*Condiciones de Movimiento:*

- I. El valor RSSI del nodo *Destino* disminuye. Si durante los primeros 5 metros <sup>3</sup> el valor RSSI del nodo *Destino* disminuye a medida que el nodo *móvil* avanza en la dirección seleccionada, entonces éste deberá regresar al punto de referencia anterior (punto donde se inició el último movimiento) y seleccionar una nueva dirección de movimiento. Esta condición se seguirá hasta que el nodo *móvil* haya agotado todas las direcciones de movimiento posibles en ese punto, es decir, haya avanzado en todas las direcciones posibles y el valor RSSI no se haya incrementado. En este

<sup>3</sup>El valor RSSI de una señal WiFi medida en dos puntos ubicados en una misma habitación o corredor y a una muy cercana distancia (1-3 m) entre ellos, no suele variar significativamente para diferenciar un punto del otro. Véase la sección 2.2.4

último caso el nodo *móvil* avanzará hacia cualquier dirección sin importar que el valor de RSSI disminuya.

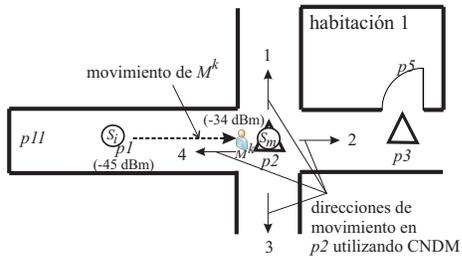
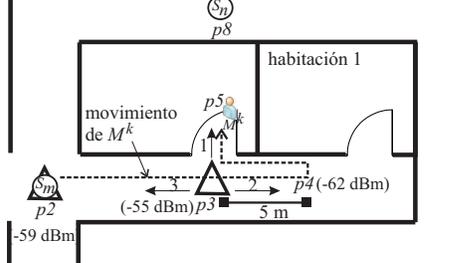
- II. Nodo *Destino* encontrado. Si el nodo *móvil* encuentra al nodo *Destino*, entonces el nodo *móvil* detiene su trayectoria y registra el rastro de trayectoria en ese punto.
- III. Nodo *estático*  $\neq$  nodo *Destino*. Si el nodo *móvil* encuentra un nodo *estático* con un *id* distinto al nodo *Destino* (momentáneo), entonces deberá regresar al punto de referencia anterior y seleccionar otra dirección de movimiento. Esta condición es debido a que en cada iteración BPDR explora los caminos entre dos nodos que se encuentran a un salto en una ruta y, por lo tanto, no existen nodos intermedios. Es decir, se está explorando una ruta equivocada.
- IV. El valor de  $dist > t_{S_i-S_j}^{PCP}$ . Esta condición implica que el nodo *móvil* ha recorrido una distancia mayor que la que corresponde, según PhyCon, para recorrer el salto correspondiente en la ruta. Por lo tanto, el nodo *móvil* deberá regresar al punto anterior y seleccionar una nueva dirección.
- V. Dirección actual bloqueada. Esta condición puede cumplirse cuando la dirección de movimiento seleccionada lleve al nodo *móvil* a un punto en la red donde no pueda continuar su recorrido más que en una dirección opuesta a la actual. Un ejemplo sería la dirección de movimiento del punto *p1* al punto *p11* en la figura 4.5 donde en este último punto existe un final de pasillo. En este caso el nodo *móvil* deberá regresar al punto anterior y seleccionar una nueva dirección de movimiento.
- VI. Nodo *virtual* encontrado. Cuando un nodo *móvil* llega por primera vez a la ubicación de un nodo *virtual*, entonces utiliza el criterio CNDM y registra el rastro de trayectoria en ese punto. Una vez registrados estos datos el nodo *móvil* continuará con su dirección de movimiento actual. En caso de que esta dirección de movimiento no sea posible de seguir (véase un ejemplo en la figura 4.4.c), entonces tomará la dirección de movimiento con el menor valor asignado por CNDM.

Para las condiciones de movimiento *I*, *III*, *IV* y *V*, cuando el nodo *móvil* tiene que regresar a un punto visitado anteriormente por él, y éste es el punto de inicio, entonces la forma de seleccionar la nueva dirección de movimiento es aleatoria. Por otro lado, si dicho punto es un nodo virtual intermedio entre los nodos *Origen* y *Destino*, entonces

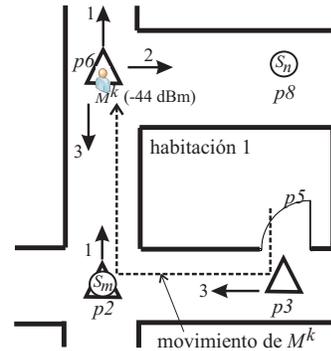
la forma de seleccionar la nueva dirección de movimiento es según el número asignado por CNDM. Esto es, se seleccionará aquella dirección en el nodo virtual con el menor valor asignado y que no haya sido seleccionada antes por el nodo *móvil*.

Las acciones que realiza el nodo  $M^k$  siguiendo las *condiciones de movimiento* antes mencionadas, y que le permiten determinar los movimientos a realizar para llegar de  $S_i$  a  $S_j$ , según el escenario de la figura 4.5, son descritas e ilustradas en la siguiente tabla. Los valores de RSSI medidos en cada punto respecto al nodo *Destino* en turno son mostrados en cada figura adjunta en la tabla.

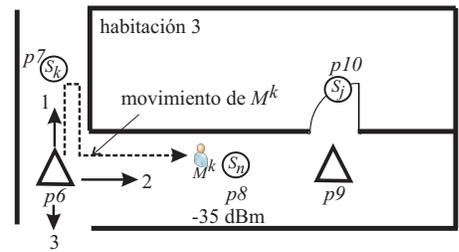
TABLA 4.1: Acciones de un nodo móvil para detectar un camino entre un nodo *Origen* y un nodo *Destino* usando SIGMA.

Acciones del nodo móvil	Movimientos en el escenario
<p><i>paso 1.</i> En el punto <math>p1</math> <math>M^k</math> se mueve aleatoriamente hacia el punto <math>p2</math>, donde las <i>condiciones de movimiento II y VI</i> se cumplen. Por lo tanto, <math>M^k</math> cambia al siguiente salto en la ruta (<math>S_m \rightarrow S_n</math>) siendo ahora <math>S_n</math> el nodo <i>Destino</i> momentáneo. Estando en <math>p2</math> <math>M^k</math> enumera las 4 direcciones de movimiento (usando CNDM) y registra el rastro de trayectoria en ese punto.</p>	
<p><i>paso 2.</i> <math>M^k</math> continúa con su dirección actual hasta llegar al punto <math>p3</math> donde la <i>condición de movimiento VI</i> se cumple. En <math>p3</math> <math>M^k</math> aplica CNDM y registra el rastro de trayectoria. <math>M^k</math>, continúa con su dirección actual hasta llegar al punto <math>p4</math>, donde la <i>condición de movimiento I</i> se cumple. <math>M^k</math> regresa a <math>p3</math> y selecciona la dirección 1 que lo lleva al punto <math>p5</math>.</p>	

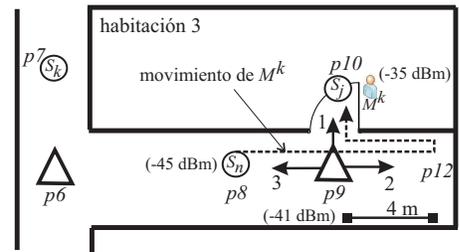
*paso 3.* En  $p5$   $M^k$  aplica CExH y determina que el nodo  $S_n$  no se encuentra dentro de la habitación 1 y regresa al punto  $p3$ , donde selecciona la dirección 3. Esta dirección lleva a  $M^k$  de regreso al punto  $p2$ , donde selecciona la dirección de movimiento con el menor número asignado y no antes seleccionada (dirección 1), llegando así a  $p6$ . En este punto la *condición de movimiento VI* se cumple y  $M^k$  registra el rastro de trayectoria.



*paso 4.*  $M^k$  continúa con su dirección de movimiento actual y llega a  $p7$ , donde la *condición de movimiento III* se cumple. Entonces  $M^k$  regresa a  $p6$  y selecciona la dirección 2, llegando así a  $p8$  donde encuentra al nodo  $S_n$  y registra el rastro de trayectoria en ese punto.



*paso 5.* En  $p8$   $M^k$  cambia al siguiente salto ( $S_n \rightarrow S_j$ ) y continúa con su dirección actual llegando a  $p9$ , donde se cumple la *condición de movimiento VI*.  $M^k$  aplica CNDM en  $p9$  y continúa con su dirección actual pero al llegar a  $p12$  las *condiciones de movimiento IV* y *V* se cumplen. Por lo tanto,  $M^k$  regresa a  $p9$  y selecciona la dirección de movimiento 1. Esta dirección lo lleva al punto  $p10$  donde encuentra al nodo  $S_j$  y registra el rastro de trayectoria final.



### 4.5.3. Usar tablas de guiado

Una vez que un nodo móvil ha recorrido la ruta entre un nodo *Origen*  $S_i$  y un nodo *Destino*  $S_j$  usando el método BPDR, entonces puede guardar el rastro de trayectoria entre estos nodos en una tabla de guiado en el nodo *sink* que se representa usando la siguiente nomenclatura.

$$S_i \xrightarrow[y(m)]{x(\pm)} S_j$$

donde:

$x$  puede tomar los siguientes valores:  $r$ ,  $act$  y  $\{1,2,3,\dots\}$ .  $r$  significa una dirección aleatoria (random),  $act$  significa seguir con la dirección actual y un valor dentro de  $\{1,2,3,\dots\}$  significa el número de dirección de movimiento tomada después de usar el criterio CNDM. El símbolo de (+) o (-) significa que durante el recorrido el valor RSSI del nodo *Destino* se incrementó o disminuyó, respectivamente.

$y(m)$  significa la distancia entre cada salto dada en metros.

Por lo tanto, la ruta del ejemplo anterior en términos de rastros de trayectoria quedaría definida de la siguiente manera:

$$S_i \xrightarrow{\frac{r(+)}{7m}} S_m \Delta \xrightarrow{\frac{1(+)}{9m}} \Delta \xrightarrow{\frac{2(+)}{8m}} S_n \xrightarrow{\frac{act(+)}{4m}} \Delta \xrightarrow{\frac{1(+)}{3m}} S_j$$

Con la definición de recorrido entre los nodos  $S_i$  y  $S_j$ , la ruta inversa ( $S_j \rightarrow S_i$ ) se define siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Cambiar el sentido de cada salto.  $S_j \xrightarrow{\frac{1(+)}{3m}} \Delta \xrightarrow{\frac{act(+)}{4m}} S_n \xrightarrow{\frac{2(+)}{8m}} \Delta \xrightarrow{\frac{1(+)}{9m}} S_m \Delta \xrightarrow{\frac{r(+)}{7m}} S_i$
- 2) Cambiar en cada salto el incremento (+) de RSSI por decremento (-) o viceversa según el caso.
- 3) Asignar la dirección tomada en cada salto y su valor (+ o -) de RSSI al siguiente salto. Bajo esta condición el primer salto usará la dirección aleatoria (r) y el valor (-) de RSSI que tenía el último salto después del paso 2.

De esta manera la ruta  $S_j \rightarrow S_i$  queda definida como:

$$\text{ruta inversa (I)} = S_j \xrightarrow{\frac{r(-)}{3m}} \Delta \xrightarrow{\frac{1(-)}{4m}} S_n \xrightarrow{\frac{act(-)}{8m}} \Delta \xrightarrow{\frac{2(-)}{9m}} S_m \Delta \xrightarrow{\frac{1(-)}{7m}} S_i$$

donde:

El símbolo de (+) o (-) significa que durante el recorrido el valor RSSI de la señal del nodo *Origen* se incrementó o disminuyó, respectivamente. Más adelante en este mismo capítulo se muestra la forma de leer una ruta inversa.

El arreglo matricial que corresponde a la tabla de guiado entre los nodos  $S_i$  y  $S_j$  del ejemplo anterior (incluyendo nodos intermedios y rutas inversas) se muestra en la tabla 4.2. Como podemos observar en esta tabla cada movimiento inicial está definido como aleatorio (r). Esto es debido a que al iniciar cualquier guiado entre nodos no existe un movimiento de referencia previo que permita saber la orientación actual del usuario.

En la tabla 4.3 mostramos un ejemplo de cómo interpretar la información que se almacena en una tabla de guiado. Para este propósito utilizamos la ruta definida entre los nodos  $S_i$  y  $S_j$  del ejemplo anterior.

TABLA 4.2: Tabla de guiado entre nodos

Destino Origen	$S_i$	$S_m$	$S_n$	$S_j$
$S_i$	-	$S_i \xrightarrow{r(+)} S_m$	$S_i \xrightarrow{r(+)} S_m \Delta \xrightarrow{1(+)} S_n$ $\Delta \xrightarrow{2(+)} S_n$	$S_i \xrightarrow{r(+)} S_m \Delta \xrightarrow{1(+)} S_j$ $\Delta \xrightarrow{2(+)} S_n \xrightarrow{act(+)} S_j$ $\Delta \xrightarrow{1(+)} S_j$
$S_m$	$(I) S_m \xrightarrow{r(-)} S_i$	-	$S_m \Delta \xrightarrow{r(+)} \Delta \xrightarrow{2(+)} S_n$	$S_m \Delta \xrightarrow{r(+)} \Delta \xrightarrow{2(+)} S_j$ $S_n \xrightarrow{act(+)} \Delta \xrightarrow{1(+)} S_j$
$S_n$	$(I) S_n \xrightarrow{r(-)} \Delta \xrightarrow{2(-)} S_i$ $S_m \Delta \xrightarrow{1(-)} S_i$	$(I) S_n \xrightarrow{r(-)} \Delta \xrightarrow{1(-)} S_m$	-	$S_n \xrightarrow{r(+)} \Delta \xrightarrow{1(+)} S_j$
$S_j$	$(I) S_j \xrightarrow{r(-)} \Delta \xrightarrow{1(-)} S_i$ $S_n \xrightarrow{act(-)} \Delta \xrightarrow{2(-)} S_i$ $S_m \Delta \xrightarrow{1(-)} S_i$	$(I) S_j \xrightarrow{r(-)} \Delta \xrightarrow{1(-)} S_m$ $S_n \xrightarrow{act(-)} \Delta \xrightarrow{2(-)} S_m$ $S_m$	$(I) S_j \xrightarrow{r(-)} \Delta \xrightarrow{1(-)} S_n$	-

 TABLA 4.3: Acciones a realizar para recorrer una ruta de guiado entre los nodos  $S_i$  y  $S_j$  definida en la Tabla 4.2.

Salto	Acciones
$S_i \xrightarrow{r(+)} S_m \Delta$	seleccionar aleatoriamente una dirección de movimiento la cual al moverse sobre ella se incrementa el valor RSSI de la señal del nodo $S_m$ . Además, se deberá encontrar un nodo virtual después de 7 metros de recorrido donde se encuentra el nodo $S_m$ .
$S_m \Delta \xrightarrow{1(+)} \Delta$	numerar las direcciones de movimiento en $S_m$ según CNDM y seleccionar la número 1. Al moverse sobre esta dirección se debe cumplir el incremento del valor RSSI de la señal del nodo $S_n$ y descubrir un nodo virtual después de 9 metros de recorrido.
$\Delta \xrightarrow{2(+)} S_n$	numerar las direcciones de movimiento según CNDM y seleccionar la número 2. Al moverse sobre esta dirección se debe cumplir el incremento del valor RSSI de la señal del nodo $S_n$ y descubrir éste después de 8 metros de recorrido.
$S_n \xrightarrow{act(+)} \Delta$	continuar con la dirección actual. Al moverse sobre esta dirección se debe cumplir el incremento del valor RSSI de la señal del nodo $S_j$ y descubrir un nodo virtual después de 4 metros de recorrido.
$\Delta \xrightarrow{1(+)} S_j$	numerar las direcciones de movimiento según CNDM y seleccionar la número 1. Al moverse sobre esta dirección se debe cumplir el incremento del valor RSSI de la señal del nodo $S_j$ y descubrir éste después de 3 metros de recorrido.

TABLA 4.4: Acciones a realizar para recorrer una ruta inversa entre nodos

ruta inversa	Acciones a realizar
$(I)S_j \xrightarrow{\frac{r(-)}{3m}} \Delta \xrightarrow{\frac{1(-)}{4m}} S_n$	Estando en $S_j$ seleccionar una dirección aleatoria mientras el valor de RSSI de $S_j$ disminuye. Sobre esa dirección se deberá encontrar un nodo virtual después de 3 metros de recorrido. Una vez encontrado el nodo virtual, numerar en éste las direcciones de movimiento en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj (contrario a como indica CNDM) y seleccionar la número 1 (dirección más a la derecha según la dirección actual). Sobre esa dirección se deberá encontrar al nodo $S_n$ cuatro metros después, mientras que el valor RSSI del nodo $S_j$ disminuye.

