



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROPUESTA DE UN MÉTODO BASADO EN MOVILIDAD PARA  
LA UBICACIÓN DE EQUIPOS EN UNA RED INALÁMBRICA**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

**INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES**

**P R E S E N T A:**

**ING. VERÓNICA PATRICIA BONILLA GONZÁLEZ**



**TUTORES:  
DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS  
DR. MICHAEL PASCOE CHALKE**

**2012**

**JURADO ASIGNADO:**

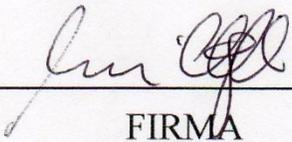
Presidente: Dr. Escalante Ramírez Boris  
Secretario: Dr. Benítez Pérez Héctor  
Vocal: Dr. Gómez Castellanos Javier  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Pascoe Chalke Michael  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. López Guerrero Miguel

Lugar o lugares en donde se realizó la tesis:

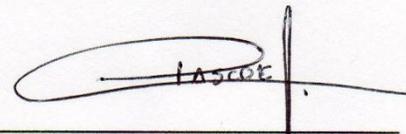
Ciudad Universitaria, México, D.F.

**TUTORES DE TESIS:**

DR. JAVIER GÓMEZ  
CASTELLANOS

  
FIRMA

DR. MICHAEL PASCOE CHALKE

  
FIRMA

## Contenido

Agradecimientos .....	v
Resumen.....	vi
Summary .....	vii
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1 Aplicaciones que requieren conocer la ubicación de nodos dentro de redes inalámbricas móviles .....	2
1.2 Métodos para determinar la ubicación de los nodos dentro de redes inalámbricas .....	3
1.3 Objetivo de la tesis .....	4
1.4 Estructura de la tesis .....	4
Capítulo 2. Antecedentes .....	6
2.1 Métodos de estimación de la posición basados en distancia .....	6
2.1.1 Trilateralización .....	7
2.1.2 Triangulación .....	7
2.1.3 Multilateración.....	8
2.2 Métodos basados en conectividad.....	8
2.2.1 Intersección rectangular o cuadrada .....	9
2.2.2 Intersección hexagonal .....	9
2.2.3 Punto aproximado en una triangulación.....	10
2.3 Estimación de distancia entre nodos .....	11
2.3.1 Tiempo de arribo de una señal de referencia .....	11
2.3.2 Diferencia en tiempo de llegada .....	12
2.3.3 Ángulo de llegada .....	12
2.3.4 Intensidad de la señal recibida.....	12
2.4 Conclusiones del capítulo.....	13
Capítulo 3. Descripción y funcionamiento del método de localización propuesto .....	15
3.1 Descripción de DoE cuando los nodos de red tienen un radio de cobertura constante e igual al radio promedio.....	17
3.2 Descripción de DoE cuando los nodos de red tienen un radio de cobertura diferente al radio promedio.....	24
Capítulo 4. Implementación del algoritmo de ubicación de nodos en Matlab .....	31

---

4.1	Estructura del programa .....	31
4.2	Funcionamiento del programa.....	31
Capítulo 5. Pruebas y resultados .....		38
5.1	Descripción de las pruebas.....	40
5.2	Resultados de las pruebas.....	41
5.2.1	Experimento 1. Variación del radio de transmisión del 1% .....	41
5.2.2	Experimento 2. Variación del radio de transmisión del 5% .....	43
5.2.3	Experimento 3. Variación del radio de transmisión del 10% .....	46
5.2	Comparación de resultados de DoE y resultados obtenidos con otros métodos de localización. ....	49
5.3	Conclusiones del capítulo.....	51
Capítulo 6. Conclusiones de la tesis .....		53
Glosario .....		54
Referencias.....		55

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación que me ha brindado.

A mis tutores de tesis Dr. Javier Gómez Castellanos y Dr. Michael Pascoe Chalke por darme la oportunidad de trabajar con ellos y compartir conmigo sus conocimientos, pero sobre todo, por el apoyo que me brindaron para realizar esta tesis.

A mis sinodales por los comentarios que me dieron para mejorar y enriquecer este trabajo.

Al Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería y a la Coordinación de Estudios de Posgrado por el apoyo económico brindado durante la realización de mis estudios.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica por otorgarme la beca para la elaboración de esta tesis dentro del proyecto PAPIIT IN 106609.

---

## Resumen

En esta tesis se propone y analiza un nuevo método para localizar nodos estáticos dentro de una red inalámbrica. El método propuesto se denomina DoE, pues el resultado que provee es la “Dirección de Encuentro” entre nodos, misma que en inglés se denomina “*Direction of Encounter*, DoE”. DoE no requiere equipamiento adicional en los nodos de red ni se basa en los sistemas tradicionales de localización que utilizan métodos de triangulación o lateralización.

DoE se basa en la capacidad que tienen los nodos móviles para seguir diferentes trayectorias y detectar la presencia y posterior ausencia de otros nodos durante este trayecto. En función de esta detección y el alcance de transmisión de los nodos es posible estimar la ubicación de los nodos fijos dentro de la red. La ubicación obtenida para cada nodo estático se representa en un mapa referenciado a la trayectoria del nodo en movimiento. Otros nodos móviles que recorran la misma red inalámbrica podrán utilizar esta información como guía para dirigirse hacia nodos estáticos que le sean de interés para interactuar o comunicarse con ellos.

DoE fue implementado y evaluado con la herramienta matemática MATLAB. Los resultados de simulación fueron obtenidos bajo escenarios con número variable de nodos estáticos y móviles y nodos móviles con radios de transmisión variables. El error entre las posiciones reales de los nodos estáticos y las posiciones obtenidas mediante DoE converge a niveles aceptables entre mayor es la cantidad de nodos móviles que recorren la red inalámbrica.

## Summary

This thesis proposes a new method for locating static nodes in a wireless network. The proposed method is called DoE, because its result is the "Direction of Encounter, DoE" among nodes. DoE does not require additional equipment in the network nodes and it is not based on location systems that use traditional methods of triangulation or lateralization.

DoE is based on the ability of mobile nodes to follow different trajectories and detect the presence and subsequent absence of other nodes during their trips. Based on this detection and the transmission range of the nodes it is possible to estimate the location of the fixed nodes in the network. The location obtained for each static node is depicted on a map referenced to the path of the moving node. Other mobile nodes traveling on the same wireless network may use this information as a guide to reach static nodes that are of interest and interact or communicate with them.

DoE was implemented and evaluated with the mathematical tool MATLAB. The simulation results were obtained with a series of scenarios that considered different conditions, such as variable number of static and mobile nodes, and mobile nodes with varying transmission range.

DoE generates a map that describes the position of the static nodes in the wireless network. This map can be improved depending on the initial conditions assumed in the algorithm. The obtained error converges to acceptable levels as the number of mobile nodes that roam in the wireless network increases.

## Capítulo 1. Introducción

En México, en la última década (2001 – 2010) el uso de tecnologías de la información y comunicaciones (TIC) ha crecido de manera sostenida. Encuestas publicadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), indican que la tasa media de crecimiento anual de hogares que cuentan con servicio de internet, con telefonía celular o con computadora ha sido entre 10 y 18%, como se muestra en la figura 1.1 [11].

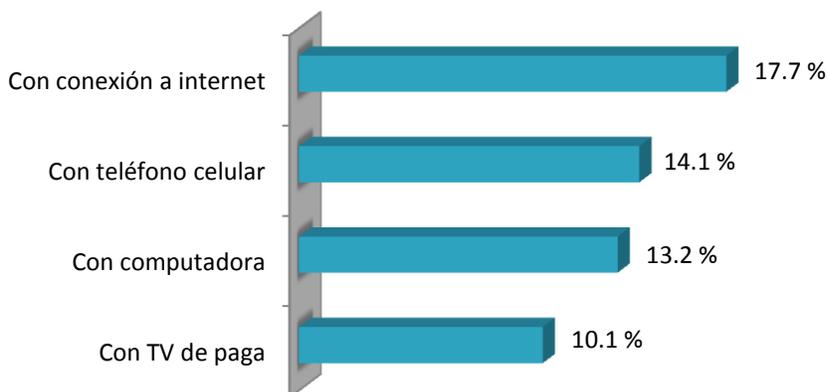


Figura 1.1 Crecimiento de hogares con tecnologías de la información y comunicaciones 2001-2010. Fuente INEGI [11]

Además de este crecimiento en el uso de tecnologías de la información y comunicaciones, hoy en día también nos enfrentamos a la llamada convergencia tecnológica, es decir a la tendencia existente de que un mismo proveedor ofrezca diferentes servicios (como voz, video datos) a sus usuarios, así como la necesidad de contar con dispositivos o equipos que permitan ofrecer tales servicios al usuario final.