Adicionalmente, cuando se trata de una ruta inversa, la forma de interpretar la información de guiado cambia en el sentido de que al llegar a un nodo virtual la numeración de cada posible dirección de movimiento debe hacerse en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj (CCW). Por ejemplo, la forma de interpretar la ruta  $S_j \rightarrow S_n$ , definida en renglón 4, columna 3 de la Tabla 4.2, se muestra en la Tabla 4.4.

Almacenar rastros de trayectoria de nodos *móviles* en una tabla de guiado, así como interpretar esta información de rastros en movimientos, es la forma en la que los nodos *móviles* de una red pueden generar y aprender el conocimiento de cómo recorrer un *PCP* entre nodos estáticos.

El pseudocódigo de BPDR y SIGMA son mostrados al final de este capítulo.

## 4.6. Evaluación de SIGMA

Con el fin de desarrollar la simulación de SIGMA se empleó la herramienta MatLab versión 7.6 para crear un área en interiores de 25 m x 20 m ( $500 m^2$ ). En las figuras 4.6.a y 4.6.b se muestra esta área formada de 4 habitaciones representadas por rectángulos y diversos corredores que las separan. La discontinuidad en el perímetro de cada rectángulo representa la puerta de cada habitación. Para las simulaciones se consideraron dos redes inalámbricas WiFi con distinto número de nodos estáticos desplegados en el área.

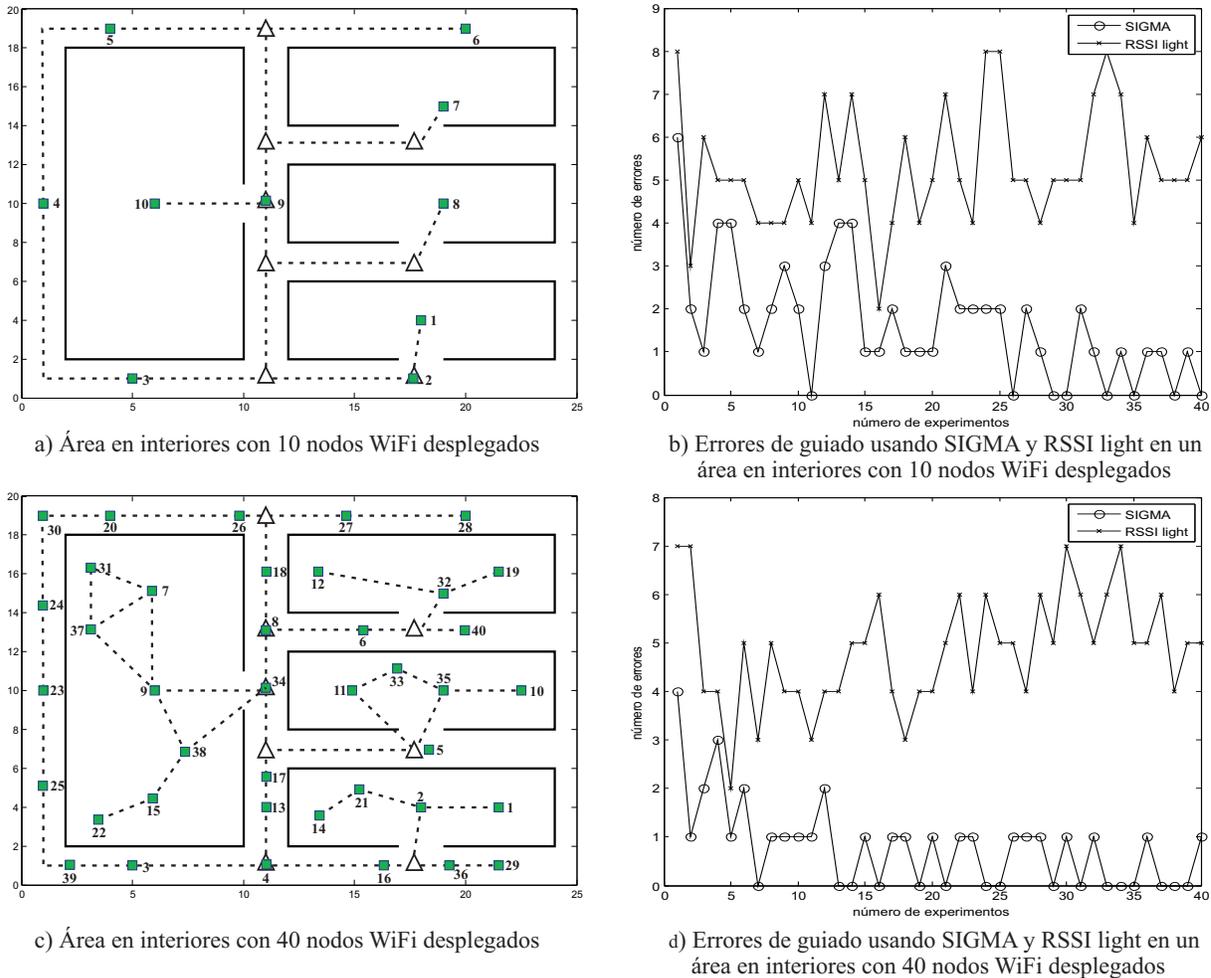


FIGURA 4.6: Experimentos de SIGMA usando dos diferentes densidades de nodos en un área en interiores

La primera red tiene 10 nodos estáticos distribuidos aleatoriamente como se muestra en la figura 4.6.a, donde los nodos pueden ser identificados con un pequeño cuadrado en color gris y un número al lado que representa su *id* en la red. La segunda red se muestra en la figura 4.6.c, donde se desplegaron aleatoriamente 40 nodos estáticos y, de la misma manera que en la primera red, los nodos son identificados con un pequeño cuadrado gris y un número al lado que indica su *id*. En ambas figuras 4.6.a y 4.6.c se pueden apreciar los nodos virtuales (representados por triángulos) y los *PCPs* (en líneas punteadas) descubiertos por PhyCon. Para modelar la señal WiFi de cada nodo se utilizó el modelo de propagación en espacios libres considerando un coeficiente de atenuación según el número de paredes que la señal WiFi tenga que atravesar en línea recta en una conexión entre cualquier par de nodos. La potencia de transmisión de cada nodo

fue de 100 mW. En ambas redes un experimento de simulación consistió en seleccionar aleatoriamente dos nodos estáticos (*Origen, Destino*) y desplazar un nodo móvil sobre el  $PCP_{Origen-Destino}$  utilizando SIGMA, comenzando su desplazamiento en la posición del nodo *Origen*. Durante cada prueba todos los nodos estáticos enviaron tramas *beacon* cada segundo. Se realizaron 40 pruebas para la primera y segunda red, respectivamente.

Los experimentos de simulación se enfocaron en contar el número de veces que el nodo móvil se desvía del  $PCP_{Origen-Destino}$  tomando otra dirección, considerado cada desvío como un error. En cada experimento se grabaron los rastros de trayectoria del nodo móvil si y sólo si el  $PCP_{Origen-Destino}$  no había sido recorrido en un experimento anterior. En este último caso, si un  $PCP_{Origen-Destino}$  o parte de él había sido recorrido previamente, entonces el nodo móvil utilizó la información de guiado pregrabada para recorrer el  $PCP_{Origen-Destino}$ . Con el fin de comparar estos errores con otro método de guiado, se realizaron los mismos experimentos de guiado usando como única fuente de referencia el valor de RSSI de la señal del nodo *Destino* en cada caso. A este último método le llamamos RSSI light. RSSI light se basa en seleccionar una dirección aleatoria y medir si el valor RSSI se incrementa según se avanza en esa dirección y, de ser así, continuar en la misma dirección. En caso contrario se selecciona una dirección diferente hasta que se cumpla el criterio de incrementarse el valor RSSI. En las figuras 4.6.b y 4.6.d se muestran los errores cometidos en cada experimento usando la primera y segunda red con SIGMA y RSSI light, respectivamente. En ambas figuras se muestra que para el caso de RSSI light no existe aprendizaje de las trayectorias hechas por los nodos móviles. Esto es, usando RSSI light el nodo móvil no obtuvo información de otros nodos que hayan hecho el mismo recorrido y que le hubiese permitido cometer menos errores.

Otro punto importante que observamos en las simulaciones es la forma en que afecta la densidad de nodos en el guiado. Como podemos observar en la figura 4.6.b, el número de errores cometido por SIGMA se mantiene en 3 o más durante los primeros 15 experimentos, después se puede observar que los nodos han aprendido las direcciones de movimiento de experimentos previos y el número de errores es menor. En la figura 4.6.d el número de errores durante los primeros 6 experimentos es de 3 o más, después el número de errores decrece nuevamente. Estos últimos datos nos permiten concluir que entre más densidad de nodos exista en la red, mayor será el número de referencias que permitan definir direcciones de movimiento más precisas para el guiado. Aunque los nodos virtuales suelen ayudar a ser referencias de guiado, éstos no tienen un *id* único

que permita diferenciarlos de otros nodos virtuales, caso contrario a las direcciones IP o direcciones MAC de nodos de referencia reales. En el caso de los errores cometidos por RSSI light se puede observar que el número de errores se mantiene alto y constante durante todos los experimentos, esto último es el resultado de no aprovechar el conocimiento de errores de experimentos anteriores. En la tabla 4.5 podemos observar la tabla de guiado que se genera después de ejecutar SIGMA en la primera red propuesta.

## 4.7. Aspectos prácticos de SIGMA

Hay algunos aspectos que deben tomarse en cuenta para que las tareas de guiado usando SIGMA se desarrollen correctamente y de forma dinámica cuando la intervención del usuario es requerida. En particular, consideramos algunos aspectos donde se hace uso de las habilidades y criterios de movimiento que debe realizar un nodo móvil, y que fueron descritos en la sección 4.4.

A diferencia de GUIDE, SIGMA requiere un mayor análisis del entorno de red debido a que la alta densidad de obstáculos que existe en ambientes en interiores dificulta establecer cuál es la ruta física o vía de conexión entre dos nodos. En SIGMA es necesario determinar primero la existencia de una vía de conexión física entre dos usuarios y luego definir la forma de avanzar sobre tal vía. Para realizar tales tareas, SIGMA requiere una mayor participación del nodo móvil que es el encargado de transmitir información al sistema de guiado para que éste obtenga correctamente el rastro de trayectoria de dicho nodo móvil, tal y como se describió en la operación de SIGMA. La información y tareas que el nodo móvil debe transmitir a SIGMA son: a) Indicar su velocidad de movimiento, b) cuando se detectó un nodo virtual, c) indicar cuándo se realiza un cambio de dirección y d) seguir un orden en la selección de posibles direcciones de movimiento. Para facilitar las tareas antes mencionadas de manera que resulte sencillo para el usuario el uso del sistema y se eviten distracciones, se plantea el uso y forma en que dichas tareas pueden ser realizadas por el usuario y transmitidas a SIGMA.



TABLA 4.5: Tabla de guiado generada por SIGMA entre nodos estáticos de una red WiFi (continuación)

Destino Origen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	(I)5 $\frac{r(-)}{12m} \rightarrow$ 4 $\frac{act(-)}{13m} \rightarrow$ 3 $\frac{act(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{7m} \rightarrow$ 2 $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ 1	(I)5 $\frac{r(-)}{12m} \rightarrow$ 4 $\frac{act(-)}{13m} \rightarrow$ 3 $\frac{act(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{7m} \rightarrow$ 2 $\Delta$	(I)5 $\frac{r(-)}{12m} \rightarrow$ 4 $\frac{act(-)}{13m} \rightarrow$ 3	(I)5 $\frac{r(-)}{12m} \rightarrow$ 4	-	5 $\frac{r(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{9m} \rightarrow$ 6	5 $\frac{r(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{3m} \rightarrow$ 7	5 $\frac{r(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta$ $\Delta \frac{1(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{3m} \rightarrow$ 8	5 $\frac{r(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta$	5 $\frac{r(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{3m} \rightarrow$ 10
6	(I)6 $\frac{r(-)}{9m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{7m} \rightarrow$ 2 $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ 1	(I)6 $\frac{r(-)}{9m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{7m} \rightarrow$ 2 $\Delta$	(I)6 $\frac{r(-)}{9m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ 3	(I)6 $\frac{r(-)}{9m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{7m} \rightarrow$ 5 $\frac{act(-)}{12m} \rightarrow$ 4	(I)6 $\frac{r(-)}{9m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{7m} \rightarrow$ 5	-	6 $\frac{r(-)}{9m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{3m} \rightarrow$ 7	6 $\frac{r(+)}{9m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta \frac{1(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{3m} \rightarrow$ 8	6 $\frac{r(+)}{9m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta$	6 $\frac{r(+)}{9m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{3m} \rightarrow$ 10
7	(I)7 $\frac{r(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{7m} \rightarrow$ 2 $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ 1	(I)7 $\frac{r(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{7m} \rightarrow$ 2 $\Delta$	(I)7 $\frac{r(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta \frac{2(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ 3	(I)7 $\frac{r(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{7m} \rightarrow$ 5 $\frac{act(-)}{12m} \rightarrow$ 4	(I)7 $\frac{r(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(-)}{7m} \rightarrow$ 5	(I)7 $\frac{r(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(-)}{6m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{9m} \rightarrow$ 6	-	7 $\frac{r(+)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta \frac{1(-)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{3m} \rightarrow$ 8	7 $\frac{r(+)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{3m} \rightarrow$ 9 $\Delta$	7 $\frac{r(+)}{3m} \rightarrow$ $\Delta \frac{2(+)}{7m} \rightarrow$ $\Delta \frac{1(+)}{3m} \rightarrow$ 10

TABLA 4.5: Tabla de guiado generada por SIGMA entre nodos estáticos de una red WiFi (continuación)

Destino Origen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	$(I)8 \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(+)}$ $2\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)} 1$	$(I)8 \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(+)}$	$(I)8 \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)} 3$	$(I)8 \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $3 \xrightarrow[13m]{act(-)} 4$	$(I)8 \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{1(+)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)} 5$	$(I)8 \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{1(+)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[9m]{1(-)} 6$	$(I)8 \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{1(+)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)} 7$	-	$8 \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(+)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(+)}$	$8 \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(+)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(+)}$ $9\Delta \xrightarrow[5m]{1(+)}$
9	$(I)9\Delta \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)}$ $2\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)} 1$	$(I)9\Delta \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)}$	$(I)9\Delta \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{3(-)}$	$(I)9\Delta \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)}$ $5 \xrightarrow[12m]{act(-)} 4$	$(I)9\Delta \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)}$	$(I)9\Delta \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[9m]{1(-)}$	$(I)9\Delta \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)}$	$(I)9\Delta \xrightarrow[3m]{r(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(+)}$	-	$9 \xrightarrow[5m]{r(+)} 10$
10	$(I)10 \xrightarrow[5m]{r(-)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)}$ $2\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)} 1$	$(I)10 \xrightarrow[5m]{r(-)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)}$	$(I)10 \xrightarrow[5m]{r(-)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{3(-)}$	$(I)10 \xrightarrow[5m]{r(-)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)}$ $5 \xrightarrow[12m]{act(-)} 4$	$(I)10 \xrightarrow[5m]{r(-)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)}$	$(I)10 \xrightarrow[5m]{r(-)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[6m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[9m]{1(-)}$	$(I)10 \xrightarrow[5m]{r(-)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(-)}$	$(I)10 \xrightarrow[5m]{r(-)}$ $9\Delta \xrightarrow[3m]{1(-)}$ $\Delta \xrightarrow[7m]{2(-)}$ $\Delta \xrightarrow[3m]{2(+)}$	$(I)10 \xrightarrow[5m]{r(-)}$ $9$	-

En primera instancia, la velocidad de un usuario puede ser indicada por medio de una interfaz gráfica donde se seleccione previamente la velocidad de movimiento aproximada que se usará, de esta manera SIGMA puede determinar aproximadamente el tiempo que le tomará al usuario moverse una determinada distancia. En segunda instancia, por medio de comandos de voz el usuario puede indicar la detección de nodos virtuales y su selección de trayectoria. La lógica de este hecho es la siguiente: i) cuando un usuario encuentre un nodo virtual donde sea posible seguir con la misma trayectoria, entonces la palabra “continuar” indica a SIGMA que un nodo virtual fue encontrado y el usuario pudo seguir con su trayectoria actual y, ii) cuando un usuario encuentre un nodo virtual y no pueda continuar con su trayectoria actual, entonces la palabra “cambio” indica a SIGMA la detección del nodo virtual y un cambio en la trayectoria. De esta misma forma que se indica a SIGMA la detección de nodos virtuales, es posible indicar cuando el usuario regresa a un punto anterior usando la palabra “regreso”. Basados en esta lógica, SIGMA no requiere que el usuario enumere las direcciones de movimiento en un nodo virtual (criterio CNDM), esta tarea puede ser realizada por SIGMA teniendo un registro del número de veces que un usuario visitó un nodo virtual y cambió de dirección en él. SIGMA sabe que un usuario ha visitado un nodo virtual un cierto número de veces por reconocer el comando de voz “regreso” o porque el mismo SIGMA indicó al usuario regresar cuando un nodo *estático*  $\neq$  nodo *Destino* fue encontrado, cuando el valor de  $dist > t_{S_i-S_j}^{PCP}$  o el valor RSSI del nodo *Destino* disminuyó durante una trayectoria. Con estos tres comandos de voz (“continuar”, “cambio” y “regreso”), las detecciones de nodos estáticos que se realizan por medio del rango  $LOS - RSSI$  y las mediciones de RSSI que se realicen durante el trayecto de un usuario, SIGMA puede llevar a cabo toda la lógica para registrar el rastro de trayectoria de dicho usuario. Finalmente, usando un comando de audio o una interfaz gráfica, es una forma simple de recordar al usuario continuar con una misma trayectoria cuando un nodo virtual sea encontrado por primera vez o seleccionar la dirección más a la izquierda cuando se visita más de una vez un nodo virtual, esta acción permite a SIGMA que el usuario lleve un orden al seleccionar una dirección.

Recordemos que los aspectos antes mencionados sólo se requieren cuando ningún nodo móvil ha dejado rastro de trayectoria de un *PCP* previamente. Una vez que varios nodos móviles han dejado suficientes pistas de *PCPs* en la tabla de guiado, nodos móviles tendrán información precisa para moverse a la posición de otro nodo sin la necesidad de

introducir nueva información a SIGMA.

## 4.8. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se desarrolló y evaluó un novedoso sistema de guiado para redes WiFi en interiores llamado SIGMA. Las bases de este sistema se centran en obtener información en tiempo real del entorno de una red como lo es el número de puntos de bifurcación de un trayecto o el valor de RSSI medido respecto a un nodo en particular, mientras un nodo móvil explora los posibles caminos físicos de un *PCP*. Durante esta etapa de exploración, llamada exploración de la ruta, se vio que la información obtenida por PhyCon permite determinar de forma precisa cuándo se está explorando un camino que no forma parte de un *PCP* y evita, en muchos casos, que se recorran grandes trayectos en una dirección equivocada.

Por otro lado, y como se mencionó anteriormente, una alta densidad de nodos permite que exista un mayor número de referencias las cuales sirven definir e identificar un camino entre nodos. De la misma manera, un alto número de cruces de corredores, puertas, escaleras, acceso a elevadores, etc. en el entorno de una red, sirven como puntos de referencia pero requieren de una mayor logística para identificarlos y diferenciarlos.

---

**Método de guiado SIGMA**

**Entrada:** Nodos *Origen* y *Destino*

**Salida:** Recorrer el camino físico entre *Origen* y *Destino*.

1. Obtner ruta óptima *Origen*→*Destino*.  
ruta[*Origen*,...,*Destino*]= Dijkstra(Árbol de conectividad de *Origen*)
  2. Inicializar valores.  
n=1 Contador de ruta inicializado en uno.  
Dirección actual aleatoria (Dir-Act=random).
  3. a=ruta[n]; b=ruta[n+1]
  4. Consultar si el rastro de trayectoria entre a y b están guardadas en sink  
Movimientos(a,b)= tabla de guiado sink(a,b)  
**if** Movimientos(a,b) ≠ ∅ **then**  
Usar tabla de guiado(a,b) usando como dirección inicial Dir-Act  
**else**  
Explorar entorno de la ruta (a,b) = BPDR(a,b, Dir-Act)  
**end if**  
Dir-Act= Última dirección de movimiento efectuada en paso 4.
  4. n=n+1  
**if** n = *Destino* **then**  
Ruta completada.  
**else**  
Ir a Paso 3  
**end if**
-

---

**Algoritmo BPDR (Búsqueda en Profundidad usando Distancia y RSSI)**

**Entrada:** Nodos: *Origen*, *Destino*, *móvil*. Dirección actual (Dir-Act)

**Salida:** guardar en sink la(s) dirección(es) de movimiento entre *Origen* y *Destino*.

1. Puntos de movimiento del nodo móvil ( $P_i$ ), ( $i= 1$  ubicación del nodo *Origen*).
2. Identificar número de NDM en  $P_1$ .
4. Inicializar contador de direcciones (dir=1)
- 5.

**while** alguna *Condición de Movimiento* no se cumpla **do**

nodo *móvil* se mueve en Dir-Act y muestrea RSSI de la señal de *Destino*.

**end while**

$i=i+1$ ,  $P_i$  = posición actual

6. **switch** *condición de movimiento* **do**

**case** (I).

**if** dir = NDM **then**

Anular *condición de movimiento* I para el punto  $P_i$ .

dir=0.

**end if**

Regresar a  $P_{i-1}$ . Ir al paso 7.

**case** (III,IV,V).

Marcar en  $P_i$  la Dir-Act como no elegible dentro de CNDM.

Regresar a  $P_{i-1}$ . Ir al paso 7.

**case** (VI).

Numerar direcciones de movimiento según CNDM.

Guardar distancia de recorrido actual y valor RSSI de *Destino*.

Continuar con Dir-Act o seleccionar nueva dirección según CNDM.

**case** (II).

Ruta completada.

Guardar datos en sink.

7. dir=dir+1.

**if**  $P_{i-1} = P_1$  **then**

Nueva dirección de movimiento (Dir-Act=random).

**else**

Nueva dirección de movimiento según CNDM (Dir-Act=CNM(dir)).

**end if**

Ir al paso 5.

---

# Capítulo 5

## Conclusiones

Guiado nodo a nodo en ambientes WLAN y ad-hoc es un tema que ha sido poco tratado en la literatura especializada. Sin embargo, en esta tesis se identifican un número de aplicaciones útiles que podrían estar disponibles si dispositivos inalámbricos WiFi tuvieran capacidades de guiado. Dichas aplicaciones pueden ir desde la solución de tareas diarias hasta aquellas de aplicación crítica o de emergencia.

A primera vista puede parecer que las funciones de guiado se pueden incorporar en un dispositivo inalámbrico sólo por medio de hardware especializado, por ejemplo por medio de un GPS. Sin embargo, en esta tesis se ha demostrado que es factible usar dispositivos estándar WiFi con el fin de proporcionar una experiencia de guiado. La solución explorada en esta tesis se basa en el seguimiento de la información en tiempo real sobre el estado de la conexión inalámbrica. Dicha información se puede obtener fácilmente de cualquier interfaz inalámbrica 802.11 a modo de que el sistema descrito pueda ser implementado fácilmente.

En esta tesis se desarrolló y evaluó una propuesta para implementar un sistema de guiado en un dispositivo inalámbrico en redes en exteriores. Este sistema, llamado GUIDE, no requiere infraestructura, sistemas de localización o hardware adicional para operar correctamente. GUIDE hace uso de parámetros del estado del canal inalámbrico como RSSI y SQ que, después de un estudio exhaustivo de su comportamiento en ambientes en exteriores, demostraron tener un uso potencial para funciones de guiado. Utilizando las mediciones de RSSI y SQ que un nodo móvil puede hacer en tiempo real respecto a

un nodo destino, GUIDE basa sus cálculos de guiado determinando un gradiente local de dichos parámetros en la vecindad de dicho nodo móvil. Se demostró que el vector gradiente resultante de estos cálculos permite determinar la dirección en la cual se ubica un nodo destino. En GUIDE se introdujo también un proceso de cuantificación que permite simplificar los cálculos para determinar un vector gradiente cuando éste cae en una determinada región. Para la implementación de GUIDE se desarrolló una aplicación que proporciona información de guiado por medio de indicaciones gráficas y comandos de voz pregrabados que suelen ser fáciles de seguir por los usuarios. Los resultados del desempeño de GUIDE en pruebas de campo y en simulaciones, indican que GUIDE puede calcular direcciones de guiado con buena precisión, sobreponiéndose a fenómenos como desvanecimiento por multitrayecto, desvanecimiento lentos e interferencia.

Vale la pena mencionar que el uso de equipo estándar de comunicaciones WiFi a efectos de medición de parámetros no es una tarea sencilla y tiene varias limitaciones. Además, las mediciones de señal se ven afectadas por el ruido, la interferencia de trayectorias múltiples y la atenuación de la señal debida a las obstrucciones. Todos estos factores hacen que sea necesario tomar varias mediciones y realizar algún proceso para obtener una estimación fiable del parámetro que se está midiendo. Idealmente, se desea que el número de mediciones sea muy bajo y la desorientación tan corta como sea posible. Esto podría ser parte de un trabajo a futuro en este tema. En investigaciones futuras también se puede plantear el estudio de las particularidades de guiado nodo a nodo en redes móviles ad-hoc en exteriores como es el caso de detectar previamente un obstáculo que bloquee un camino antes de calcular una trayectoria.

Respecto al guiado en áreas interiores, en esta tesis se introdujo un nuevo concepto de conectividad llamado conectividad física. Este concepto se define como la condición de existencia de caminos físicos donde los nodos de una red pueden alcanzar físicamente a otros nodos, no sólo en espacios abiertos, sino también a través de recorrer caminos físicos que involucren cruzar puertas, cambiar de dirección, recorrer pasillos, etc. Para detectar conectividad física se introdujo PhyCon, un método capaz de descubrir caminos con conectividad física (*PCP*) entre nodos estáticos usando solo mediciones de RSSI y el comportamiento normal de movilidad encontrado en los nodos de una red inalámbrica en interiores. PhyCon define un rango de valores de RSSI que puede ser alcanzado solamente cuando un nodo móvil pasa lo suficientemente cerca de un nodo estático, estableciendo así temporalmente condiciones de LOS. Se demostró que el intervalo de

tiempo transcurrido entre dos detecciones consecutivas de condiciones de LOS hechas por un nodo móvil permite a PhyCon descubrir *PCP* entre nodos estáticos. En PhyCon se introdujo también un método de optimización para descartar *PCP* con longitudes muy largas y reemplazarlos con *PCP* con longitudes cortas mediante la incorporación de nodos intermedios que cumplen con un criterio de proximidad definido por una gráfica de Gabriel. Los resultados del desempeño de PhyCon en un simulador y en una red WLAN experimental, indican que PhyCon puede detectar un alto porcentaje de *PCP* sin requerir información de referencia previamente conocida como es la localización de los nodos y el mapa de entorno de una red. Como una conclusión podemos decir que el conocimiento de conectividad física o enrutamiento físico se considera como un factor clave para desarrollar aplicaciones como guiado, localización y seguimiento.

Basados en los resultados de PhyCon, en esta tesis se desarrolló un sistema de guiado para redes WLAN 802.11 en interiores bajo el concepto *stigmergy*. Este sistema de guiado, llamado SIGMA, utiliza los *PCP* descubiertos por PhyCon para que sobre ellos puedan generarse rastros de trayectoria de nodos móviles en términos de aciertos y errores que puedan ser usados por otros nodos móviles moviéndose sobre el mismo *PCP*. Estos rastros permiten identificar los movimientos que se requieren para desplazarse de un nodo a otro en la red. Consideramos que los rastros dejados por los nodos móviles hacen de SIGMA un sistema de guiado inteligente. Esta conclusión es debido a que los nodos móviles adquieren un conocimiento de los movimientos adecuados que permiten seguir un *PCP* determinado e interpretan y aplican este conocimiento sobre acciones de movimiento y orientación que les permiten desarrollar funciones de guiado nodo a nodo.

# Apéndice A

## Artículos generados

1. Marco Gonzalez, Javier Gomez, Miguel Lopez-Guerrero, Jose E. Torres-Fernandez and Victor Rangel, GUIDE: Guiding Users in Distributed Environments for WLAN and Ad Hoc Networks. *Networking and Electronic Commerce Research Conference (NAEC 2008)*, Riva del Garda, Italy, 2008 ISBN 978-0-9820958-0-5
2. Marco A. Gonzalez, Javier Gomez, Miguel Lopez-Guerrero, Victor Rangel and Martha M. Montes de Oca. GUIDE-gradient: A Guiding Algorithm for Mobile Nodes in WLAN and Ad-hoc Networks. *Wireless Personal Communications*. Vol.57, no. 4 pp. 629-653, April 2011.
3. Marco A. Gonzalez, Javier Gomez, Francisco Garcia and Victor Rangel. PhyCon: Discovering Physical Connectivity for Indoor WLAN using Mobility. enviado a *Wireless Personal Communications*. Springer.
4. Francisco Garcia, Javier Gomez, Marco A. Gonzalez, Miguel Lopez-Guerrero and Victor Rangel, Ghost : Voronoi-Based Tracking in Sparse Wireless Networks using Virtual Nodes, enviado a *Telecommunications Systems*, Springer.

# Bibliografía

- [1] M. Sirbu, W. Lehr, and S. Gillet. Evolving Wireless Access Technologies for Municipal Broadband. *Government Information Quarterly*. Vol. 23, pp. 480-502, November 2006.
- [2] P. Roshan and J. Leary. 802.11 Wireless LAN Fundamentals. *Cisco Press*. Third Edition, ISBN: 1-58705-077-3, pp. 237-252, March 2005.
- [3] B. Cheng, R. Du, B. Yang, W. Yu, C. Chen, and X. Guan. An Accurate GPS-Based Localization in Wireless Sensor Networks: A GM-WLS Method. *In Proc. of the 40th International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW)*. Taipei, Taiwan. pp. 33-41, September 2011.
- [4] J. Jia, M. Liu, and X. Li. Acoustic Localization Algorithm Using Wireless Sensor Networks. *In Proc. of the Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*. Changsha, Hunan, China, vol. 2, pp. 434-437, October 2009.
- [5] D. Kim, K.H. Hwang, D.H. Lee, and T.Y. Kuc. A Simple Ultrasonic GPS System for Indoor Mobile Robot System using Kalman Filtering. *In Proc. of ROBO-GAMES 2007*. San Francisco, CA, USA, pp. 1-5, June 2007.
- [6] C. H. Ou. A Localization Scheme for Wireless Sensor Networks Using Mobile Anchors With Directional Antennas. *Sensor Journal IEEE*. Vol. 11, no. 7, pp. 1607-1616, July 2011.
- [7] Z. Lei, W. Zhi. Integration of RFID into Wireless Sensor Networks: Architectures Opportunities, and Challenging Problems. *In Proc. of the Fifth International Conference on Grid and Cooperative Computing Workshops*. Washington, DC, USA, pp. 463-469, October 2006.

- 
- [8] G. Fischer, B. Dietrich, and F. Winkler. Bluetooth Indoor Localization System. *In Proc. of The 1st Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC04)*. Hanover, Germany, pp. 147-157, March 2004.
- [9] A. Serra, D. Carboni, and V. Marotto. Indoor Pedestrian Navigation System Using a Modern Smartphone. *In Proc. of the 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI)*. Lisbon, Portugal, September 2010. .
- [10] Google Inc. *Google maps*. Online: <http://www.maps.google.com>, August 2013.
- [11] B. W. Parkinson and J. Spilker. Global Positioning System: Theory and Applications. *Editorial: American Institute of Astronautics and Aeronautics*. Vol. 1, fifth printing, 1996.
- [12] M. H. A. Hamid, A. H. Adom, N. A. Rahim, M. H. F. Rahiman. Navigation of mobile robot using Global Positioning System, and Obstacle Avoidance System with Commanded Loop Daisy Chaining Application Method. *In Proc. of the 5th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications*. Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 176-181, March 2009.
- [13] J. Lobo, P. Lucas, J. Dias, and A. Traca de Almeida. Inertial Navigation System for Mobile Land Vehicles. *In Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Athens, Grece, pp. 843-848, July 1995.
- [14] B. Bingbing, M. Adams, and J. Ibanez. Multi aided Inertial Navigation for Ground Vehicles in Outdoor Uneven Environments. *In Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA 2005*. Barcelona, Spain, pp. 4703-4708, April 2005.
- [15] R. Feliz, E. Zalama, and J. Gomez. Pedestrian tracking using inertial sensors. *Journal of Physical Agents*. Vol. 3, no. 1, pp. 35-43, January 2009.
- [16] Y. Tseng, M. Pan, and Y Tsai. Wireless Sensor Networks for Emergency Navigation. *Journal Computer*. Vol. 39, no. 7, pp. 55-62, July 2006.
- [17] P. Corke, R. Peterson, and D. Rus. Networked Robots: Flying Robot Navigation Using a Sensor Net. *In Proc. of the 11th International Symposium of Robotics Research ISRR*. Siena, Italy, pp. 1-10, October 2003.

- [18] D. Niculescu and B. Nath. Ad Hoc Positioning System (APS) Using AoA. *In Proc. of the 22nd Annual Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM)*. San Francisco, CA, USA, vol. 3, pp. 1734-1743, 2003.
- [19] S. A. Golden and S. S. Bateman. Sensor Measurements for WiFi Location with Emphasis on Time-of Arrival Ranging. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. Vol. 6, no. 10, pp. 1185-1198, October 2007.
- [20] R. Yamasaki, A. Ogino, T. Tamaki, T. Uta, N. Matsuzawa, and T. Kato. TDOA Location System for IEEE 802.11b WLAN". *In Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC05)*. New Orleans, LA, USA, vol. 4, pp. 2338-2343, 2005.
- [21] P. Bahl and V.N. Padmanabhan. Radar: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System. *In Proc. of 19th Annual Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM)*. Tel Aviv, Israel, pp. 7-9, March 2000.
- [22] T. Kitasuka, K. Hisazumi, T. Nakanishi, and A. Fukuda. Positioning Techniques of Wireless LAN Terminals Using RSSI between Terminals. *In Proc. of the International Conference on Pervasive Systems and Computing (PSC-05)*. Las Vegas, NV, USA, pp. 47-53, June 2005.
- [23] J. Bardwell. You Believe You Understand what You Think I Said.. The Truth About 802.11 Signal and Noise Metrics. *Connect 802 Corporation*.
- [24] IEEE Computer Society Sponsored by the LAN/MAN Standards Committee. IEEE Std 802.11a 1999. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc*. Reference ISO/IEC 8802-11:1999.
- [25] M. Lopez-Guerrero and J. Gomez. A Mobility-Based Channel Model For Wireless System With Adaptive Modulation. *In Proc. of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering CCECE 2009*. St Johns, NL, Canada, pp. 750-755, May 2009.
- [26] B. L. Douglas, B. D. Hart, and L. Qian. Radio planning for wlans. *Patente EP1920618A1*. Online <http://www.google.com/patents/ep1920618a1>, May 2008.