En combinación, el crecimiento en el uso de las TIC y la convergencia tecnológica han impulsado un incremento en el número de redes inalámbricas existentes y su mayor utilización, gracias a que permiten cierta movilidad. Por ello, tanto los servicios como los dispositivos deben, también, ser capaces de soportar la movilidad que presentan los usuarios en las redes de hoy.

Los nuevos usos de la tecnología se han presentado prácticamente en todos los sectores: doméstico, educación, investigación, gobierno, comercio, empresas públicas y privadas, instituciones de salud, etc. Este incremento en el uso en las tecnologías es un hecho tan marcado que incluso grandes fabricantes de tecnología [8] reconocen tres consecuencias derivadas de él:

- a) Incremento de usuarios.
- b) Necesidad de nuevos dispositivos.
- c) Expansión de la gama de servicios brindados a los clientes.

De acuerdo con estos fabricantes, la expansión de dispositivos dentro de las redes se refleja en la existencia de equipos tan variados como asistente personales digitales o PDA, teléfonos con

---

acceso a redes, computadoras portátiles o *laptops*, tabletas, impresoras o teclados. Los equipos de usuario final además de proveer conexión a las redes también deben ser capaces de soportar las nuevas aplicaciones y aprovechar la movilidad que ofrecen las redes inalámbricas.

En el incremento de servicios se observan aplicaciones que incluyen mensajería, sistemas de información, transacciones bancarias, juegos, visualización de mapas, descarga de contenidos, localización, rastreo de objetos, seguridad, correo electrónico, redes sociales y redes de sensores, entre otros.

## 1.1 Aplicaciones que requieren conocer la ubicación de nodos dentro de redes inalámbricas móviles

Muchas de las aplicaciones ofrecidas en entornos de redes inalámbricas requieren información sobre la ubicación de nodos dentro de la red para operar correctamente. Tal vez el ejemplo más conocido de un servicio provisto por redes inalámbricas en el que se requiere conocer la ubicación de los usuarios, es la telefonía celular. En ella, para establecer una comunicación entre dos usuarios, la red debe conocer la ubicación de cada uno de los usuarios y saber con qué equipos de red se comunican directamente. La información sobre la ubicación de los usuarios es fundamental para el establecimiento de llamadas, su correcta tarificación y la aplicación del cobro correspondiente.

Algunas compañías de telefonía celular también ofrecen servicios de rastreo, control y localización de vehículos. Con estos servicios, un usuario o empresa puede conocer la ruta seguida por sus automóviles, verificar que los vehículos no salgan de áreas establecidas mediante límites geográficos, conocer su ubicación casi en tiempo real e incluso gestionar operaciones básicas. A través de la red celular se pueden enviar instrucciones para apagar el vehículo, activar/desactivar seguros de las puertas o activar/desactivar alarmas [10]. Este tipo de aplicaciones de localización pueden ser utilizadas por empresas de seguridad para la recuperación de autos en caso de robo. Algunas veces, estos servicios pueden ser ofrecidos también a través de redes satelitales, pero de igual manera en cada caso, se debe conocer la ubicación exacta de los vehículos rastreados o buscados.

En el ámbito de la investigación, las redes de sensores son ampliamente conocidas y estudiadas. En este tipo de redes, una serie de nodos (llamados sensores) son diseminados sobre áreas geográficas con el fin de recabar información del medio ambiente en que se encuentran. Algunas redes de sensores pueden usarse para obtener información como la temperatura, la humedad o la presión atmosférica y luego procesarla o transmitirla a otros nodos de la red para su posterior interpretación. Para el correcto aprovechamiento de la información obtenida por los sensores también es necesario conocer la ubicación de cada uno de ellos.

Otras aplicaciones que se estima que tendrán crecimiento son los sistemas de guiado para nodos y sistemas de gestión de aplicaciones basados en localización [1, 2, 10].

Los sistemas de guiado, permitirán guiar nodos de red hacia otra terminal o estación base de interés, para establecer un enlace directo, reduciendo las posibles fallas de conectividad a través de nodos intermedios. También con esta conexión directa se puede aumentar la velocidad de

---

transmisión de datos entre ambos nodos al reducir la distancia entre ellos, lo cual incrementa la relación señal a ruido.

Por otro lado, los sistemas de gestión de aplicaciones tendrán como objetivo la administración eficiente de contenidos específicos a los usuarios, en función de su ubicación y el perfil que tengan asignado dentro de una red. Algunas propuestas para sistemas de gestión de aplicaciones en redes inalámbricas dentro de campos universitarios permitirían ofrecer el contenido de libros o revistas a los usuarios ubicados en la proximidad de una biblioteca, proporcionar la información sobre una presentación a las personas que se encuentren cerca de un auditorio, o proveer manuales y libros técnicos a los estudiantes que estén dentro de áreas de laboratorios. Esta filosofía de trabajo basada en ubicación de usuarios y sus perfiles se puede extender a redes en entornos empresariales, del sector salud, turismo, comercial o cultural.

## 1.2 Métodos para determinar la ubicación de los nodos dentro de redes inalámbricas

Para determinar la ubicación de nodos dentro de las redes existe una gran variedad de métodos. Algunos de estos métodos requieren de equipo especial para su funcionamiento, lo cual representa costos adicionales [4].

Los métodos de localización de nodos más utilizados en redes inalámbricas, que se describirán con mayor detalle en secciones posteriores, son divididos en dos grandes grupos:

- a) Métodos basados en distancia.
- b) Métodos basados en conectividad.

Ambos métodos requieren conocer la posición de algunos nodos de referencia, llamados nodos ancla, para obtener a partir de ellos la ubicación de otros nodos.

Los métodos basados en distancia utilizan algún mecanismo para estimar las distancias o los ángulos entre los nodos de referencia y los nodos que se desea ubicar. Posteriormente combinan esta información con la ubicación conocida de los nodos ancla para calcular la posición de los nodos cuya ubicación se desconoce.

Diferentes referencias [1, 2, 4, 5, 7] mencionan cómo en los métodos basados en distancia, la distancia entre los nodos de interés se puede calcular a través de la medición de diferentes parámetros. Las medidas más utilizadas son:

- El tiempo que tarda en viajar una señal entre dos puntos.
- La diferencia de tiempo de llegada de diferentes señales a un mismo punto.
- El ángulo de llegada de señales desde diferentes fuentes.
- El nivel de potencia recibido en una señal de referencia.

La localización de los nodos se determina al combinar las distancias calculadas y la información de la posición de nodos de referencia, ya sea por técnicas de trilateración o de triangulación [4].

Por otra parte, los métodos basados en conectividad estiman la posición de los nodos desconocidos a partir de la ubicación de los nodos ancla y del conocimiento de cuándo los nodos

---

que se quiere ubicar se encuentran dentro de la cobertura de los nodos de referencia. Si los nodos que se quiere ubicar se encuentran dentro del alcance de varios nodos de referencia, se asume que la posición de los nodos de ubicación desconocida está dentro de las áreas comunes a las zonas de cobertura de los nodos de referencia. En los métodos de localización basados en conectividad las áreas de cobertura de los nodos de referencia pueden ser consideradas de diferentes formas, tales como: circular, rectangular o triangular [4,7].

### 1.3 Objetivo de la tesis

El objetivo de esta tesis es proponer y analizar un método para localizar nodos estáticos dentro de una red inalámbrica y con ello, poder guiar nodos móviles a través de dicha red. El método propuesto es denominado DoE pues el resultado que provee es la “Dirección de Encuentro” entre nodos, misma que en inglés se denomina “*Direction of Encounter, DoE*”.

DoE no requiere equipamiento adicional en los nodos de red (antenas especializadas o interfaces satelitales) ni se basa en sistemas tradicionales de localización como triangulación o lateralización.

DoE se basa en la capacidad que tienen los nodos móviles inalámbricos para seguir diferentes trayectorias y detectar la presencia y posterior ausencia de otros nodos durante este trayecto. Al combinar esta información proveniente de varios nodos móviles y conociendo ciertos parámetros como la velocidad a la que se mueven y su alcance de transmisión, se plantea desarrollar un algoritmo que permita estimar la ubicación de uno o varios nodos fijos dentro de diversas redes inalámbricas. Inicialmente DoE está pensado para utilizarse en redes inalámbricas de área local (*wireless LAN, WLAN*) pero puede ser extendido a cualquier otro tipo de red inalámbrica que cuente con nodos móviles capaces de monitorear constantemente la red y percibir todo el tráfico proveniente de nodos a cierta distancia a su alrededor.

La principal aportación de este trabajo es presentar un nuevo método de localización de nodos en redes inalámbricas, de fácil implementación y con bajo costo, que pueda servir como base en desarrollo de aplicaciones futuras cuyo funcionamiento esté basado en la ubicación de equipos.