- [27] T. C. Henderson and E. Grant. Gradient Calculation in Sensor Networks. *In Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*. Sendai, Japan, vol. 2, pp. 1792-1793, September 2004.
- [28] D. Han, D. G. Andersen, M. Kaminsky, K. Papagiannaki, and S. Seshan. Access Point Localization Using Local Signal Strength Gradient. *In Proc. of the 10th International Conference on Passive and Active Network Measurement (PAM09)*. Seoul, Korea, pp. 99-108, April 2009.
- [29] J. Tourrilhes. Wireless Tools for Linux. *Hewlett Packard*. Online: [http://www.hpl.hp.com/personal/jean\\_tourrilhes/linux/tools.html](http://www.hpl.hp.com/personal/jean_tourrilhes/linux/tools.html), update August 2008.
- [30] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and J. Broch. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks (in Ad Hoc Networking). *Wiley Series on Wireless Communications and Mobile Computing*. Addison-wesley, first edition, chapter 5, pp 139- 172, 2001.
- [31] C. E. Perkins and E. M. Royer. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing. *In Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*. New Orleans, LA, USA, pp. 90-100, February 1999.
- [32] W. Du, L. Fang, and P. Ning. Lad: Localization Anomaly Detection for Wireless Sensor Networks. *In Proc. of IEEE 19th International Parallel and Distributed Processing Symposium*. Denver, CO, USA, pp. 874-886, April 2005.
- [33] V. Yadav, M. K. Mishra, A. Singh, and M. M. Gore. Localization Scheme for Three Dimensional Wireless Sensor Networks using GPS Enabled Mobile Sensor Nodes. *International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN)*. Vol. 1, no. 1, pp. 60-72, December 2009.
- [34] G. Virone, A. Wood, L. Selavo, Q. Cao, L. Fang, T. Doan, Z. He, R. Stoleru, S. Lin, and J. Stankovic. An Advanced Wireless Sensor Network for Health Monitoring. *In Proc. of Transdisciplinary Conference on Distributed Diagnosis and Home Healthcare*. Seattle, WA, USA, pp. 95-100, April 2006.
- [35] D. Koutsonikolas, S. M. Das, and Y. C. Hu. Path Planning of Mobile Landmarks for Localization in Wireless Sensor Networks. *Computer Communications*.

- [36] K. Kim and W. Lee. MBAL: A Mobile Beacon assisted Localization Scheme for Wireless Sensor Networks. *In Proc. of 16th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2007)*. Honolulu, Hawaii, USA, pp. 57-62, August 2007.
- [37] B. H. Chikha, A. Makhlof, and W. Ghazel. Performance Analysis of AODV and DSR Routing Protocols for IEEE 802.15.4 ZigBee. *In Proc. of International Conference on Communications, Computing and Control Applications (CCCA 2011)*. Hammamet, Tunisia, pp. 1-5, March 2011.
- [38] P. Vicaire and Range Free Localization for Wireless Sensor Networks. *Technical Report of University of Virginia*. J. Stankovic. Improvements on Distributed. Vol. cs-2004-35, March 2004.
- [39] Y. Shang, W. Ruml, and Y. Zhang. Localization from Mere Connectivity. *In Proc. of The ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2003)*. Annapolis, MD, USA, pp. 201-212, June 2003.
- [40] L. Gogolak, S. Pletl, and D. Kukolj. Indoor Fingerprint Localization in WSN Environment Based on Neural Network. *In Proc. of 9th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*. Subotica, Serbia, pp. 293-296, September 2011.
- [41] C. Baouche, A. Freitas, and M. Misson. Radio Proximity Detection in a WSN to Localize Mobile Entities within a Confined Area. *Journal of Communications*. Vol. 4, no. 4, pp. 232-240, May 2009.
- [42] R. T. Valadas, A. C. Moreira, C. T. Lomba, A. R. Tavares, and A. M. O. Duarte. The Infrared Physical Layer of the IEEE 802.11 Standard for Wireless Local Area Networks. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 36, no. 12, pp. 107-112, December 1998.
- [43] B. Sohn, J. Lee, H. Chae, and W. Yu. Localization System for Mobile Robot Using Wireless Communication with IR Landmark. *In Proc. of 1st International Conference on Robot Communication and Coordination (ROBO-COMM 2007)*. Athens, Greece, October 2007.

- [44] M. Wylie and J. Holtzman. The Non line of Sight Problem in Mobile Location Estimation. *In Proc. of 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC 1996)*. Cambridge, Mass, USA, pp. 827-831, September-October 1996.
- [45] T. A. Wysocki and H. J. Zepernick. Characterization of the Indoor Radio Propagation Channel at 2.4 GHz. *Journal of Telecommunications and Information Technology*. Vol. 3, no. 4, pp. 84-90, 2000.
- [46] F. Benedetto, G. Giunta, A. Toscano, and L. Vegni. Dynamic LOS/NLOS Statistical Discrimination of Wireless Mobile Channels. *In Proc. of 65th IEEE Vehicular Technology Conference*. Los Angeles, CA, USA, pp. 3071-3075, April 2007.
- [47] H. Hashemi. The Indoor Radio Propagation Channel. *IEEE*. Vol. 81, no. 7, pp. 943-968, July 1993.
- [48] Y. Lustmann, D. Porrat. Indoor Channel Spectral Statistics k factor, and Reverberation Distance. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation Journal*. Vol. 58, pp. 3685-3692, November 2010.
- [49] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy. Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting. *In Proc. of the 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MOBIQUITOUS 04)*. Boston, Massachusetts, USA, pp. 14-23, August 2004.
- [50] K. Gabriel and R. Sokal. A New Statistical Approach to Geographic Variation Analysis. *Systematic Zoology*. Vol. 18, no. 3, pp. 259-278, September 1969.
- [51] G. Lyon. Nmap Free Security Scanner For Network Exploration. [online] available: <http://nmap.org>, 2012.
- [52] M. Pan, C. Tsai, Y. Tseng. Emergency Guiding, and Monitoring Applications in Indoor 3D Environments by Wireless Sensor Networks. *International Journal of Sensor Networks*. Vol. 1, no. 1/2, pp. 2-10, January 2006.
- [53] M. Kiers, W. Bischof, E. Krajnc, M. Dornhofer. Evaluation, Improvements of an RFID Based Indoor Navigation System for Visually Impaired, and Blind People.

- In Proc. of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation 2011*. Guimaraes, Portugal, pp. 91-98, September 2011.
- [54] J. A. B. Link, P. Smith, N. Viol, and K. Wehrle. Footpath Accurate Map-Based Indoor Navigation Using Smartphones. *In Proc. of 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. Guimaraes, Portugal, pp. 1-8, September 2011.
- [55] A. Serra, T. Dessi, D. Carboni, V. Popescu, and L. Atzori. Inertial Navigation Systems for User Centric Indoor Applications. *In Proc. of the Networked and Electronic Media Summit NEM2010*. Barcelona, Spain, October 2010. .
- [56] M. V. Lee, D. Saragas, N. M. Webb, R. Vaz, A. Wyglinski, M. Barry, and S. McGrath. A Novel Indoor Navigation Approach Employing Motion Statistics. *In Proc. of the 72nd Vehicular Technology Conference Fall*. Ottawa, ON, Canada, pp. 1-5, September 2010.
- [57] Mindsmack agency. *FastMall app*. <http://www.fastmall.com>, update August 2013.
- [58] P. Pombinho, A. P. Afonso, M. B. Carmo. Indoor Positioning Using a Mobile Phone with an Integrated Accelerometer, and Digital Compass. *In Proc. of 16th Annual Conference on Professional Information Resources*. Prague, Czech republic, pp. 443-446, May 2010.
- [59] A. Zulfiqar and S. Waseem. Analysis of Routing Protocols in AD HOC and Sensor Wireless Networks Based on Swarm Intelligence. *International Journal of Networks and Communications*. Vol. 3, pp. 1-11, 2013.
- [60] A.C. Murillo, J. Kosecka, J.J. Guerrero, C. Sagues. Visual Door Detection Integrating Appearance, and Shape Cues. *Journal Robotics and Autonomous Systems*. Vol. 56 no. 6, pp. 512-521, June 2008.
- [61] E. W. Dijkstra. A Note on Two Problems in Connection with Graphs. *Numerische Mathematik*. Vol. 1, pp. 269-271, 1959.

# Glosario

- 802.11** Estándar aprobado en 1997 por el Institute of Electrical and Electronics Engineers donde se define la capa de enlace y la capa física de una red inalámbrica que utiliza las bandas comprendidas entre los 2.4 y 5 GHz.
- AoA** Angle of Arrival. Técnica utilizada comúnmente en sistemas de localización que mide el ángulo en el cual una señal es recibida.
- AODV** Ad hoc On Demand Distance Vector. Protocolo de enrutamiento utilizado en redes ad-hoc que trabaja bajo demanda. En este protocolo se utiliza un vector de distancia representado por la dirección del nodo destino y el número de saltos necesario para llegar a él.
- AP** Access Point. Dispositivo en redes de computadoras que interconecta dispositivos que tengan alguna interfaz de red (inalámbrica o de cable) creando una red entre ellos.
- CCW** Counterclockwise. Abreviatura utilizada para referirse a la dirección opuesta al movimiento circular en el que giran las manecillas de un reloj.
- CDF** Cumulative Distribution Function. Función utilizada en probabilidad y estadística para describir la probabilidad de que una variable aleatoria  $X$  tome un valor menor o igual que un valor dado.
- CW** Clockwise. Abreviatura utilizada para referirse a la dirección del movimiento circular en el que giran las manecillas de un reloj.
- DSR** Dynamic Source Routing. Protocolo de ruteo reactivo usado en redes ad-hoc. En este protocolo los nodos almacenan las rutas que se siguieron de eventos pasados.

---

<b>DSSS-PN</b>	Direct Sequence Spread Spectrum with Pseudo-Noise Code. Técnica de modulación que transmite simultáneamente por varias frecuencias diferentes y utiliza un código aleatorio para modular una portadora.
<b>GG</b>	Gabriel Graph. En matemáticas este término se utiliza para referirse a una gráfica plana que expresa una noción de proximidad donde dos vértices son conectados si el círculo asociado con el diámetro que tienen los dos puntos como puntos finales no tiene otro vértice dentro de su circunferencia.
<b>GPS</b>	Global Positioning System. Sistema de posicionamiento global formado por 24 satélites en órbita sobre la Tierra.
<b>ICMP</b>	Internet Control Message Protocol. Protocolo de control de mensajes de Internet. Este protocolo puede enviar mensajes en una red para notificar de posibles problemas al IP de origen.
<b>LOS</b>	Line of Sight. Condición que se refiere a un enlace inalámbrico en donde la señal entre el transmisor y el receptor se propaga sin ningún tipo de obstrucciones.
<b>NLOS</b>	Non-Line of Sight. Condición que se refiere a un enlace inalámbrico en donde la señal entre el transmisor y el receptor es bloqueada parcialmente por algún obstáculo.
<b>PDF</b>	Probability Density Function. Función utilizada para obtener la probabilidad de observar un valor particular de una variable.
<b>PDU</b>	Protocol Data Unit. Forma que adopta una unidad de datos al ser encapsulada por en un nivel de la red durante una transmisión en redes de computadoras.
<b>PHY</b>	Physic. Abreviatura que se utiliza para referirse a la capa física de una red de computadoras.
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator. Valor en un enlace inalámbrico que indica la intensidad de la señal de recepción.

- SOHO** Small Office Home Office. Término utilizado para referirse a las pequeñas oficinas o empleados que trabajan desde su casa. Algunos autores indican que una pequeña oficina se considera cuando ésta tiene menos de 50 empleados. Los equipos de cómputo en este tipo de escenarios son comúnmente conectados mediante el uso de una red LAN.
- SQ** Signal Quality. Abreviatura utilizada para referirse a la calidad de la señal de un enlace inalámbrico. Su valor suele ser expresado en términos de porcentaje.
- TDoA** Técnica utilizada comúnmente en sistemas de localización que mide la diferencia en el tiempo de propagación de una señal de radio entre un transmisor y varios receptores.
- ToA** Técnica utilizada comúnmente en sistemas de localización que mide el tiempo que tarda una señal de radio en viajar de un transmisor a un receptor.
- WiFi** Wireless Fidelity. WiFi Alliance es una asociación internacional sin fines de lucro formada en 1999 para certificar la interoperabilidad de los productos de red de área local inalámbricas basadas en IEEE 802.11.
- WLAN** Wireless Local Area Network. Red de área local donde un conjunto de dispositivos se comunican entre sí mediante emisiones radioeléctricas.
- WSN** Wireless Sensor Network. Red inalámbrica de dispositivos con la capacidad de sensor o medir parámetros como distancia, dirección, humedad, velocidad del viento, temperatura, composición química, la luz, la actividad sísmica, propiedades acústicas, tensión, presión, etc.

# GUIDE-gradient: A Guiding Algorithm for Mobile Nodes in WLAN and Ad-hoc Networks

Marco A. Gonzalez · Javier Gomez ·  
Miguel Lopez-Guerrero · Victor Rangel ·  
Martha M. Montes de Oca

© Springer Science+Business Media, LLC. 2009

**Abstract** Whereas there is a lot of work related to finding the location of users in WLAN and ad-hoc networks, guiding users in these networks remains mostly an unexplored area of research. In this paper we present the concept of node-to-node guidance and introduce a method that can be used to implement it. This method relies on the computation of a local gradient in the neighborhood of the moving node. We named this protocol GUIDE-gradient, which is a GPS-free and infrastructure-free node-to-node guiding system. In this paper we also discuss how the guiding algorithm can be generalized to node-to-node guidance in multihop ad-hoc networks.

**Keywords** Ad-hoc · Gradient · Guidance · RSSI · Signal quality · WLAN

## 1 Introduction

The WLAN IEEE 802.11 (WiFi) standard is one of the great technology success stories of the past decade. Used in research labs a decade ago, WiFi technology is now in a position where it has become as popular as cellular telephony. WiFi has even become the preferred last-mile

---

M. A. Gonzalez (✉) · J. Gomez · V. Rangel · M. M. M. de Oca  
Department of Telecommunications Engineering,  
National Autonomous University of Mexico, Mexico City, Mexico  
e-mail: magsunam@gmail.com

J. Gomez  
e-mail: javierg@fi-b.unam.mx

V. Rangel  
e-mail: victor@fi-b.unam.mx

M. M. M. de Oca  
e-mail: montesdeocacaliz@gmail.com

M. Lopez-Guerrero  
Department of Electrical Engineering, Metropolitan Autonomous University,  
UAM-Iztapalapa, Mexico City, Mexico  
e-mail: milo@xanum.uam.mx

technology of the Internet. Off-the-shelf laptops, PDAs and high-end cellular phones are now usually equipped with WiFi radios. At the same time, metropolitan coverage with WLAN networks is beginning to be deployed, letting WiFi users to roam freely across large areas.

In this paper we consider that the wide availability of WiFi devices enables other possible applications beyond data transmission. We introduce the concept of node-to-node guidance for WiFi equipped devices. Guidance would allow WiFi equipped nodes or users to obtain guiding directions in order to get closer to other WiFi equipped devices. As it will be described below, this concept can be applied to both, WLAN and ad-hoc scenarios.

Guidance, in general, and node-to-node guidance, in particular, remain mostly unexplored areas of research in WLAN and ad hoc networks. Nevertheless, we believe that there are several potentially useful node-to-node guiding applications not available to WiFi users today. For instance, we can consider a user that is currently connected to an access point (AP) at 2 Mbps. Such a user can use a guiding system in order to move closer to the AP and achieve a connection at a higher data rate. In another example, a user printing a document over the air to a WLAN-equipped printer can use a guiding system to get closer to the printer to pick up the print out. Rescue personnel can use a guiding system in order to get closer to a person needing assistance, if that person is carrying a WiFi device. Applications may be as simple as a situation where a WiFi user may just want to get closer to another user.

While in many of these situations the human eye could provide better and simpler guiding means, there are various scenarios where there is a need for an automatic guiding system. For instance, the presence of some obstacles may not allow a user to establish visual contact with another user. In case the target node is not a human but a machine (e.g., APs, robots and printers), the use of an automatic guiding system becomes mandatory. A guiding scenario that requires special attention is the one corresponding to a situation when users are located far away from each other. In this case a large distance may not allow visual contact even when no obstacles are present.