### 1.4 Estructura de la tesis

A partir de esta sección, este trabajo se encuentra organizado de la siguiente forma:

- Capítulo 2. Antecedentes.

En el segundo capítulo se presentan los conceptos básicos sobre de las redes inalámbricas móviles así como una breve descripción de los métodos de localización más comunes utilizados en redes inalámbricas.

- Capítulo 3. Descripción y funcionamiento del método de localización propuesto.

En el tercer capítulo se ubica al método de localización propuesto dentro de la clasificación actual de los métodos de localización utilizados en redes inalámbricas, en función de la forma como opera.

En este capítulo también se describe el funcionamiento del método de localización propuesto.

- Capítulo 4. Implementación del algoritmo de localización de nodos en Matlab.

En el cuarto capítulo se detalla la implementación del algoritmo utilizando la herramienta matemática MATLAB. Se describe la estructura del programa y su funcionamiento.

- Capítulo 5. Pruebas y resultados

En el quinto capítulo se presentan los principales resultados obtenidos a partir de simulaciones realizadas.

- Capítulo 6. Conclusiones

---

## Capítulo 2. Antecedentes

Una red de comunicaciones se puede definir como aquel conjunto de dispositivos conectados entre sí y que pueden comunicarse entre ellos, con el fin de compartir recursos e información. Estos dispositivos capaces de generar, enviar, recibir y trasladar información desde y hacia otros dispositivos se denominan de forma genérica nodos de la red.

Actualmente los nodos de red no sólo pueden ser computadoras o servidores sino también equipos terminales como computadoras portátiles, teléfonos, agendas personales, equipos manos libres, impresoras o equipos intermedios que permiten extender la cobertura y el alcance de la red como son puntos de acceso, conmutadores, etc.

Los medios a través de los cuales los dispositivos se mantienen conectados pueden ser alámbricos (fibras ópticas, cable de cobre, cable coaxial, etc.) o inalámbricos.

Cuando los equipos poseen interfaces inalámbricas para su interconexión, la red de comunicaciones que conforman es una red inalámbrica.

Trabajos previos [1, 2, 4, 5, 7, 12] describen los principales sistemas y métodos de localización empleados en las redes inalámbricas para conocer la ubicación de diferentes nodos.

Estos trabajos clasifican a los métodos usados para determinar la ubicación de nodos dentro de redes inalámbricas en dos grupos:

- 1) Métodos basados en distancia: son aquellos que requieren como información inicial la distancia o el ángulo y distancia entre diferentes nodos de referencia. A partir de estos datos, se determina la ubicación de otros nodos. A fin de determinar posiciones absolutas, se requiere conocer la ubicación exacta de los nodos de referencia (conocidos como nodos ancla).
- 2) Métodos basados en conectividad: son aquellos que dependen de la capacidad de los nodos para detectar la presencia de sus nodos vecinos. La información inicial requerida por este tipo de métodos puede ser el alcance en la cobertura de un nodo o la información del número de saltos para conectar nodos, ya sea directamente o a través de nodos intermedios. Al igual que en los métodos basados en distancia, los basados en conectividad también requieren de nodos ancla que conocen su propia ubicación para entregar posiciones absolutas de los nodos para los que se calcula la ubicación.

Usualmente, los nodos ancla pueden conocer su ubicación exacta por contar con dispositivos equipados con receptores del sistema de posicionamiento global (*Global Positioning System*, GPS).

### 2.1 Métodos de estimación de la posición basados en distancia

Una vez conocida la distancia entre los nodos ancla y otros nodos de ubicación desconocida, la posición de estos últimos se puede estimar por diferentes procesos como son trilateración, triangulación y multilateración [4].

### 2.1.1 Trilateración

En el método de trilateración, la localización del nodo se determina utilizando tres estaciones base o nodos ancla próximos, a partir de los cuales se trazan áreas circulares. Los radios de estos círculos equivalen a la distancia encontrada entre cada estación de referencia y el nodo que se quiere ubicar. La intersección entre los tres círculos da como resultado la ubicación del nodo, tal y como se muestra en la figura 2.1.

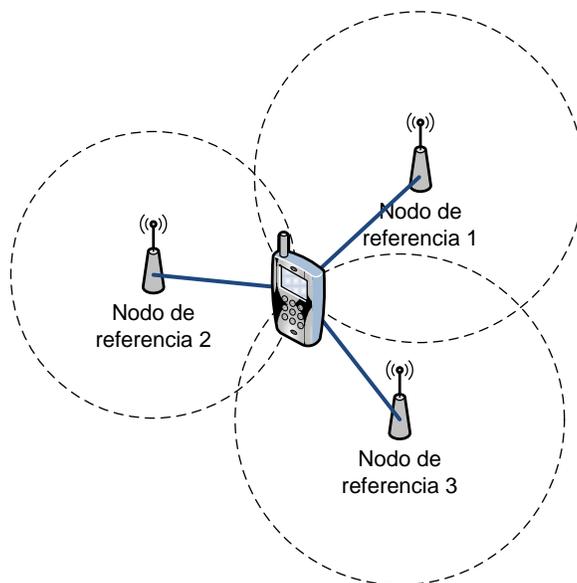


Figura 2.1 Ubicación de un nodo utilizando el método de trilateración

### 2.1.2 Triangulación

Este método parte de la información sobre la distancia entre dos nodos de referencia con ubicación conocida y el ángulo de llegada entre la señal del nodo que se quiere ubicar y las antenas de los nodos de referencia. Conocida esta distancia y los ángulos referidos, la ubicación del nodo a localizar se puede determinar mediante trigonometría básica.

En la figura 2.2 se muestran dos nodos de referencia separados entre sí por una distancia conocida. Cada uno de los nodos de referencia mide el ángulo con el que recibe la señal proveniente del nodo que quiere ubicar. Con tal información, determinan la posición del nodo de ubicación desconocida.

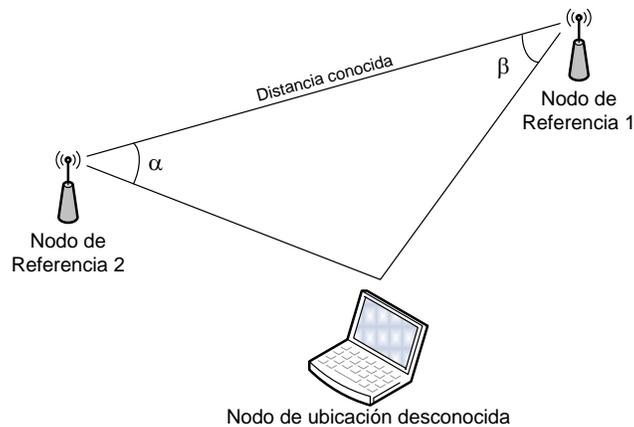


Figura 2.2 Obtención de la ubicación de un nodo utilizando la técnica de triangulación.

Este método tiene la desventaja de que los nodos de referencia deben contar con arreglos de antenas que permitan medir el ángulo de llegada de la señal proveniente del nodo que se quiere ubicar.

### 2.1.3 Multilateración

De manera similar al método de triangulación, en multilateración también se requiere información sobre la distancia entre nodos de referencia con ubicación conocida y el ángulo de llegada entre la señal del nodo que se quiere ubicar y cada una de las antenas de los nodos de referencia.

La principal diferencia entre triangulación y multilateración es que, en este segundo método se requiere al menos la información respecto a tres nodos de referencia. Esto permite hacer el método más robusto ante fallas y no sólo estimar las distancias hacia los nodos de ubicación desconocida en dos dimensiones, sino también otras incógnitas como la elevación del nodo o su posición en tres dimensiones.

## 2.2 Métodos basados en conectividad

Estos métodos requieren determinar cuándo un equipo está cerca de un nodo de referencia o ancla. La presencia del equipo de red que se quiere ubicar se estima utilizando un nodo ancla con cobertura limitada. En los métodos basados en conectividad, el nodo que se quiere localizar es monitoreado por los nodos con ubicación conocida para determinar si está dentro del alcance de uno de ellos. Para contar con esta información, no es necesario estimar las distancias entre los nodos ancla y los nodos monitoreados. Simplemente se asume que si el nodo que se quiere ubicar es capaz de detectar a dos o más nodos ancla, entonces el nodo a ubicar se encuentra dentro de una zona que corresponde al área de intersección entre las regiones de cobertura de cada uno de los nodos ancla.

A continuación se detallan las técnicas más significativas que se incluyen en este grupo y que por su manera de operar, se encuentran estrechamente relacionadas con el método propuesto en esta tesis.

### 2.2.1 Intersección rectangular o cuadrada

Si dos nodos son capaces de comunicarse entre sí, se puede dar por hecho que cada uno está dentro del área de cobertura del otro. En el método de localización basado en intersección rectangular, el área de cobertura del nodo de referencia se estima como un cuadrado, en cuyo centro está ubicado el nodo ancla. La longitud de cada lado de este cuadrado se asume igual a dos veces el radio de cobertura de dicho nodo ancla.

Este algoritmo es ejecutado de forma distribuida en los nodos de referencia. Una vez que cada nodo ancla adquiere las áreas de cobertura y posiciones de las anclas vecinas capaces de detectar a un nodo desconocido realiza un proceso de intersección de los cuadrados y obtienen un rectángulo final. La posición del nodo desconocido es determinada como el centro de este rectángulo intersección [4].

En la figura 2.3 se muestra un ejemplo del área determinada por la intersección de los radios de cobertura de tres nodos de referencia. Se asume que el nodo de ubicación desconocida se encuentra en el centro de esta área de intersección.

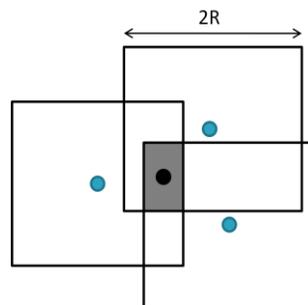


Figura 2.3 Obtención de la ubicación de un nodo utilizando la técnica de intersección rectangular.

Este método tiene la desventaja de requerir alta conectividad y comunicación entre nodos ancla que detecten a un mismo nodo desconocido a fin de obtener una estimación precisa.

### 2.2.2 Intersección hexagonal

Esta técnica es similar a la técnica de intersección rectangular, pero propone el uso de hexágonos para representar el área de cobertura de los nodos ancla [4, 3]. En particular, utiliza el hexágono

regular con apotema de longitud igual al radio de cobertura. La intersección de hexágonos da lugar a polígonos. Estos polígonos se denominan pseudo-hexágonos.

Nuevamente, la ubicación estimada para el nodo desconocido, será en el centro del área de intersección obtenida. Esto se aprecia en la figura 2.4.

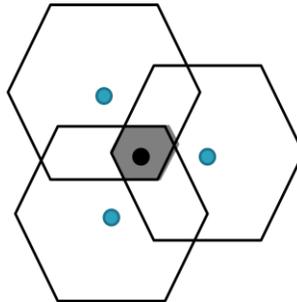


Figura 2.4 Obtención de la ubicación de un nodo utilizando la técnica de intersección hexagonal.

### 2.2.3 Punto aproximado en una triangulación

En esta variante, se parte de una red inalámbrica en la cual existe un número suficiente de nodos ancla y cierto número de nodos con ubicación desconocida. Proviene de pruebas conocidas como pruebas de punto aproximado en triangulación, o APIT por sus siglas en inglés, *approximated point in triangulation* [5].

Para estimar la posición de algún nodo desconocido, éste detecta a los nodos ancla que se encuentran a su alrededor y elige grupos de tres de ellos para utilizarlos como vértices y formar triángulos. El nodo de ubicación desconocida verifica si se encuentra dentro de los triángulos formados por los grupos nodos ancla. Al repetir esta operación para todas las posibles combinaciones de tres nodos ancla a su alrededor y realizar una superposición de los triángulos obtenidos a partir de diferentes grupos de tres de anclas, se estima que la ubicación del nodo desconocido se encontrará en el centro del área común a los triángulos anteriores.

La figura 2.5 muestra el resultado de este método de una manera simplificada.

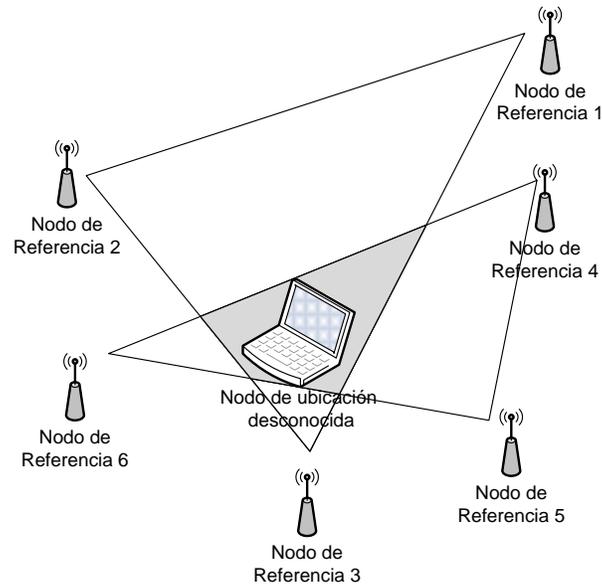


Figura 2.5 Obtención de la ubicación de un nodo utilizando la técnica de punto aproximado en una triangulación.

## 2.3 Estimación de distancia entre nodos

Los parámetros más comúnmente utilizados en la estimación de la distancia entre nodos dentro de una red inalámbrica son [1, 2, 4, 5, 7, 12]:

- a) Tiempo de arribo de una señal de referencia (*Time of Arrival, ToA*).
- b) Diferencia en el tiempo de arribo de dos diferentes señales (*Time Difference of Arrival, TDoA*).
- c) Ángulo de llegada de la señal de referencia (*Angle of Arrival, AoA*).
- d) Intensidad de la señal recibida (*Received Signal Strength Indicator, RSSI*).

Estos métodos se describen con mayor detalle en las secciones siguientes

### 2.3.1 Tiempo de arribo de una señal de referencia

Al conocer el tiempo que tarda en propagarse una señal entre un transmisor y un receptor, se puede estimar la distancia entre ellos, si se conoce la velocidad a la que viaja esta señal [2]. En redes inalámbricas se puede aplicar este principio y enviar una señal desde un nodo ancla a otro nodo y, una vez recibida una respuesta, el nodo de referencia puede calcular la separación entre ambos elementos.

Dado que la distancia se estima en función de la velocidad con que viaja la onda (velocidad de la luz) y el tiempo que tomó a la señal viajar de la estación base al nodo y de regreso, se requiere de sincronización entre los nodos y la estación base pues, en caso de que los relojes de los equipos no

se encuentren sincronizados, pueden producirse errores en la medición. Adicionalmente se deben considerar los tiempos de procesamiento de esta señal en los nodos.

### 2.3.2 Diferencia en tiempo de llegada

En algunos sistemas, el transmisor emite dos diferentes señales hacia un receptor, cada una con diferente frecuencia y velocidad de transmisión, por ejemplo una señal electromagnética y una señal ultrasónica. El receptor compara el tiempo de llegada de ambas señales. Al saber la velocidad a la que viaja de cada una de las señales y la diferencia de tiempo entre las llegadas, se puede nuevamente estimar la distancia entre el emisor y el receptor [2].

Otra manera de estimar la distancia se basa en la diferencia en tiempos de la llegada de la señal del nodo de ubicación desconocida hacia dos o más estaciones base. Considerando que la señal es recibida por un par de estaciones separadas una distancia conocida, se pueden calcular los puntos en donde puede ubicarse el nodo móvil, dentro de una hipérbola, cuyos focos son las ubicaciones de las estaciones y la diferencia en tiempos de llegada permanece constante.

Al utilizar el mismo método por una tercera estación base, se pueden obtener tres pares de tiempos de llegada de la señal y la ubicación de las hipérbolas proporcionaría la ubicación del nodo buscado.

A diferencia del método de medida del tiempo de llegada, no se requiere sincronización entre el nodo y las estaciones base, solamente entre las estaciones base.

### 2.3.3 Ángulo de llegada

Los nodos de una red también pueden ubicarse a través de la medición del ángulo de arribo de una señal a un punto de referencia. Para ello, las estaciones base necesitan estar equipadas con arreglos de antenas capaces de medir el ángulo de incidencia de la señal del nodo móvil. Las antenas tienen una orientación específica dentro de la red, lo que les permite detectar en línea de vista la señal de cada nodo.

### 2.3.4 Intensidad de la señal recibida

La intensidad de la señal recibida (RSSI *Received Signal Strength Indicator*) es un parámetro que se puede medir en las redes inalámbricas y ayuda a determinar la distancia entre equipos. Al conocer la intensidad de la señal transmitida y tomando como base las propiedades de atenuación de las señales electromagnéticas, se puede modelar la distancia entre dos nodos como una función de la intensidad de la señal recibida.

---

Existen varios modelos de propagación que han sido desarrollados para aplicarse en redes WiFi (*wireless fidelity*). En términos generales, en estos modelos, se tiene que la potencia de la señal recibida entre dispositivos está en función de la distancia que existe entre ellos, esto es:

$$P_R = g(d)P_T \quad (1)$$

donde:

$P_R$  = Potencia de la señal recibida.