We believe that one reason why there has not been much attention from the research community toward developing guiding systems for WLAN and ad-hoc networks is because developing such systems, from a pure research perspective, appears trivial once a good localization method is available. We argue, however, that most localization systems available today are based on specialized or dedicated infrastructure (e.g., GPS or various APs). This dependency has, in fact, significantly reduced their availability to the larger public since not all mobile devices are currently equipped with global positioning systems, or there might not be enough APs in the area. Furthermore, as it will be detailed below, not all localization systems reported in the literature are suitable to be used as the core of a guiding system.

Before getting into the details of the proposed guiding methods, we now list what we believe should be the desired characteristics of a guiding system in order to make it available to the larger public for both, WLAN and ad hoc networks.

- It should operate with off-the-shelf hardware. In order to avoid extra costs we need a system that does not need extra hardware. In contrast, WiFi is already incorporated in all laptops, most PDAs and many high-end cellular phones.
- It should work everywhere in a distributed fashion. The use of a centralized system cannot be considered because this would limit its availability, fault tolerance and scalability.
- It should minimize the effort needed to reach the target node. By this we mean that the spent time and traveled distance, while closing the distance to the target node, should be the minimum. Ideally, we would like the system to guide users on a rectilinear trajectory pointing directly to the target node.

- It should work with as few as two nodes. We want the guiding system to work even if the moving and target nodes are the only nodes in the network.
- It should require a minimum intervention of the target node. It is desirable that the target node/user remains as passive as possible during the guiding process. Also, there should not be a need to run any extra piece of software in the target node.

GUIDE is a GPS-free and infrastructure-free node-to-node guiding system for WLAN and ad-hoc networks that is built around the desired characteristics described before. Opposite to other potential guiding systems that could be built on top of a localization system, in GUIDE wireless nodes may not know or need to know their absolute location. GUIDE is based on real-time measurements of parameters related to the state of the wireless link. Such readings come from a standard wireless card and are used in order to provide users with real-time instructions about the required changes in direction that need to be applied in order to get closer to the target node. Although various algorithms can be used to obtain guiding directions from link-state measurements, in this paper we focus on a gradient-based method that consistently provided good results. We call this approach GUIDE-gradient.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 presents an overview of different localization systems that could be used in the development of guiding systems. In Sect. 3 we describe the different parameters that can be obtained from a standard wireless card and we also discuss how they can be used in guiding systems. In Sect. 4 we describe GUIDE-gradient and in Sect. 5 we describe its implementation in a Linux box. In Sect. 6 we describe the experiments that were conducted and the obtained results. In Sect. 7 we describe some practical considerations. In Sect. 8 we describe how this work can be generalized to the multihop ad hoc network case. Finally, in Sect. 9, we present our conclusions and ideas for future research.

## 2 Related Work

Beyond GPS-based guidance, which is discussed later in this section, there are not many examples of guiding systems for WLAN and ad-hoc networks in the literature. However, there are various localization systems that could be used as the core of a guiding system. We now review some of these systems.

Angle of Arrival (AoA) is a technique in which a special receiver can measure the angle on which the signal is picked up from a specific transmitter. These measurements typically take place at the base station where arrays of directional antennas can determine the angle of arrival [1].

Time of arrival (ToA) [2] and Time Difference of Arrival (TDoA) [3] estimate distances by measuring the propagation time of a radio wave traveling from the transmitter to the receiver. ToA and TDoA techniques need tight clock synchronization for accurate distance estimation. The fact that propagation times in WLAN are in the order of hundreds of nanoseconds makes it hard to accurately estimate distances using off-the-shelf WLAN hardware (e.g., a one-microsecond discrepancy represents an error of about 300 m).

Localization systems based on distance estimation are based on measurements of received signal strength (RSSI) [4,5]. RSSI measurements are used, in combination with knowledge about transmitted power and a propagation model to estimate the distance between a transmitter and a receiver. Similar to ToA and TDoA techniques, measurements of signal strength from various receivers and triangulation techniques can be used to reduce the uncertainty of the node's location. Generally, the accuracy of these techniques is as good as the propagation

model being used. A drawback of distance-based systems is that the transmitted signal is affected by several factors which are difficult to incorporate in a propagation model. Such factors can be, for instance, diverse obstructions, moving objects, the height and orientation of the antennas, etc. For this reason some proposals for localization systems that are based on received signal strength are based on experimental propagation maps that are obtained beforehand.

The global positioning system (GPS) [6] may appear as the most appealing candidate to implement guiding systems. The GPS system is based on TDoA techniques using various satellites in order to estimate the location of a GPS ground device. Although GPS may be used to implement a highly accurate localization system, it has several drawbacks. First, we need both, the target and moving nodes be equipped with GPS hardware plus a radio link to communicate their coordinates to each other (i.e., cellular or WLAN radios). This fact alone disqualifies GPS for our purposes. Second, GPS receivers substantially increase power consumption in a mobile device. Although it varies according to the manufacturer, a GPS device may continuously drain 50–200 mW from the battery. Finally, GPS remains an add-on device that needs to be bought separately, thus reducing deployment possibilities and increasing costs.

One work worth mentioning is the one recently presented in [7]. In this proposal a mobile node combines both, GPS location data as well as RSSI information in order to estimate the location of an access point. The position estimation is similar to GUIDE-gradient, but its objective and methods are quite different to the system herein described. Furthermore, the use of a GPS device puts this work in a different category compared to GUIDE, which is a GPS-free system.

We observe that guiding solutions based on GPS are not a practical alternative in the context of the node-to-node guiding system that we envision because of various factors. Other techniques based on AoA or experimental propagation maps could provide good and cheap localization, but they require either special hardware or dedicated infrastructure to work properly. Similarly, ToA and TDoA techniques cannot be considered for guiding purposes given the time scale of propagation times in WLAN networks. We conclude that in order to make a guiding system available to the larger public, it is necessary to use off-the-shelf WiFi radios which are already available in many commonly used mobile devices.

### 3 Standard 802.11 PHY Layer Information

#### 3.1 Channel Status Information

In this section we describe different parameters related to the status of the wireless channel and discuss their potential use in the implementation of a node-to-node guiding system. Since we are only interested in using standard WiFi hardware, we review the parameters whose measurements can be obtained from a standard 802.11 wireless card.

**Signal strength.** The energy level observed during the last protocol data unit (PDU) reception is reported by means of a parameter known as received signal strength indicator (RSSI). In the 802.11 standard the only restriction on the RSSI values is that there must be a minimum number of levels ranging from 0 to `RSSI_Max`. This laxity has a number of implications. First, although RSSI is usually a one-byte long parameter (i.e., its value could be somewhere between 0 and 255), chip vendors can choose a convenient value for

RSSI\_Max and in practice the full range is not used. Second, chip manufacturers can also choose an appropriate range of signal strength that will be mapped to the set of RSSI values. Third, the quantization step can also be conveniently chosen and it does not need to be constant along the whole range of RSSI values.

As a consequence of the freedom provided by the standard, RSSI readings coming from different chipsets cannot be compared. However, the intended use of this parameter does not need a specific correspondence between its values and the levels of signal strength. RSSI values do not need to be of fine granularity or high precision either. This is due to the fact that the parameter is used in a relative manner, which is enough to carry out the intended tasks. For instance, one vendor may choose an appropriate RSSI value as a threshold in order to determine whether the channel is clear or not.

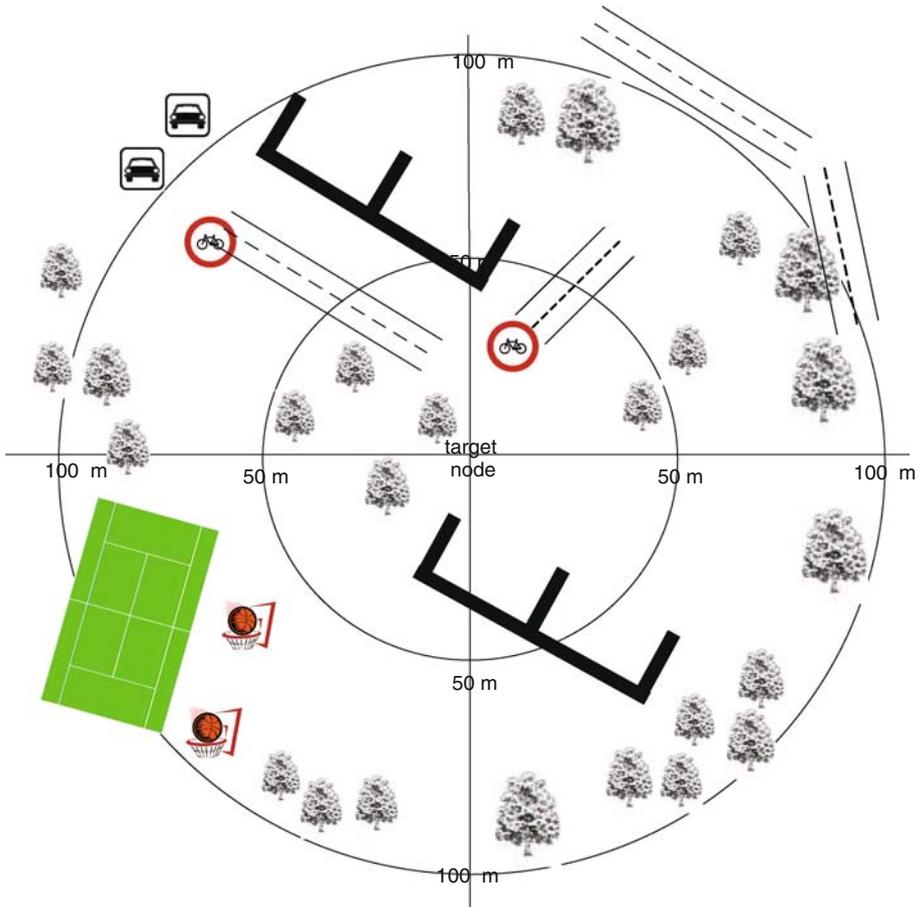
One more issue worth mentioning is that wireless cards are not usually able to measure a signal strength above 1 mW [8]. The rationale behind this design is that although transmit power can be dozens of times higher, this level of signal strength is good enough to provide connectivity at the highest possible data rate. This means that once the card detects 1mW or higher values, it will show 100% signal strength regardless of how stronger the actual signal is.

**Signal quality** Signal quality (SQ) is another metric mentioned in the 802.11 (1999) standard. A precise definition of the term is not provided; but it is specified that SQ is related to the DSSS PN code correlation and its value is updated each time a code lock is achieved. Lack of further specifications means that specific implementation details are likely to differ among different chip vendors. Although the specification given by the standard only applies to the DSSS modulation scheme, wireless cards also report readings of signal quality when they transmit using a different modulation technique. Since implementation details are proprietary information, we can only speculate that those values are related to the average correlation between the transmitted and received symbols. In any case, the lack of precise definitions is not a serious issue since the SQ readings are also used in a relative manner.

**Data rate** The 802.11 standard makes use of adaptive modulation in order to take into account current channel conditions in the transmission process. In this way, high data rates can be achieved at short distances where the signal is strong enough, whereas more-robust-but-lower-rate transmission schemes are used for longer distances. This relation between data rate and distance can help to estimate the relative position of a wireless station. However, each vendor is likely to use different algorithms for rate control so that the association between data rate and distance cannot be generalized for all WiFi chipsets.

### 3.2 Experimental Maps

In order to determine which metric has the highest potential to be used as the core component of the guiding system, we considered important to study the behavior of each metric in the vicinity of a target node. For this purpose, we created detailed maps of the three metrics

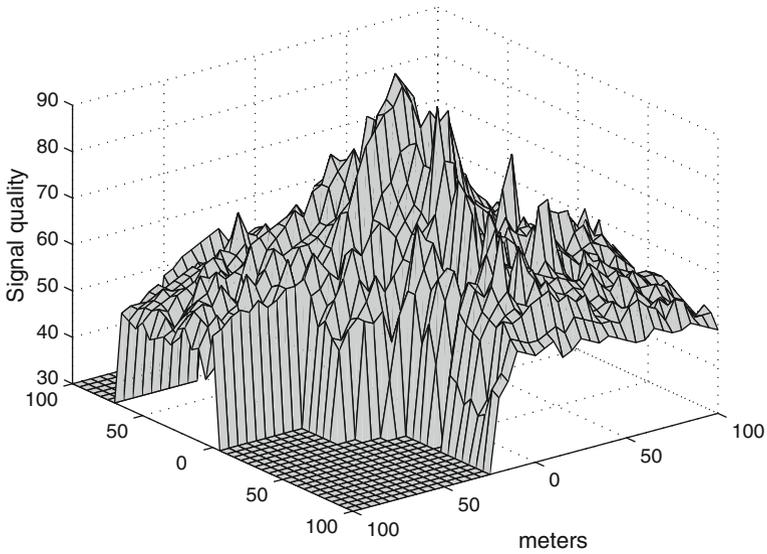


**Fig. 1** Sketch of the experimental area

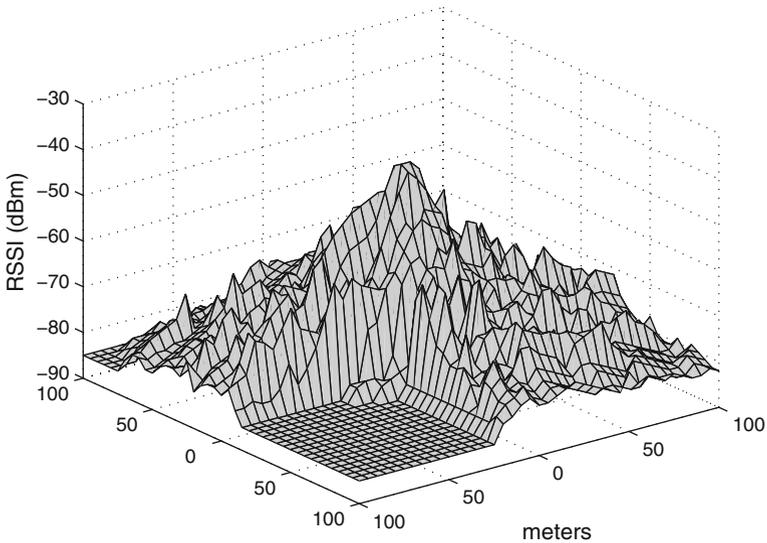
around a target node. The place we selected for these experiments was a semi-open esplanade in our university campus where trees, people and buildings are scattered in the area. Since the propagation maps change depending on the characteristics of each location, the purpose of doing these experiments is only to gather a general look at the guiding problem.

A schematic view of the experimental area is shown in Fig. 1, and an aerial photo in Fig. 13. The two rectangular constructions correspond to two *fronton* courts with thick tall walls. In order to build the associated map for each metric, we positioned the target node (a WiFi equipped laptop) in a central location of the experimental area as shown in Fig. 1. We then positioned a moving node (another user carrying a laptop) at different locations within a square of  $(200 \times 200) \text{ m}^2$  centered at the target node. We took samples every 5 m in order to construct a map for RSSI, signal quality and data rate. Each map consisted of 1,600 measurements taken at different locations of the experimental area. Given the observed variability of each metric, even at the same location, we took several samples of the metric in order to get an average value at each point in the map.

Figures 2, 3, 4 show the resulting maps for signal quality, RSSI and data rate, respectively. The X-Y plane of these figures corresponds to the experimental area and the Z axis to the

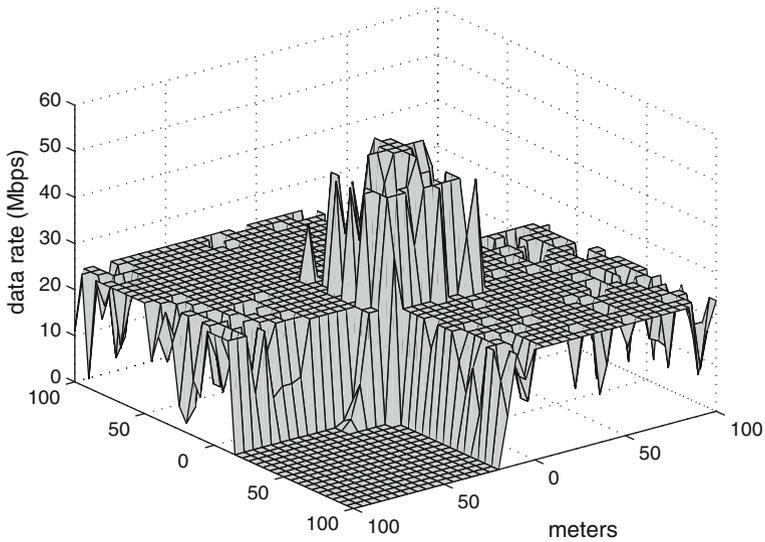


**Fig. 2** Signal quality map



**Fig. 3** RSSI map

value of the metric at each point. For comparison purposes, we selected a 60-unit scale for the vertical axis in all three maps. By looking at Figs. 2, 3, 4 it can be observed that there is some general behavior observed for all three metrics. First of all, they present, as expected, a maximum value of the metric at the location of the target node, and the value of the metric decays as we move away from it. All three maps exhibited blind spots behind the *fronton* walls, where slow fading conditions blocked even the minimum reception.