$P_T$  = Potencia de la señal transmitida.

y  $g(d)$  es una función de la distancia.

De manera inversa, si se conoce la potencia de una señal recibida y la intensidad de la señal enviada, la distancia entre dos nodos puede ser estimada, aunque no la dirección en la que se encuentran.

La dirección puede obtenerse, al triangular las distancias entre nodos y algunos puntos de referencia con ubicación conocida, de manera similar a como se hace en otros sistemas de localización.

## 2.4 Conclusiones del capítulo

Una de las mayores ventajas que puede ofrecer el uso de redes inalámbricas sobre el uso de redes cableadas es la libertad que tienen los usuarios para moverse a lo largo de diferentes zonas de la red.

Sin embargo, la movilidad también puede representar algunos inconvenientes. Con cierta frecuencia el canal inalámbrico presenta condiciones adversas que impiden garantizar una comunicación confiable al presentar errores. El cambio en la ubicación de los nodos también puede impactar negativamente en algunas aplicaciones que necesitan contar con la información exacta y en tiempo real de la ubicación de los nodos de red para un correcto funcionamiento.

Existen diversos métodos que permiten conocer y actualizar dicha ubicación y tomar decisiones respecto a ella, y así, mantener el nivel de servicio en la red o la correcta operación de algunas aplicaciones.

Los métodos que se presentaron en este capítulo requieren conocer por anticipado la ubicación de algunos nodos estáticos que se utilicen de referencia para determinar la ubicación de otros nodos dentro de la red. Normalmente este requerimiento implica la necesidad de equipamiento especializado, por ejemplo equipos de posicionamiento global vía satélite, o una programación previa de dichos nodos para registrarles su ubicación. Estas condiciones pueden complicarse conforme el tamaño de la red crece.

Por ello, en capítulos posteriores, se propondrá un método de localización y ubicación de los nodos que no necesitará algún equipamiento adicional para lograrse y que es simple de implementarse.

## Capítulo 3. Descripción y funcionamiento del método de localización propuesto

Como se mencionó anteriormente, el método propuesto en este trabajo es denominado DoE debido a que el resultado que provee es la “Dirección de Encuentro” entre nodos, misma que en inglés se denomina “*Direction of Encounter, DoE*”.

Dado que DoE no requiere estimar una distancia entre nodos para determinar la ubicación de un nodo desconocido dentro de la red, no es posible clasificarlo como un método basado en distancia. Por el contrario, DoE parte de la capacidad de un nodo para detectar la presencia o posterior ausencia de otros nodos de red, esto es, el funcionamiento de DoE está basado en la conectividad.

Aunque difiere de los métodos revisados en el capítulo anterior, dado que los métodos estudiados requieren de nodos ancla y DoE no los requiere, puede pensarse que corresponde a la categoría de métodos basados en conectividad o proximidad. Al igual que otros métodos pertenecientes a esta categoría, en lugar de medir distancias, al momento de determinar la ubicación de un nodo, este algoritmo asume que los nodos detectados, a los cuales se quiere ubicar se encuentran dentro del alcance transmisión de otros nodos. En particular, DoE obtiene sus estimaciones de posición cuando los nodos a ubicar se encuentran en el límite del alcance de un nodo móvil que atraviesa la red inalámbrica.

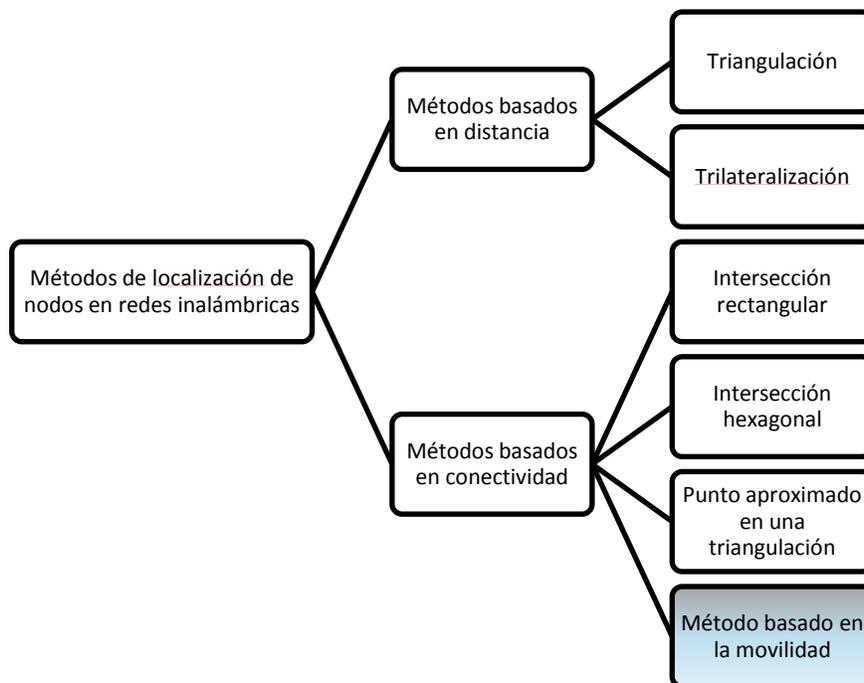


Figura 3.1 Ubicación del método de localización de nodos basado en movilidad dentro de la clasificación actual de modelos de localización

---

El objetivo principal de DoE es estimar la posición de nodos estáticos dentro de una red inalámbrica, a través de la información obtenida por nodos móviles que viajan a través de ella.

Al establecer las posiciones de nodos estáticos en una red, otros nodos móviles podrán saber la dirección y distancia hacia donde los pueden encontrar. Esta información también puede ser utilizada en aplicaciones que requieran de información sobre la ubicación de nodos dentro de la red.

En DoE, cuando un nodo móvil entra y sale del área de cobertura de uno o varios nodos estáticos, puede estimar la localización de tales nodos estáticos con respecto a su propia trayectoria. En este trabajo el conjunto de posiciones estimadas para los nodos estáticos de la red, es denominado constelación.

En DoE se asumen dos condiciones de inicio. La primera es que dentro de la red existan al menos dos nodos con movilidad, es decir con capacidad para moverse a lo largo de la red. La segunda condición es que los nodos móviles sean capaces de trabajar en modo monitor, es decir que tengan la capacidad de monitorear y detectar todo el tráfico proveniente de otras fuentes inalámbricas cercanas. En general, DoE puede operar en cualquier tipo de red inalámbrica que cumpla las dos condiciones anteriores, por ejemplo redes inalámbricas de área local (WLAN).

Para la implementación de DoE se consideró que:

- 1) Todos los nodos estáticos de la red inalámbrica quedan dentro del radio de cobertura de todos los móviles que viajarán a través de la red.
- 2) Las trayectorias seguidas por los nodos móviles son rectilíneas.
- 3) La velocidad de los nodos móviles es constante.
- 4) Se puede obtener un radio de alcance promedio para todos los nodos de la red.

De manera simplificada, el funcionamiento de DoE puede explicarse en dos principales casos:

- a) Cuando el radio de cobertura de todos los nodos de la red es igual al radio nominal.
- b) Cuando el radio de cobertura de los nodos de la red es diferente al radio nominal.

Cuando el radio de cobertura de los nodos de la red es igual al radio de alcance nominal, las posiciones de nodos estáticos obtenidas a partir de la información de solamente dos nodos móviles pueden tomarse libres de error y no es necesario obtener información de nodos adicionales para mejorar su precisión.

Sin embargo, cuando el radio de cobertura de los nodos de la red es diferente al radio nominal de alcance -utilizado en los cálculos de las posiciones de los nodos estáticos- las posiciones obtenidas presentan errores que son proporcionales a la variación del radio de cobertura real, respecto al nominal.

En el segundo caso las posiciones de los nodos estáticos se calculan como el centro geométrico de las ubicaciones estimadas por más de dos nodos móviles que han pasado por la red. Las

estimaciones de ubicación de los nodos estáticos se pueden actualizar cada vez que un nodo nuevo móvil obtiene y comparte sus resultados con otros nodos. Con este proceso, se intenta que errores de las estimaciones hechas por móviles con radios de cobertura menores al radio de cobertura promedio compensen a los errores producidos en estimaciones hechas por nodos con radio de cobertura mayor al radio promedio.

### 3.1 Descripción de DoE cuando los nodos de red tienen un radio de cobertura constante e igual al radio promedio

A continuación se describe el proceso que se sigue en DoE para determinar la localización de los nodos estáticos que se encuentran en la red, a través de la información obtenida por nodos móviles que viajan a través de ella.