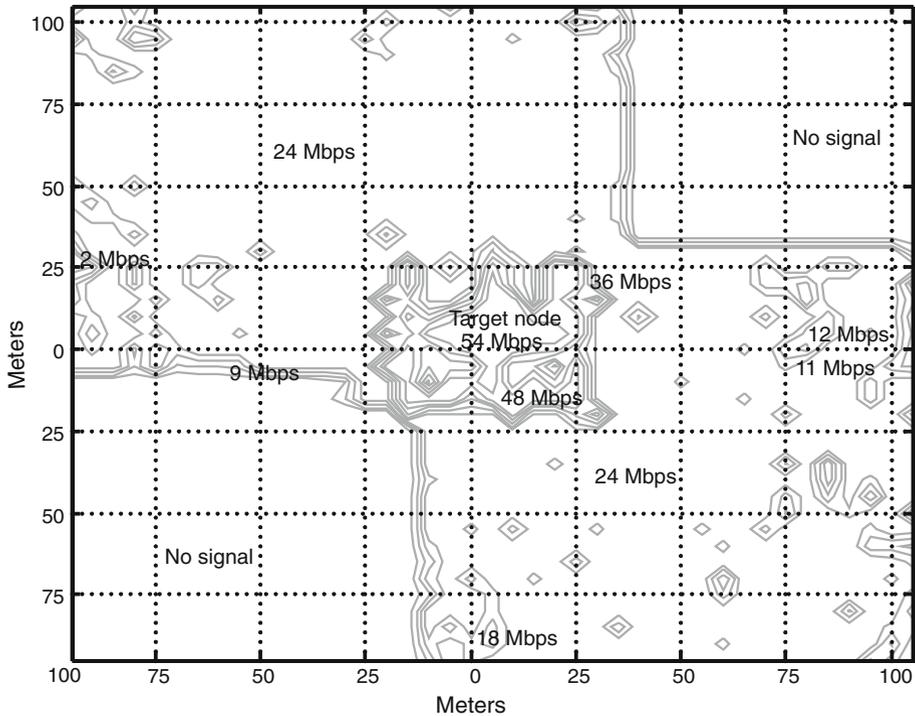
**Fig. 4** Data rate map

We note that unlike RSSI and signal quality maps that look similar to the eye, data rate measurements show large areas where there was no variation in the measured data rate. To highlight this point, we show in Fig. 5 level-like data-rate curves from a top view of the data rate map. This behavior has direct guiding implications because it means that even large movements of the moving node may not translate into changes of the measured data rate, thus providing no new information about in which direction to move. For instance, a node roaming in the 24 Mbps region can potentially walk a long distance before it gets a different data rate reading. Similarly, once a node reaches the 54 Mbps region, it is basically blind and has no other guiding means to get closer to the target node. We consider that after looking at Figs. 4, 5 the observed behavior reduces the usefulness of data rate as a candidate for a guiding system and it will not be considered any further.

Looking now at the maps of signal quality and RSSI shown in Figs. 2, 3 we can observe that they are quite similar, with signal quality having a larger maximum value than RSSI. Both maps show a lot of variability from point to point, and they also present various points with local maximum values. Having a high variability, as we will see later, is helpful for guiding purposes because even small movements result in different readings of the metric, however the presence of local maximums will also turn out to be the most difficult problem to solve in the design of efficient guiding systems.

#### 4 A Guiding Algorithm for WLAN Users

As mentioned before, we consider that a key characteristic of a guiding system to be widely accepted and used by wireless users is that it is built on top of standard hardware. It should not require added hardware or dedicated infrastructure to work properly. At the same time, it should not require significant intervention of the target node and its implementation should not originate extra costs. In this section we describe GUIDE-gradient, a guiding system that is built around all these premises.



**Fig. 5** Experimental propagation map

There might be many ways to tackle the guiding problem. A straightforward one is to use distance estimation and triangulation in order to estimate the target's position. Another approach is to try to determine a vector pointing toward the target node (i.e., a gradient vector). We initially considered both methods, but the gradient-based approach consistently yielded the best results. Consequently, we focus on the gradient-based technique which is fully described and evaluated in the following sections. The interested reader is referred to [9] which contains the description of a guiding method based on distance estimation and some early comparisons with the gradient-based approach.

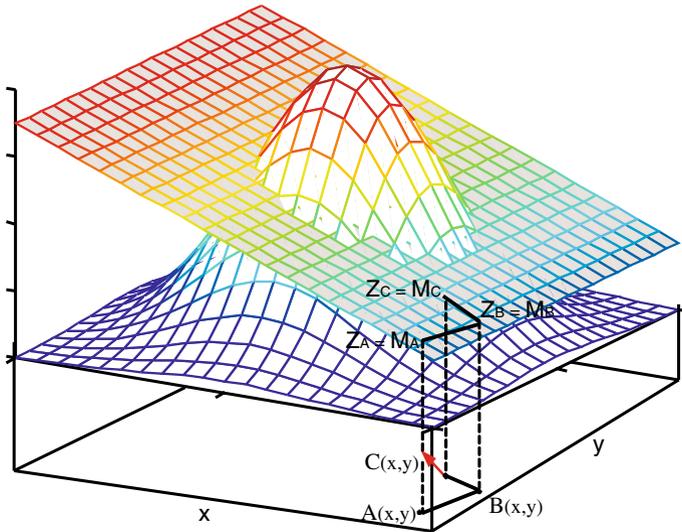
#### 4.1 GUIDE-Gradient

In this section we describe GUIDE-gradient which does not require any localization means to operate.

##### 4.1.1 The Core of the Algorithm

The derivation presented here assumes that the behavior of a proximity criterion (i.e., RSSI or signal quality) can be modeled using a smooth surface, with only one maximum located at the target node's location. At least this model should reasonably hold in open spaces where there are not many obstructions that could produce significant signal reflections.

The basic idea behind GUIDE-gradient is to determine an empirical gradient vector that points towards the position that corresponds to the maximum of the surface. A mobile user



**Fig. 6** Gradient approximation using the last three non-collinear measurements

can use this direction in order to get closer to the target. To this end, there are many possible ways to compute a gradient (e.g., [7, 10]). As it will be explained below, we propose to use three non-collinear measurements in order to compute an approximation of the gradient in the neighborhood of the sampling points. This method is illustrated in Fig. 6 where the shown surface serves for illustration purposes only.

Let us consider a situation where, as a result of its last two movements, the trajectory followed by a mobile has the shape of an equilateral triangle. Let us also consider that measurements of a proximity criterion were taken at its vertexes. Let us denote by  $A = (x_A, y_A)$ ,  $B = (x_B, y_B)$  and  $C = (x_C, y_C)$  the vertexes of the triangle and by  $M_A, M_B$  and  $M_C$  the corresponding measurements. Assume that  $A$  was the initial position and  $C$  the final one. Thus, after two non-collinear movements we have the following three triplets  $(x_A, y_A, M_A)$ ,  $(x_B, y_B, M_B)$  and  $(x_C, y_C, M_C)$ .

In order to determine the gradient vector let us start by considering that in the three-dimensional space  $X$ - $Y$ - $Z$  (dimension  $Z$  corresponds to the measurements) there exists a plane which is completely defined by the three triplets just mentioned. The equation of such a plane in its usual form is given by  $ax + by + cz = 1$ . Solving this equation for  $z$  yields

$$z = \frac{1}{c} - \frac{a}{c}x - \frac{b}{c}y \tag{1}$$

and applying the  $\nabla$  operator results

$$\nabla z = -\frac{a}{c}\hat{i} - \frac{b}{c}\hat{j}. \tag{2}$$

The gradient vector given by (2) points towards the position in the  $X$ - $Y$  plane corresponding to the maximum of the surface. Therefore, it can be used to determine the direction of the next movement. However, in early experiments we realized that it did not make sense to determine this vector with high accuracy since a human would not be able to follow guiding directions below  $30^\circ$  in practice. As a result of this limitation, we decided that it was

not necessary to compute the gradient with such a fine granularity, and we performed the quantization procedure described below.

Let us denote by  $\vec{AB}$ ,  $\vec{BC}$  and  $\vec{AC}$  the displacement vectors considering the movements from  $A$  to  $B$ ,  $B$  to  $C$  and  $A$  to  $C$ , respectively. Let us consider the dot product between the gradient and each one of these displacement vectors, but let us take into consideration only whether the result was positive or negative. As an example, let us review which conditions satisfy the following inequalities,

$$\nabla z \cdot \vec{AB} < 0, \tag{3}$$

$$\nabla z \cdot \vec{BC} > 0 \text{ and} \tag{4}$$

$$\nabla z \cdot \vec{AC} < 0. \tag{5}$$

The gradient will have a positive projection on a displacement vector if the angle between them is in the interval  $[-90^\circ, 90^\circ]$ . Therefore, the solution region to the system of simultaneous inequalities (3)–(5) can be found as the overlapping of three half planes (see Fig. 7). This region contains all gradients that satisfy conditions (3)–(5) and the quantization procedure consists in representing this set with a single quantizing vector. Other conditions regarding the sign of the dot product between the gradient and the displacement vectors lead to other solution regions and other quantizing vectors.

Now consider Inequality (3), it can be expanded as

$$\left(-\frac{a}{c}\hat{i} - \frac{b}{c}\hat{j}\right) \cdot ((x_B - x_A)\hat{i} + (y_B - y_A)\hat{j}) < 0, \tag{6}$$

which can also be written as

$$-\frac{a}{c}(x_B - x_A) - \frac{b}{c}(y_B - y_A) < 0 \tag{7}$$

or

$$\left(\frac{1}{c} - \frac{a}{c}x_B - \frac{b}{c}y_B\right) - \left(\frac{1}{c} - \frac{a}{c}x_A - \frac{b}{c}y_A\right) < 0. \tag{8}$$

From (1) we can observe that (8) is equivalent to the condition  $M_B - M_A < 0$ . Proceeding in a similar way for (4) and (5) we can conclude that the set of inequalities (3)–(5) is equivalent to

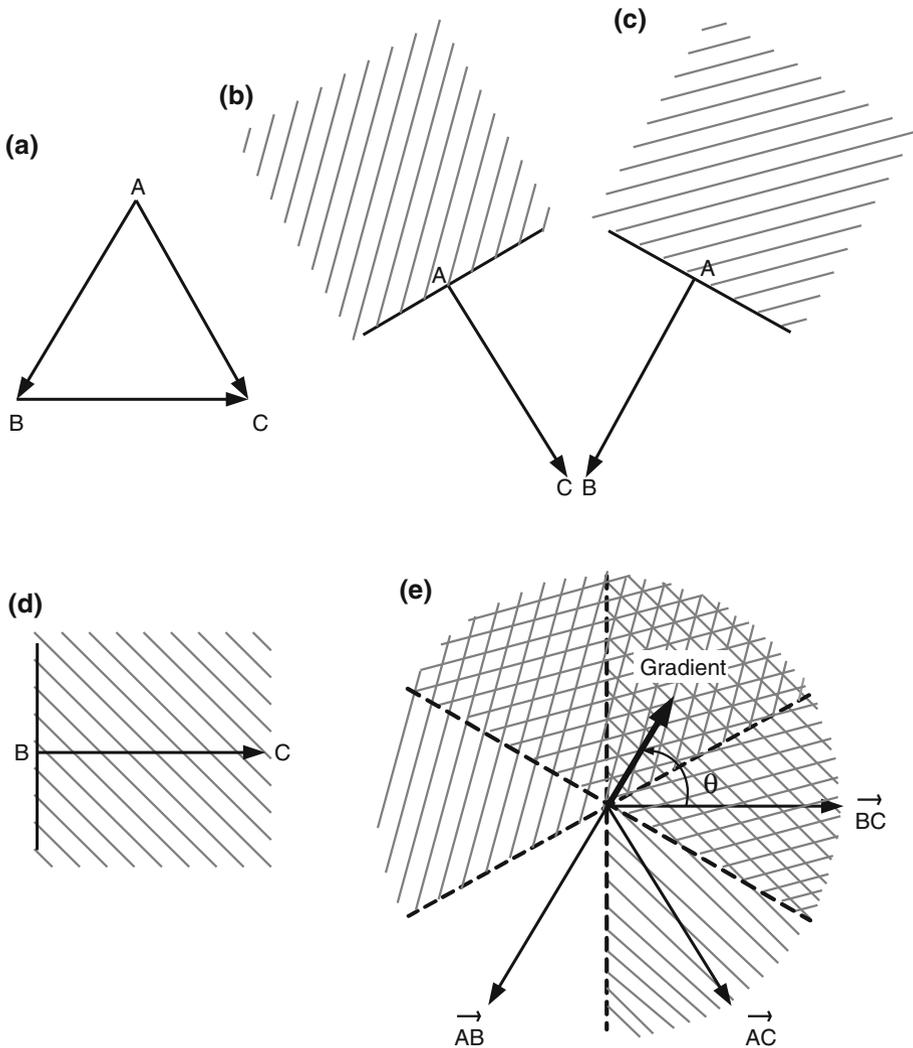
$$M_B - M_A < 0 \tag{9}$$

$$M_C - M_B > 0 \tag{10}$$

$$M_C - M_A < 0 \tag{11}$$

This result enormously simplifies the computations since it implies that we only need to check the sign of three differences in order to determine whether the gradient lies in a region or not. Once the region where the gradient lies is found, the corresponding quantization vector can be assigned.

With the method just described we can obtain a quantized gradient that points towards the maximum. This vector, however, is given in terms of its  $X - Y$  components. It turns out to be more convenient to give the direction of the next movement in terms of the angle between the quantized gradient and the direction of the last movement (which is given by vector  $\vec{BC}$ ). This angle can be easily computed from their dot product, i.e.,

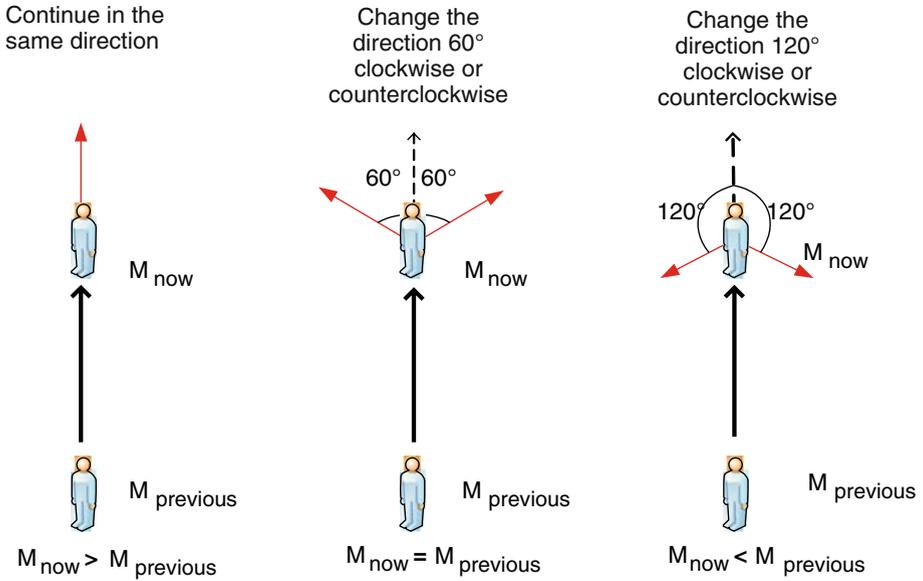


**Fig. 7** **a** Displacement vectors, **b** region  $\nabla z \cdot \vec{AC} < 0$ , **c** region  $\nabla z \cdot \vec{AB} < 0$ , **d** region  $\nabla z \cdot \vec{BC} > 0$  and **e** the solution region and the corresponding quantizing vector

$$\cos \theta = \frac{\nabla z \cdot \vec{BC}}{|\nabla z| |\vec{BC}|} \tag{12}$$

#### 4.1.2 The Guiding Algorithm

We introduce GUIDE-gradient, a guiding algorithm based on the following three basic movements: (a) if after a movement the proximity criterion improved, then the mobile can continue ahead without trajectory changes, (b) if the criterion remained the same, then the mobile is commanded to randomly turn  $60^\circ$  clockwise (CW) or counterclockwise (CCW) and, (c) if



**Fig. 8** Trajectory decisions in GUIDE-gradient. The variables  $M_{\text{now}}$  and  $M_{\text{previous}}$  stand for the current and the previous measurements, respectively

the criterion worsened, then the mobile is commanded to turn 120° and move again in order to create an equilateral triangle (in fact, as depicted in Fig. 10, two triangles can be created) and use the result described in the previous section in order to find the direction of the next movement. Figure 8 illustrates the three situations.

It is worth mentioning that we selected to move 60° when the value of the metric was the same in the current and previous locations, and move 120° when the value of the metric was higher at the current location compared with the previous location. These decisions will create evenly distributed sampling points as illustrated in Fig. 9.

In what follows we describe how all these elements are put into practice in the guiding algorithm.

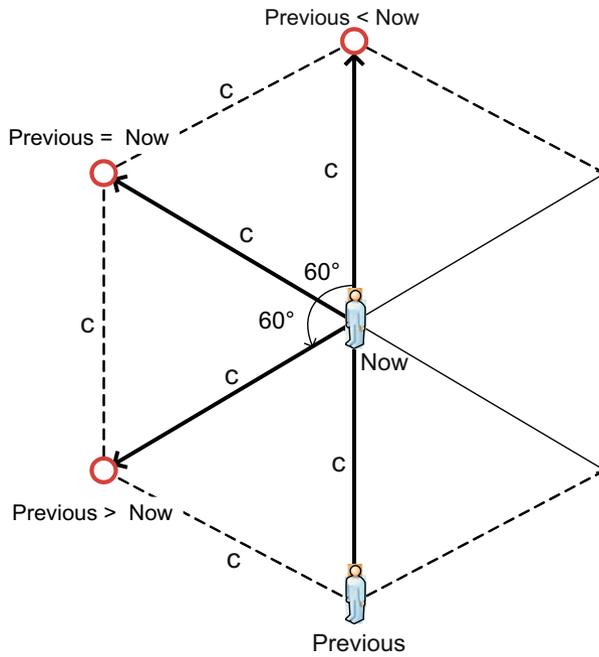
### GUIDE-Gradient Algorithm

#### Initialization.

- Measure  $M_A$ .
- Move straight  $c$  meters in a randomly chosen direction. Measure  $M_B$ .
- Randomly turn 120° CW or CCW. Move straight  $c$  meters. Measure  $M_C$ .
- Use the turning direction selected in the previous step and  $\{M_A, M_B, M_C\}$  in order to find the direction of the next movement by looking up the corresponding entry in Table 1.

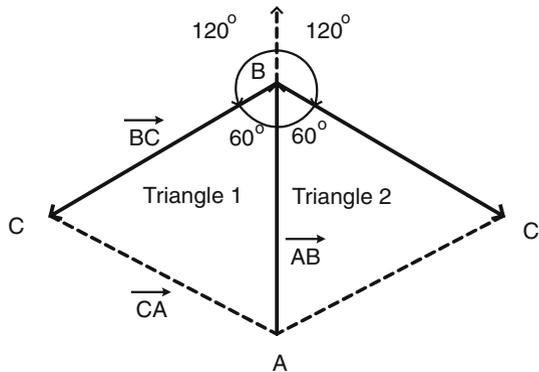
#### Loop:

- Move straight  $c$  meters. Do  $M_A \leftarrow M_B$  and  $M_B \leftarrow M_C$ . Measure  $M_C$ .
- Compare  $M_C$  and  $M_B$ . The following cases are possible:
- Case ( $M_C \geq M_B$ )  
There is no change of trajectory.



**Fig. 9** Spatial distribution of the sampling points

**Fig. 10** Virtual triangles created with three non-collinear measurements



- Case ( $M_C == M_B$ )  
Randomly turn  $60^\circ$  degrees CW or CCW.
- Case ( $M_C \leq M_B$ ):  
Randomly turn  $120^\circ$  CW or CCW. Move straight  $c$  meters. Do  $M_A \leftarrow M_B$  and  $M_B \leftarrow M_C$ . Measure  $M_C$ .  
Determine the new moving direction from Table 1.
- Go back to *Loop* if the target has not been reached.

We implemented the guiding system based on the described algorithm. The corresponding implementation details and experimental results are reported in the following section.

**Table 1** Action at point C

$M_B - M_A$	$M_C - M_B$	$M_C - M_A$	Action
(a) Triangle 1 of Fig. 10*			
+	+	+	60° CW
+	+	-	**
+	-	+	120° CW
+	-	-	180°
-	+	+	0°
-	+	-	60° CCW
-	-	+	**
-	-	-	120° CCW
(b) Triangle 2 of Fig. 10*			
+	+	+	60° CCW
+	+	-	**
+	-	+	120° CCW
+	-	-	180°
-	+	+	0°
-	+	-	60° CW
-	-	+	**
-	-	-	120° CW

\* Notation:  $M_A$ ,  $M_B$  and  $M_C$  denote the value of the metric measured at points  $A$ ,  $B$  and  $C$ , respectively

\*\* These cases never happen, when  $C > B > A$  it is not possible that  $C < A$  and if  $C < B < A$  it is not possible that  $C > A$

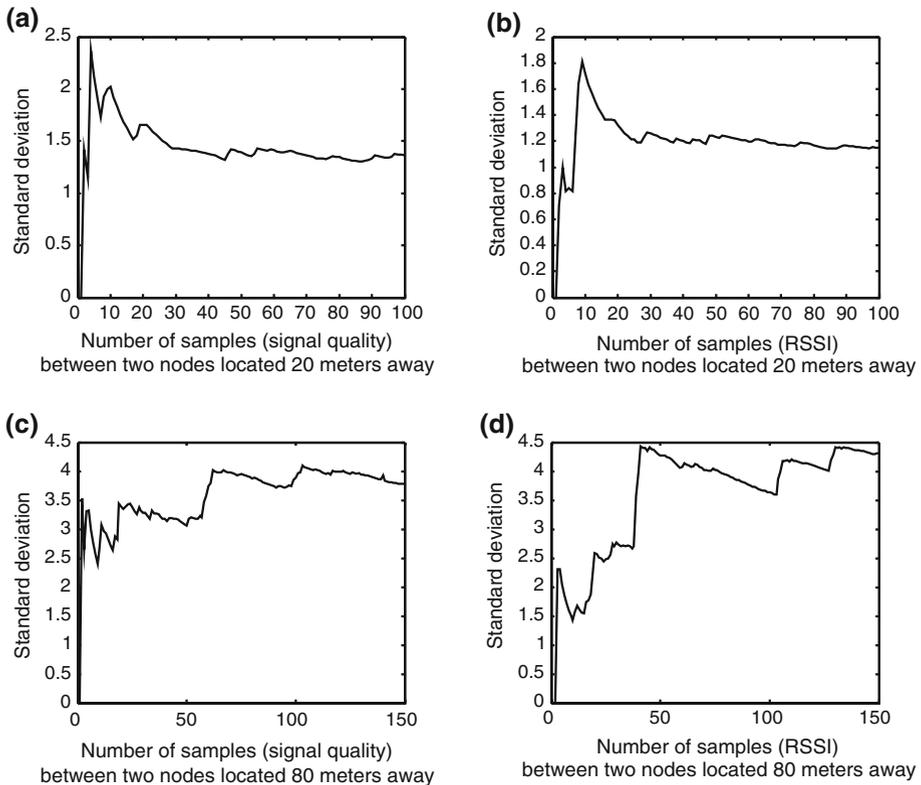
## 5 Implementation of GUIDE-Gradient

For the implementation and testing of the GUIDE-gradient we used a Toshiba Tecra A5 laptop running Ubuntu (kernel 2.6.15-23-386) with an Intel PRO/Wireless 2200BG 802.11 g wireless card. We used Java to implement the application.

GUIDE-gradient makes us of the Linux Wireless Extensions and Wireless Tools [11] to interact with the device driver and retrieve low level information about statistics of the wireless connection (i.e., data rate, signal strength (RSSI) and signal quality), these values are collected by the guiding system at every test point.

Because of slow fading effects we found high variability of the measurements even at the same location. We decided that the guiding system should take several samples at each point until the standard deviation does not change significantly with additional samples. Once the standard deviation stabilizes, we consider the average value of the collected samples to be the representative single value of that test point. We found that the number of samples required for the standard deviation to stabilize was different depending of the scenarios, the distance and the metric being measured. To illustrate this phenomenon we placed two laptops separated by a certain distance and took several samples of signal quality and RSSI. We repeated this experiments for different distances. Figure 11(a-d) show how the time average for the standard deviation converges as the number of samples increases.

Figure 11a, b refer to tests with a 20 m separation using signal quality and RSSI metrics, respectively. For instance, we can observe for both figures that the value of the standard



**Fig. 11** Standard deviation of signal quality and RSSI between two nodes located 20 and 80 m away of each other

deviation begins to be stabilized after 30 samples. So, after that number of samples we can use the average value of the metric as a representative value. When the distance between the two nodes increases, e.g., 80 m, the standard deviation requires more samples before it stabilizes (see Fig. 11c, d). We theorize that this behavior occurs because the increased distance makes the received signal weaker at the receiver, therefore more suitable to be affected by noise, interference, the environment and moving objects.

Although GUIDE-gradient makes several measurements before calculating a new direction, the user does not notice the delay, since these measurements happen within a second or two. Guiding indications are provided to the user by means of graphical indications and prerecorded voice commands. We observed that, for the average user, the indications provided by the system were easier to follow if we used the familiar image of a clock instead of a scale in degrees. In Fig. 12 we provide a snapshot of the graphical user interface. The interface shows an example of a test area of slightly more than 4,000 m<sup>2</sup>.

## 6 Experiments and Results

### 6.1 Real Guiding Experiments

The GUIDE-gradient graphical user interface makes use of a satellite image for illustration purposes only. Such image plays no role in the operation of the system. In all guiding



**Fig. 12** GUIDE-gradient graphical user interface

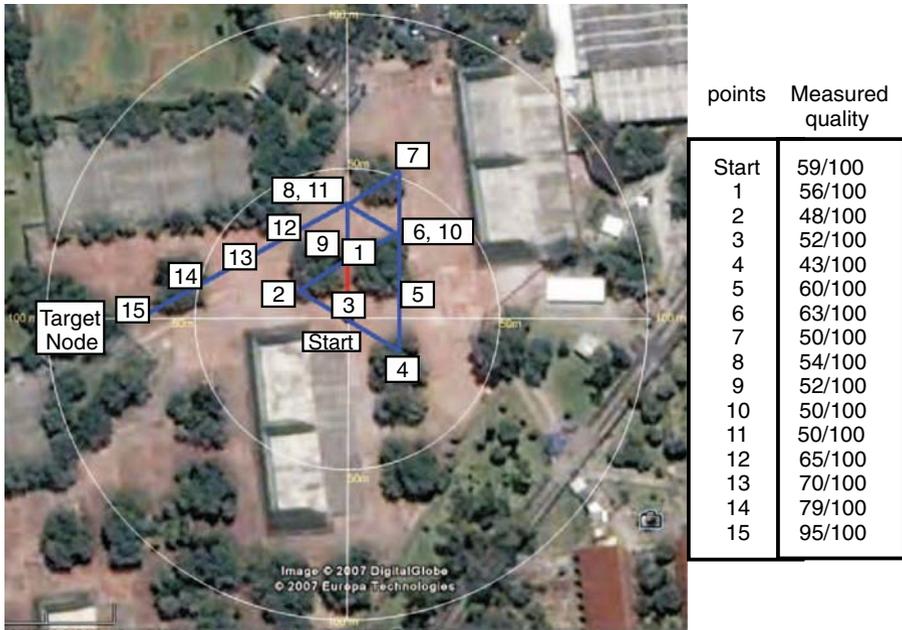
experiments the moving node was initially located at the center of the experimental area and the target node was placed a hundred meters away in an arbitrary position. These points appear in the figures at positions labeled as “Start” and “Target Node” respectively. The distance that the moving node travels between stop points was set to 20 m.

In Fig. 13 we provide an example of the full guiding path while using GUIDE-gradient. In this figure we show the full path followed by the moving node along with the value of the metric measured at each point. In this experiment the user stopped moving when he or she reached a distance of less than 20 m with respect to target node, to mark this stop-point we show a circle around the target node with a 20-m radius. When the program starts, the user must indicate his or her approximate walking speed so that the program can approximately determine the time it takes to move the intended distance.

### 6.1.1 Experiments with GUIDE-Gradient

Figure 13 shows a guiding experiment using the GUIDE-gradient algorithm with signal quality as the metric. It can be observed that even though there are several guiding impairments, after a few movements the guiding system was able to find the target node. For illustrative purposes we detail the trajectory decisions taken by GUIDE-gradient.

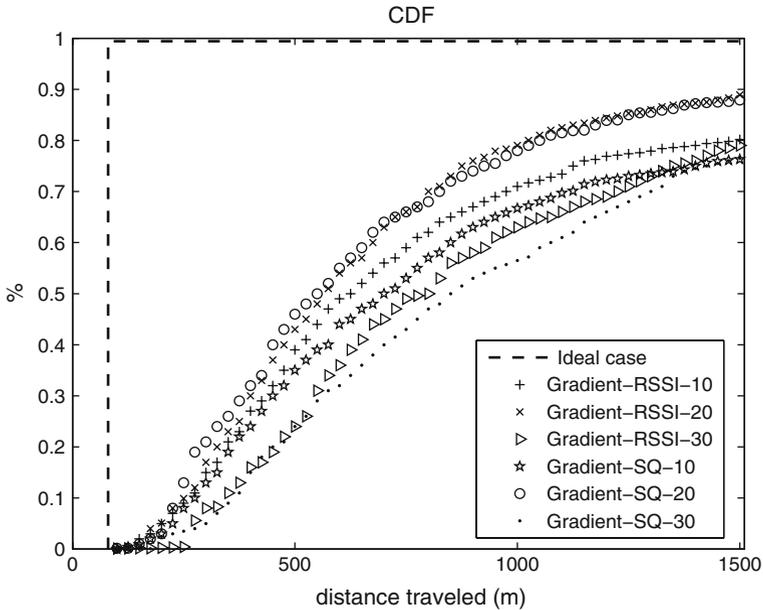
- Start. The node measures a link quality value of 59/100 and (randomly) moves to a direction that corresponds to the top of Fig. 13.
- Point 1. The node measures a link quality value of 56/100 which is worse than the one observed at point 0. Therefore, the node turns 120° counterclockwise (CCW) in this case.
- Point 2. The node measures a link quality value of 48/100. Points 0–2 form an equilateral triangle. According to the rules shown in Table 1, the node turns 120° CCW.
- Point 3. The node measures a link quality value of 52/100, which is better than the one observed at point 2, therefore, the node continues moving along the same trajectory.



**Fig. 13** GUIDE-gradient experiment (link quality)

- Point 4. The node measures a link quality value of 43/100, which is worse than the one observed at point 3. Therefore, the node turns  $120^\circ$  CCW.
- Point 5. The node measures a link quality value of 60/100. Points 3–5 form again an equilateral triangle. As explained before, the local value of the gradient is computed (using Table 1) which makes the node to continue moving along the same direction (turn  $0^\circ$ ).
- Point 6: The node measures a link quality value of 63/100. The node continues moving along the same trajectory.
- Point 7: The node measures a link quality value of 50/100. Therefore, the node turns  $120^\circ$  CCW.
- Point 8: The node measures a link quality value of 54/100. Points 6–8 form an equilateral triangle. According to Table 1 the node turns  $60^\circ$  CCW.
- Point 9: The node measures a link quality value of 52/100. The node turns  $120^\circ$  CCW.
- Point 10: The node measures a link quality value of 50/100. Points 8–10 form an equilateral triangle and according to Table 1, the node turns  $120^\circ$  CCW.
- Point 11: The node measures a link quality value of 50/100. The node changes its direction  $60^\circ$ .
- Point 12–15: link quality in these points continues to get better and better, the node continues moving along the same trajectory eventually reaching the target node within a distance of 20 m.

In Fig. 13 we observe that the moving node manages to get closer to the target node. It is also observed that it moves in circles a few times before heading directly to the target node, this situation could be due to the trees located around the starting position and the presence of local maximums. Both link quality and RSSI measurements are not immune to propagation effects.



**Fig. 14** CDF plots of GUIDE-gradient, 10-m accuracy

### 6.2 Computer Simulations

We used the data shown in Sect. 3.2 in order to simulate the experimental area and, in this way, perform a large number of guiding experiments. In this section we report our results.

Figures 14, 15, 16 show the CDF of the distance traveled by the mobile node before getting within 10, 20 and 30 m of the target node, respectively. In each figure we show different curves with movements of 10, 20 and 30 m for GUIDE-gradient with signal quality and RSSI. For these experiments we drew a circle with a 100-m radius centered at the target node, then we chose points on the circle with a 5 degree separation as the initial departing points of the moving node. For each departing point, we considered 8 different initial trajectories separated 45 degrees. Therefore, each curve represents the results of about 500 different guiding experiments. Because we have some blind areas behind the fronton courts, we could not perform experiments in points located in those areas. In these figures we also illustrate the performance of an ideal guiding system, in which the moving node moves directly to the target node.

In Fig. 14 we show the performance of GUIDE-gradient for a 10-m accuracy. In this figure we found that the best performance was obtained for 20-m movements, while the worst performance corresponds to 30-m movements. For 30-m movements, we found that the mobile node sometimes moved over the target area (a circle with a 10-m radius) between stop points (remember that in our algorithm the mobile node does not take measurements between points). Surprisingly, moving with 20-m steps achieved better performance compared with 10-m steps. We believe that this happens because 10-m steps result in many more intermediate stops during the guidance, where noisy measurements may mislead the guiding algorithm as opposed to moving with 20-m steps.