- 1) El proceso inicia cuando dos nodos en movimiento siguen diferentes trayectorias dentro de una red inalámbrica y detectan la presencia de los nodos estáticos que se encuentran a su alrededor. Un ejemplo de red inalámbrica compuesta por tres nodos estáticos y que es atravesada por dos nodos móviles se muestra en la figura 3.2

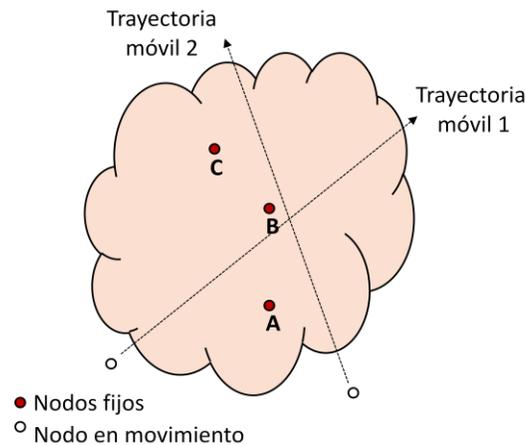


Figura 3.2 Nodos fijos y nodos móviles dentro de una red inalámbrica

- 2) Cada uno de los nodos en movimiento registra los instantes en los que detecta a cada uno de los nodos estáticos cercanos por primera y última vez. A estos eventos se les denominará primer y último encuentro, respectivamente.

Conforme cada nodo móvil sigue una trayectoria dentro de la red, va estableciendo y perdiendo el contacto con algunos nodos estáticos. Cada nodo móvil verifica el instante en que comienza a detectar a alguno de los nodos estáticos y lo registra como tiempo del primer encuentro ( $T_i$ ) con dicho nodo. También toma nota del instante en que deja de tener contacto con tal nodo estático y lo registra como el tiempo del último encuentro ( $T_o$ )

con ese nodo. Repite este proceso a lo largo de su camino, cada vez que empieza y deja de detectar a otros nodos estáticos.

En la figura 3.3 se muestra un ejemplo de los instantes en que un nodo en movimiento detecta por primera y última vez al nodo A. El primer encuentro corresponde al instante en que el nodo móvil proveniente de una zona lejana, se acerca al nodo A hasta que su radio de alcance le permite detectarlo. El último encuentro corresponde al tiempo en que el móvil, que se va alejando del nodo A, pierde contacto con tal nodo fijo debido a que la distancia a la que se encuentran empieza a ser mayor el radio de alcance entre ambos nodos.

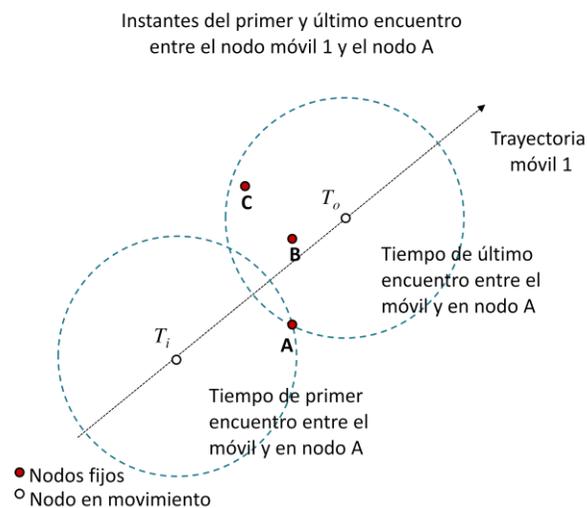


Figura 3.3 Registro de los tiempos en que un nodo en movimiento detecta por primera y por última vez a un nodo estático (en este caso nodo estático A)

- 3) La distancia recorrida por el nodo móvil entre el primer y último punto de encuentro con el nodo estático de referencia se obtiene como

$$d_{io} = v (T_o - T_i) \quad (2)$$

donde:

$d_{io}$  = distancia recorrida por el nodo móvil entre el primer y último encuentro con el nodo estático de referencia.

$v$  = velocidad del nodo móvil.

$T_i$  = tiempo de primer encuentro entre el nodo móvil y el nodo estático.

$T_o$  = tiempo de último encuentro entre el nodo móvil y el nodo estático.

- 4) Con la información anterior y considerando el radio de cobertura y velocidad de movimiento promedios, el nodo móvil determina la posición relativa del nodo estático de la siguiente forma:

$$X = v T_i + \frac{d_{io}}{2} \quad (3)$$

$$Y = \pm \sqrt{R^2 - \left(\frac{d_{io}}{2}\right)^2} \quad (4)$$

donde:

$X$  = Posición estimada del nodo estático en el eje X.

$Y$  = Posición estimada del nodo estático en el eje Y.

$v$  = velocidad del nodo móvil.

$T_i$  = tiempo de primer encuentro entre el nodo móvil y el nodo estático.

$d_{io}$  = distancia recorrida por el nodo móvil entre el primer y último punto de encuentro con el nodo estático de referencia.

$R$  = radio de cobertura del nodo móvil, inicialmente definido como un radio nominal  $R = 100$  metros.

- 5) Dado que la ecuación (4) se resuelve como la raíz cuadrada de un número, se obtienen dos posibles valores de la coordenada  $Y$  para cada nodo estático. Esto significa que la solución de la ecuación (4) provee dos posibilidades de ubicación de cada nodo fijo: una posición real y una posición espejo. Estas posiciones corresponden a los puntos de intersección de las circunferencias generadas desde el lugar donde ocurre el primer y el último encuentro entre cada nodo móvil y cada nodo estático. El radio de las circunferencias se asume igual al radio de cobertura promedio de los nodos.

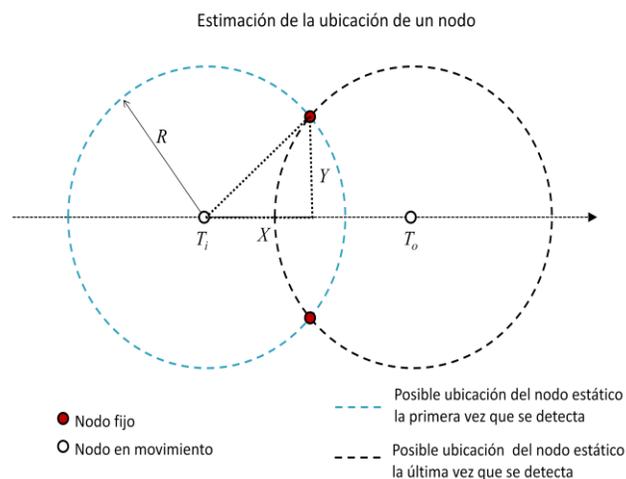


Figura 3.4 Solución geométrica de la ubicación de un nodo fijo calculada por un nodo móvil

En la figura 3.5 se observan la posición real (A) y la posición espejo (A') espejo que se encontrarían para el nodo A al pasar un nodo móvil por la red.

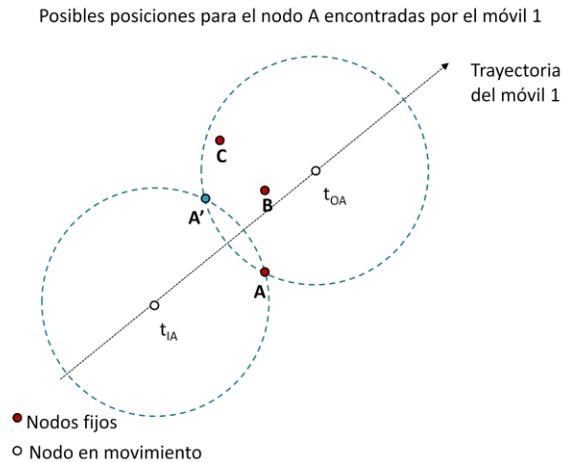


Figura 3.5 Posiciones estimadas para un nodo estático A, obtenidas por el nodo móvil 1.

- 6) Al reunir en un solo mapa o plano las posibles posiciones encontradas para cada nodo estático, se obtiene lo que llamaremos una constelación. A su paso por la red, cada nodo móvil crea su propia constelación. En la figura 3.6 se observan ejemplos de constelaciones obtenidas por dos diferentes nodos móviles que atraviesan por una red inalámbrica.

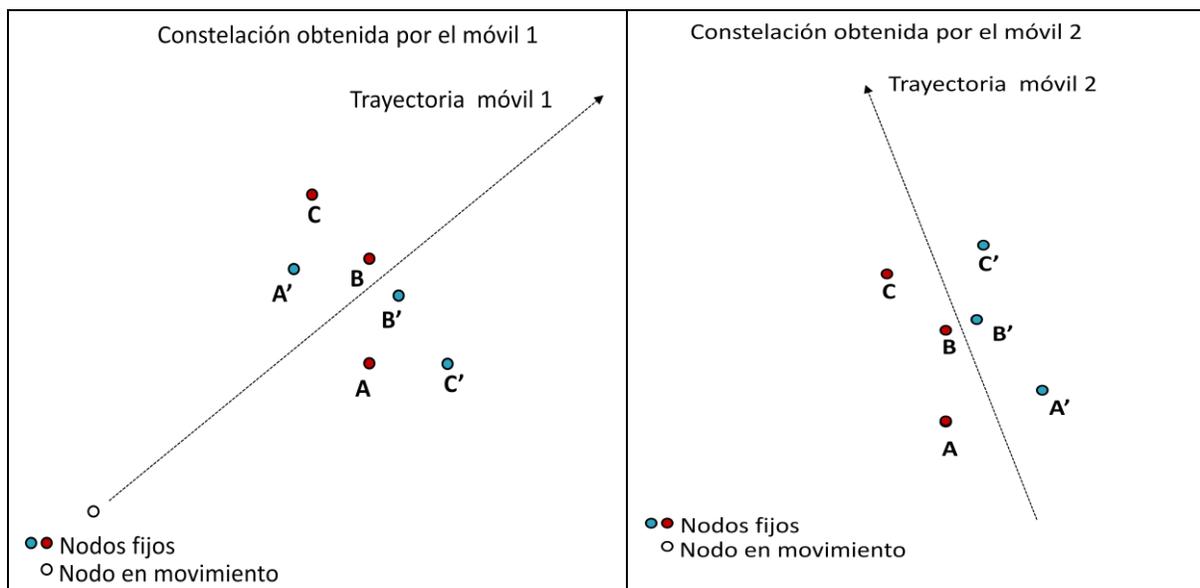


Figura 3.6 Constelaciones obtenidas por dos nodos móviles que pasan por una red inalámbrica. Cada constelación muestra la ubicación real y la ubicación espejo de los nodos estáticos.

En este punto, las constelaciones obtenidas por cada nodo móvil contienen dos ubicaciones estimadas para cada nodo estático. Una de las ubicaciones corresponde a la posición real de cada nodo estático mientras que la otra corresponde a lo que llamaremos la posición espejo. Las

---

posiciones real y espejo de cada nodo estático son simétricas con respecto a la trayectoria del nodo móvil que las estimó.

Aunque se sabe de la existencia de posiciones reales y posiciones espejo para los nodos estáticos, no es posible, en este punto del método, determinar cuáles de las posiciones mostradas en la constelación pertenecen a cada una de estas categorías.

- 7) Los nodos móviles deben compartir entre sí las constelaciones que han encontrado para poder separarlas en dos subconjuntos.

Las ubicaciones de los nodos estáticos pueden utilizarse para formar dos subconjuntos, a los que podemos llamar solución real y solución espejo. La solución real contiene las posiciones reales de los nodos, cuya distribución corresponde con la distribución real de los nodos estáticos en la red. La solución espejo agrupa a todas las posiciones espejo encontradas con la ecuación 2.

- 8) Cuando un nodo móvil recibe la constelación generada por algún otro nodo móvil, deberá realizar un proceso de superposición, traslación y rotación entre la constelación recibida y su propia constelación, de acuerdo a los siguientes pasos:
  - a) El par de constelaciones son superpuestas.
  - b) El par de constelaciones superpuestas se trasladan a un punto de referencia común, que debe existir en ambas constelaciones, al que podemos llamar nodo pivote.
  - c) Cuando las constelaciones han sido referenciadas respecto al nodo pivote, una de ellas es rotada sobre la otra de manera gradual hasta que un grupo de posiciones de los nodos estáticos en la primera constelación coincida con un grupo de posiciones de los nodos estáticos en la segunda constelación. Esta rotación se realiza desde  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$ , con incrementos definibles por el usuario, denominados  $\Delta\theta$ .

En la figura 3.7 se muestran dos constelaciones que han sido rotadas gradualmente hasta un ángulo  $\theta$ . Es en este ángulo  $\theta$  que las posiciones encontradas para los nodos estáticos, denominadas A, B y C por cada uno de los nodos móviles coinciden.

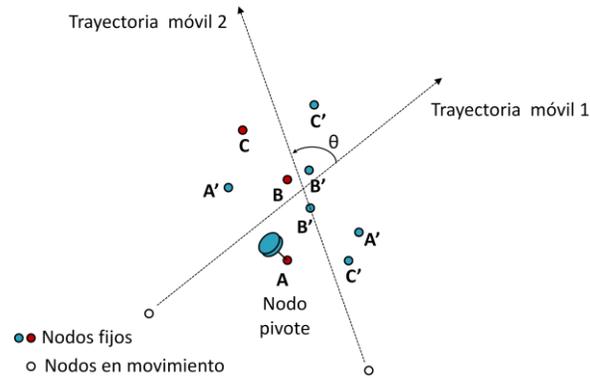


Figura 3.7 Rotación de dos constelaciones superpuestas, tomando como pivote el nodo A en ambas constelaciones.

- d) Las posiciones de los nodos de una constelación que coinciden con las posiciones de los nodos en la otra constelación se conservan y se asumen como la ubicación de los nodos estáticos. Las posiciones de los nodos que no coincidan entre diferentes constelaciones son descartadas.

El mapa formado por las posiciones coincidentes entre ambas constelaciones es ahora una constelación mejorada.

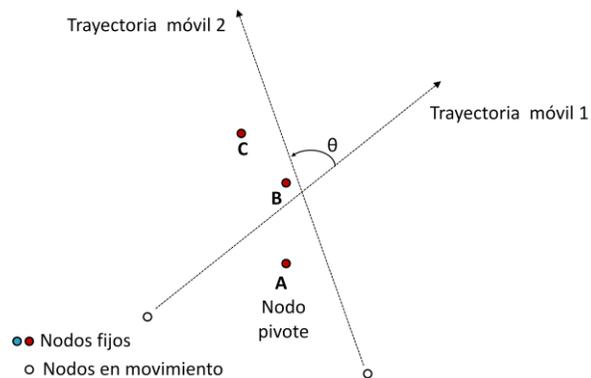


Figura 3.8 Constelación mejorada obtenida al descartar los nodos que no se superponen.

Es importante mencionar que este proceso se debe repetir cuatro veces, dado que existen dos posibles ubicaciones para cada nodo estático por constelación y deben considerarse todas las combinaciones posibles.

Para el ejemplo ilustrado se tomaron como nodos pivotes las posiciones A encontradas por cada móvil para el primer nodo estático.

Si en un segundo caso se toman como pivote las posiciones A' de cada constelación, el proceso de superposición, traslación y rotación resulta en una superposición de los nodos A', B' y C' de ambas constelaciones, como se muestra en la figuras 3.9 y 3.10.

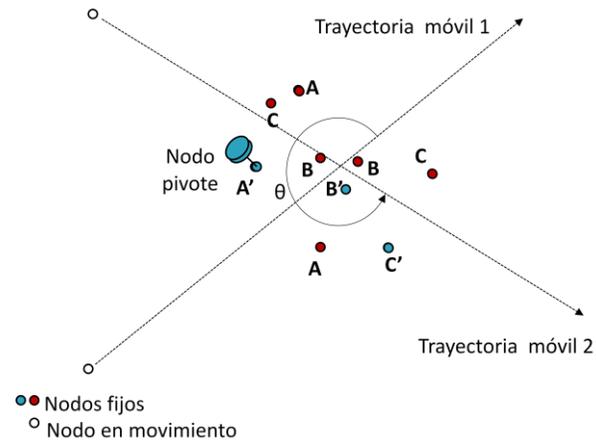


Figura 3.9 Rotación de dos constelaciones superpuestas, tomando como pivote el nodo A' en ambas constelaciones.

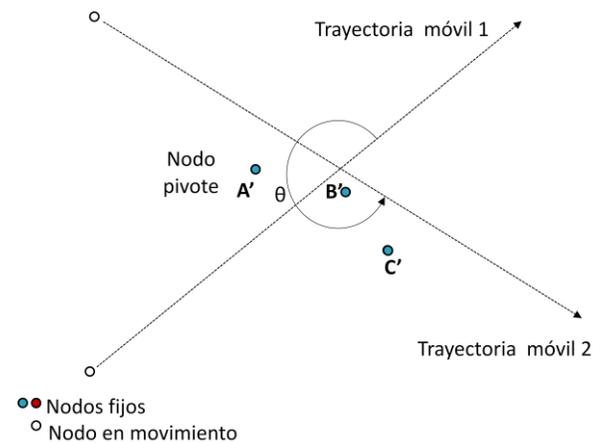


Figura 3.10 Constelación mejorada obtenida al descartar los nodos que no se superponen.