In Fig. 15 the target area is larger compared with Fig. 14 (i.e., a circle with a 20-m radius). The curves corresponding to 20-m steps obtained the best performance again. The

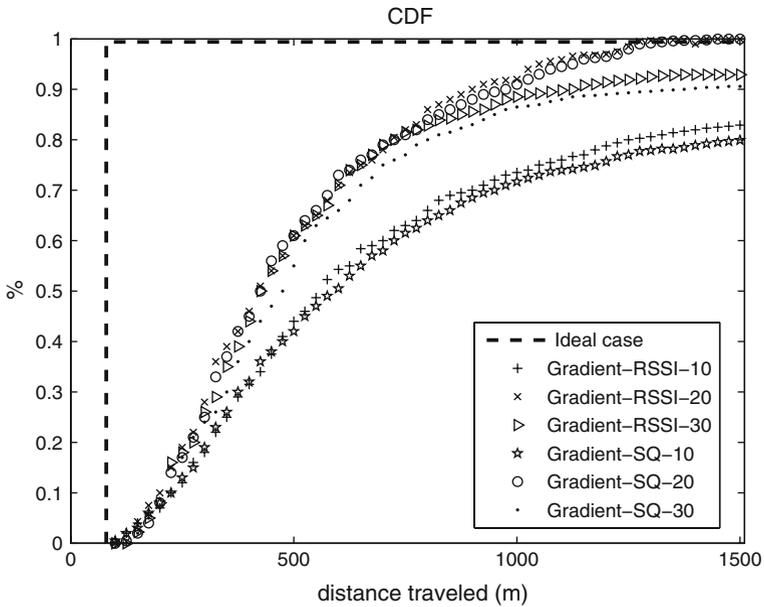


Fig. 15 CDF plots of GUIDE-gradient, 20-m accuracy

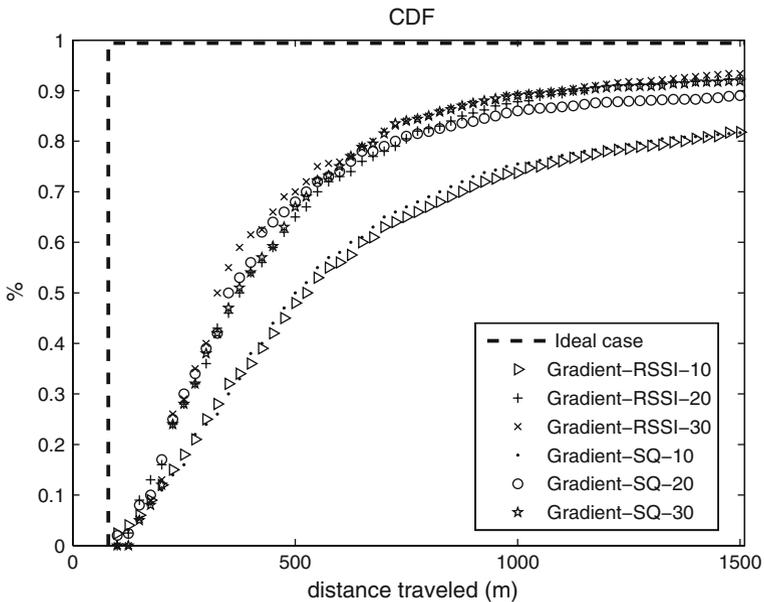


Fig. 16 CDF plots of GUIDE-gradient, 30-m accuracy

curves corresponding to 30-m steps obtained better performance compared with Fig. 14. We believe that this situation occurred mainly because the mobile node over-passed the target area less frequently compared with Fig. 14.

In Fig. 16 we increased the target area to a circle with a 30-m radius. In this figure the curves with steps of 20 and 30 m obtained the best performance, while the curves with 10-m steps obtained lower performance.

Looking at Figs. 14, 15, 16 we conclude that using 10-m steps for GUIDE-gradient with signal quality and RSSI may not be a good design choice. This happens because from point to point, there may not be enough variability of the metric being measured. This, in turn, will create more triangles in the guidance where the mobile node wastes time. Similarly, performance of guiding using large steps improves as the target area becomes similar or larger in size than the step size.

## 7 GUIDE-Gradient Considerations

There are a number of considerations that are taken into account for a correct operation of GUIDE-gradient in some practical situations. In particular, the following two situations are considered in our system.

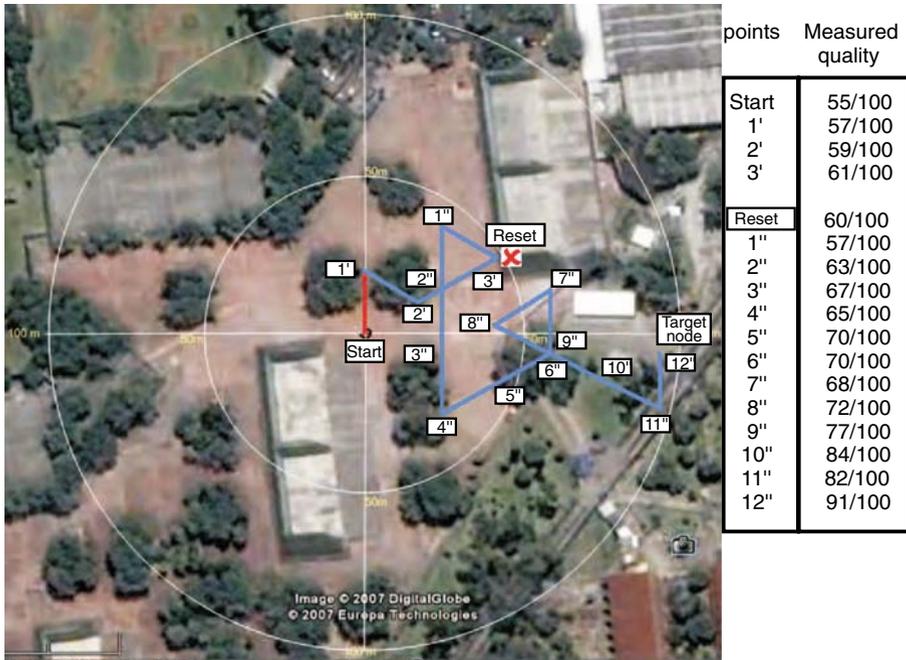
As explained in the operation of GUIDE-gradient, mobile nodes always move along rectilinear trajectories according to the directions given by the system. In open areas, this may not be a difficult task to fulfill, however, in semi-open or indoor areas, obstacles may not allow a user to move along the desired trajectory. For instance, it may happen that a mobile node finds a wall and it is forced to move to one side. Moving along a different trajectory from the one specified by the system clearly misleads the guiding system, since the location estimated by the system and the real location of the user will be different. In such cases it is necessary that the user has a way of telling the system which trajectory is actually using.

In GUIDE-gradient this is done by using the graphical user interface shown in Fig. 12. When an obstacle blocks the user's intended trajectory, the user should come to a stop, click on the Reset option and visually select a new clear trajectory. The Reset option has the effect of restarting the guiding process, keeping no memory of previous movements. In Fig. 17 we show an example of this situation when after reaching point 3, a large building does not allow a user to continue moving forward as indicated by the algorithm. At that point the user stops, resets the algorithm and then starts moving along the chosen trajectory. In Fig. 17 points 1' to 3' and points 1'' to 12'' correspond to two separate and independent attempts to reach the target node.

The second situation is related to what happens if during the guiding process a mobile user loses its link to the target node by moving out of range. This situation will be a common case when the mobile user is located at the edge of the target node's range. In this case we took a simple solution where the mobile user returns to its previous point in case it loses the link with the target node.

## 8 On Node-to-node Guidance in Ad hoc Networks

In this section we comment on how the guiding system can be generalized to multi-hop ad hoc systems. Similar to WLAN technology, so far there has not been significant research related to guiding users in ad hoc networks. In ad hoc networks there may be several intermediate nodes, working as relays in the communication path between the moving and the target node. Figure 18 illustrates an example of a multi-hop route involving two intermediate nodes. While the guiding problem in multi-hop ad hoc networks may appear far more complex than the simpler WLAN (single-hop) problem that we have been addressing, it



**Fig. 17** Example of GUIDE-gradient where an obstacle not allowed to continue the trajectory desired

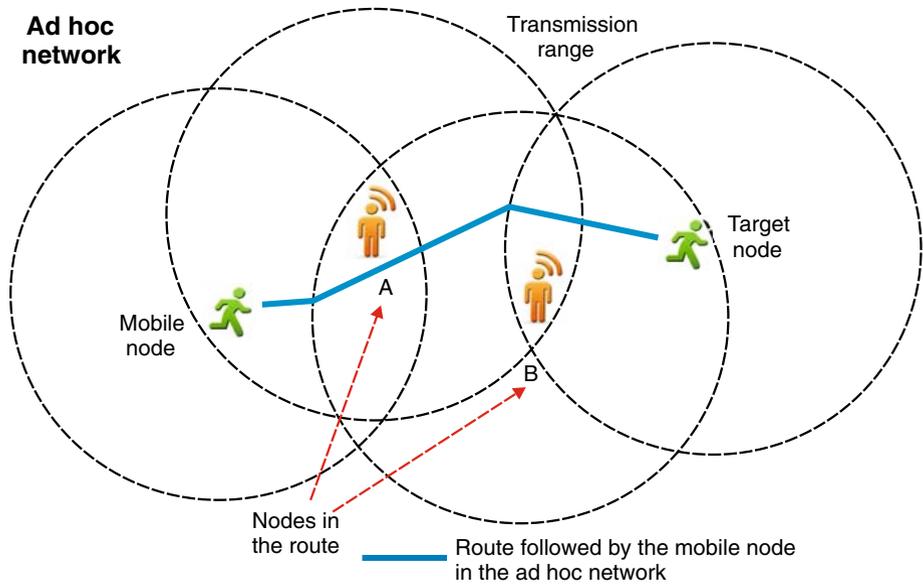
can be easily solved if we split the multi-hop problem in various single-hop pieces. Assuming that a routing protocol can find a route between the moving and the target nodes, the moving node needs only to get closer to the first node in route (node A in Fig. 18) using GUIDE. Upon reaching the first node in route, the moving node now gets closer to the second node and so on until the target node is finally reached.

In a multi-hop context, the moving node needs only to be aware of the identities (i.e., IP or MAC addresses) of the intermediate nodes in the route as it gets closer to the target node. Most routing protocols for ad hoc networks provide such information in different ways. For instance the DSR routing protocol [12] includes the full list of nodes each packet should visit as it travels from source to destination. Distance vector based protocols (e.g., AODV [13]) do not provide the full list of intermediate nodes in routes, but each intermediate node is aware of the identity of the next one in route only. However, this problem can be solved in various ways including the addition of extra signaling or by means of overhearing traffic and figuring it out which node is relaying packets to which other node.

## 9 Conclusions

Node-to-node guidance in WLAN and ad-hoc environments is a research topic that has just been barely addressed by researchers. However, we identified a number of useful applications that would be possible if common wireless devices had such guiding capabilities. We envision many possible applications that range from everyday tasks to critical ones.

At first glance it may seem that guiding functions can be incorporated in a wireless device by means of specialized hardware only. However, in this work we have shown that it is feasible to use standard WiFi devices in order to provide a reasonable guiding experience. The



**Fig. 18** Guiding users in a multi-hop environment

solution explored in this paper is based on monitoring of real time information regarding the status of the wireless link. Such information can be easily retrieved from any 802.11 wireless interface so that the described system can be easily deployed.

We developed and evaluated an approach for implementing a guiding functionality in a wireless device. This approach is based on the computation of local gradient in the neighborhood of the moving node. In fact, in our implementation we used a simplified computation with good results. We found the performance of guiding using larger steps improves as the target area becomes similar or larger in size than the step size.

It is worth mentioning that use of standard WiFi communication equipment for measurement purposes is not a straightforward task and it has several limitations. In addition, signal measurements are affected by noise, multipath interference and signal attenuation due to obstructions. All these factors make it necessary to take several measurements and process them to obtain a reliable estimate of the metric being measured. Ideally, we would like that the number of measurements be very low and the temporal misleading be as short as possible. This is part of our future work in this topic. In future research we also plan to study the particularities of node-to-node guidance in mobile ad hoc networks.

**Acknowledgments** This work was supported in part by research funds from CONACyT grant 47197-Y and PAPIIT grant IN105307.

## References

1. Niculescu, D., & Nath, B. (2003). Ad Hoc Positioning System (APS) using AoA. In *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2003*, San Francisco (Vol. 3, pp. 1734–1743).
2. Golden, S. A., & Bateman, S. S. (2007). Sensor measurements for WiFi location with emphasis on time-of-arrival ranging. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(10), 1185–1198.

3. Yamasaki, R., Ogino, A., Tamaki, T., Uta, T., Matsuzawa, N., & Kato, T. (2005). TDOA location system for IEEE 802.11b WLAN. In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC05)* (Vol. 4, pp. 2338–2343).
4. Bahl, P., & Padmanabhan, V. N. (2002). Radar: An in-building RF-based user location and tracking system. In *Proceedings of IEEE INFOCOM 2002* (pp. 7–9). Tel Aviv, Israel.
5. Kitasuka, T., Hisazumi, K., Nakanishi, T., & Fukuda, A. (2005). Positioning techniques of wireless LAN terminals using RSSI between terminals. In *Proceedings of the 2005 International Conference on Pervasive Systems and Computing (PSC-05)* (pp. 47–53). Las Vegas, Nevada, USA.
6. Parkinson, B. W., & Spilker, J. J. Jr. (1996). *Global positioning system: Theory and application*. American Institute of Astronautics and Aeronautics.
7. Han, D., Andersen, D. G., Kaminsky, M., Papagiannaki, K., & Seshan, S. (2009). Access point localization using local signal strength gradient. In S. Moon & R. Teixeira (Eds.), *Network measurement, LNCS 5448* (pp. 91–100). Berlin, Heidelberg: Springer.
8. Bardwell, J. (2004). You believe you understand what you think I said...—the truth about 802.11 signal and noise metrics. Connect 802 Corporation, white paper.
9. Gonzalez, M., Gomez, J., Lopez-Guerrero, M., Rangel, V., & Torres-Fernandez, J. E. (2008). GUIDE: Guiding users in distributed environments for WLAN and Ad hoc networks. In *Networking and Electronic Commerce Research Conference 2008*, ISBN: 978-0-9820958-0-5. Riva del Garda, Italia.
10. Henderson, T. C., & Grant, E. (2004). Gradient calculation in sensor networks. In *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 1792–1793). Sendai, Japan.
11. Tourrilhes, J. (2008). Wireless tools for Linux, Hewlett Packard, date of last update: January 16, 2008, date of consultation: July 14, 2008, from <http://hpl.hp.com/personal/Jean-Tourrilhes/Linux/Tools.html>.
12. Johnson, D. B., Maltz, D. A., & Broch, J. (2001). DSR: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks. In C. E. Perkins (Ed.), *Ad Hoc networking* (Chap. 5, pp. 139–172). Boston, MA: Addison-Wesley.
13. Perkins, C. E., & Royer, E. M. (1999). Ad hoc on-demand distance vector routing. *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (pp. 90–100). New Orleans, LA.

## Author Biographies



**Marco A. Gonzalez** received the B.Sc. in Computer Engineering and the M.Sc. in Computer Engineering from the National Autonomous University of Mexico (UNAM). He has worked as project coordinator in the design and implementation of cross connection solutions for LAN, ISDN, Frame Relay, ATM and xDSL technologies. He is currently a Ph.D. student at UNAM.



**Javier Gomez** received the B.Sc. degree with honors in Electrical Engineering in 1993 from the National Autonomous University of Mexico (UNAM) and the M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering in 1996 and 2002, respectively, from Columbia University and its COMET Group. During his Ph.D. studies at Columbia University, he collaborated and worked on several occasions at the IBM T.J. Watson Research Center, Hawthorne, New York. His research interests cover routing, QoS, and MAC design for wireless ad hoc, sensor, and mesh networks. Since 2002, he has been an Assistant Professor with the National Autonomous University of Mexico. Javier Gomez is member of the SNI (level I) since 2004.



**Miguel Lopez-Guerrero** received his B.Sc. with honors in Mechanical—Electrical Engineering in 1995 and the M.Sc. with honors in Electrical Engineering in 1998, both from the National Autonomous University of Mexico. He received his Ph.D. in Electrical Engineering from the University of Ottawa in 2004. Currently, he is an Associate Professor with the Metropolitan Autonomous University (Mexico City). His areas of interest are medium access control, traffic control, and traffic modeling.



**Victor Rangel** obtained his Bachelor Degree in Computer Engineering from the National Autonomous University of Mexico (UNAM). He obtained his Master Degree in Data Communication Systems and his doctoral degree in Telecommunications Engineering from the Centre for Mobile Communications Research, The University of Sheffield (England). His Ph.D. thesis focused on the modeling and analysis of Cable TV networks supporting broadband Internet traffic. Dr. Rangel is currently a professor at the Department of Telecommunications Engineering, School of Engineering (UNAM).



**Martha M. Montes de Oca** received her B.Sc. with honors in Informatics and the M.Sc. in Computer Engineering from the National Autonomous University of Mexico (UNAM). She has worked as Servers and Network Manager and Programmer Senior. He is currently a Ph.D. student at UNAM.