En el mismo escenario mostrado, en caso de tomar como pivote las posiciones de nodos combinados (A en una constelación y A' en la otra constelación), no se consigue la superposición de grupos de nodos para algún ángulo de rotación, y no es posible descartar los nodos que no son comunes.

- 9) Una vez que se tienen las dos constelaciones mejoradas, pueden ser entregadas a otros nodos móviles para que las utilicen en su recorrido a lo largo de la red y puedan reconocer qué nodos estáticos existen en ella y en dónde se encuentran ubicados.
- 10) Un nuevo usuario con un dispositivo móvil que utilice los mapas de red para guiarse, puede determinar cuál de ambas soluciones es la correcta al ir detectando nodos que se encuentran a su alrededor y acomodando o reorientando las constelaciones obtenidas.

El usuario con el dispositivo móvil puede descartar una de las soluciones que se le han entregado si a lo largo de su camino realiza un cambio de trayectoria y nota que se mantiene detectando a alguno de los nodos estáticos próximos a él o bien, si nota que deja de detectar a tal nodo.

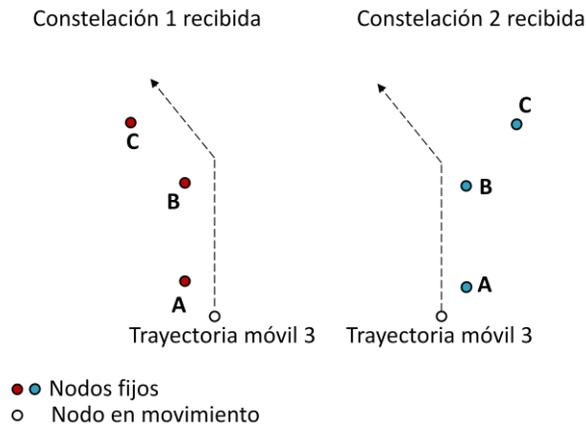


Figura 3.11 Uso de las constelaciones obtenidas por un nuevo nodo móvil

En la figura 3.11, un usuario en movimiento utiliza las constelaciones que le han sido entregadas como resultado de aplicar DoE en otros nodos móviles sin saber exactamente cuál de ellas es la solución real y cuál es la solución espejo. Al ir moviéndose a lo largo de red puede identificar a los nodos A, B y C. Si después de haber pasado cerca del nodo B realiza un cambio de trayectoria hacia la izquierda y sigue manteniendo contacto con el nodo C, determinará que la constelación correcta es la primera. Si después de haber pasado cerca del nodo B realiza un cambio de trayectoria hacia la izquierda y pierde contacto con el nodo C, entonces determinará que la constelación correcta es la segunda.

### 3.2 Descripción de DoE cuando los nodos de red tienen un radio de cobertura diferente al radio promedio

Se mencionó al inicio de este capítulo que cuando el radio de cobertura de los nodos de la red es diferente al radio nominal de alcance -utilizado en los cálculos de las posiciones de los nodos estáticos- las constelaciones obtenidas presentan errores entre la posición estimada para los nodos y la posición en la que realmente se encuentran. Este error es proporcional a la variación en radio de cobertura real de los nodos, con respecto al radio de alcance nominal.

---

Los primeros pasos descritos en la sección anterior se realizan de la misma forma aun cuando los radios de cobertura de los nodos sean diferentes al radio promedio. Es decir, para obtener la posición de los nodos estáticos que existen en la red, se sigue el mismo proceso, hasta encontrar una primera constelación a partir de la información de los dos primeros nodos móviles que cruzan por la red. El proceso seguido por DoE cambia a partir de ese punto. Con la idea de mejorar las posiciones estimadas, se considera la intervención e información proporcionada por nodos móviles adicionales.

- 1) El proceso inicia cuando dos nodos en movimiento siguen diferentes trayectorias dentro de una red inalámbrica y establecen contacto con otros nodos estáticos que se encuentran a su alrededor.
- 2) Cada uno de los nodos en movimiento detecta el tiempo de la primera y la última vez que escucha a cada uno de los nodos estáticos cercanos y registra estos instantes como tiempo del primer encuentro ( $T_i$ ) y tiempo del último encuentro ( $T_o$ ), respectivamente. Repite este proceso a lo largo de su camino, cada vez que empieza y deja de escuchar a otros nodos estáticos.
- 3) Con la información anterior y conociendo el radio de cobertura promedio manejado en la red y su velocidad de movimiento, cada nodo móvil determina la posición relativa de los nodos estáticos con las ecuaciones (2), (3) y (4) mencionadas en la sección anterior.
- 4) Al resolver la ecuación (4), nuevamente los nodos móviles obtienen dos posibles valores de la coordenada  $Y$  para cada nodo estático. Las posiciones corresponden a los puntos de intersección de las circunferencias generadas desde el lugar donde ocurre el primer y el último encuentro entre cada nodo móvil y cada nodo estático. El radio de las circunferencias utilizadas se asume igual al radio de cobertura promedio de los nodos.
- 5) Al reunir las posibles posiciones encontradas para cada nodo estático, se obtiene una constelación por cada nodo móvil.
- 6) Dos nodos móviles comparten entre sí las constelaciones que han encontrado.
- 7) Cuando un nodo móvil recibe la constelación generada por algún otro nodo móvil, realiza el proceso de superposición, traslación y rotación entre la constelación recibida y su propia constelación. Esta superposición, traslación y rotación son similares a las realizadas cuando las constelaciones son obtenidas por móviles con radio igual al radio de cobertura promedio. Sin embargo, el punto en que se encuentra el ángulo de rotación óptimo ahora difiere:
  - a. El par de constelaciones se superponen y trasladan a un punto de referencia común, que debe existir en ambas constelaciones.

- b. Una vez que las constelaciones han sido superpuestas y trasladadas a un sistema de coordenadas cuyo origen es un nodo común a ambas constelaciones (nodo pivote), una de ellas debe ser rotada sobre la otra de manera gradual. Esta rotación se realiza desde  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$ , con incrementos definibles por el usuario, denominados  $\Delta\theta$ .
- c. Cada vez que la rotación de la segunda constelación sobre la primera es incrementada un  $\Delta\theta$ , se calcula distancia cuadrática entre los diferentes pares de posiciones encontradas para cada nodo estático ( $e_i$ ). La distancia cuadrática entre pares de posiciones de un mismo nodo se calcula como:

$$e_i = (X_i^{M1} - X_i^{M2})^2 + (Y_i^{M1} - Y_i^{M2})^2$$

donde  $(X_i^{M1}, Y_i^{M1})$  y  $(X_i^{M2}, Y_i^{M2})$  representan las abscisas y ordenadas de la posición estimada de cada nodo estático, obtenidas por los nodos móviles  $M1$  y  $M2$  respectivamente.

Dada la existencia de cuatro pares de puntos posibles para cada nodo estático, es necesario encontrar la menor de estas distancias para cada pareja de nodos:

$$e_{i_{min}} = \min(e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}, e_{i4})$$

donde  $e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}, e_{i4}$  corresponden a las distancias cuadráticas entre las cuatro diferentes combinaciones de pares de puntos.

Para cada ángulo de rotación, se calcula la distancia cuadrática total como la suma de las distancias cuadráticas mínimas entre los pares de posiciones de cada nodo estático.

$$D^2(\theta) = \sum_{i=1}^n e_{i_{min}}(\theta)$$

donde

$D^2(\theta)$  = Distancia cuadrática total en cada ángulo de rotación.

$e_{i_{min}}$  = Distancia cuadrática mínima entre posiciones de cada nodo estático, obtenidas por los nodos móviles.

$n$  = Número total de nodos estáticos.

Este proceso de rotación y medición de las distancias cuadráticas entre pares de nodos se repite cuatro veces, debido a que existen dos posibles ubicaciones para cada nodo estático por constelación. Al existir dos posiciones para cada nodo que se pueden tomar como pivote en cada constelación, se forman cuatro combinaciones diferentes.

De las cuatro combinaciones de pivotes anteriores, dos de ellas proveen los ángulos de rotación  $\theta$  y  $\theta'$  para los cuales la distancia cuadrática total es mínima.

En la figura 3.12 se muestran ejemplos de las gráficas de distancia cuadrática total entre pares de nodos al elegir como pivotes cada una de las combinaciones existentes. Los casos presentados corresponden a escenarios en los que:

- Los nodos reales (A) en ambas constelaciones son tomados como pivote.
- Los nodos espejo (A') en ambas constelaciones son tomados como pivote.
- Los nodos tomados como pivote son el nodo real (A) en la constelación obtenida por el móvil 1 y el nodo espejo (A') en la constelación obtenida por el móvil 2
- Los nodos tomados como pivote son el nodo espejo (A') en la constelación obtenida por el móvil 1 y el nodo real (A) en la constelación obtenida por el móvil 2.

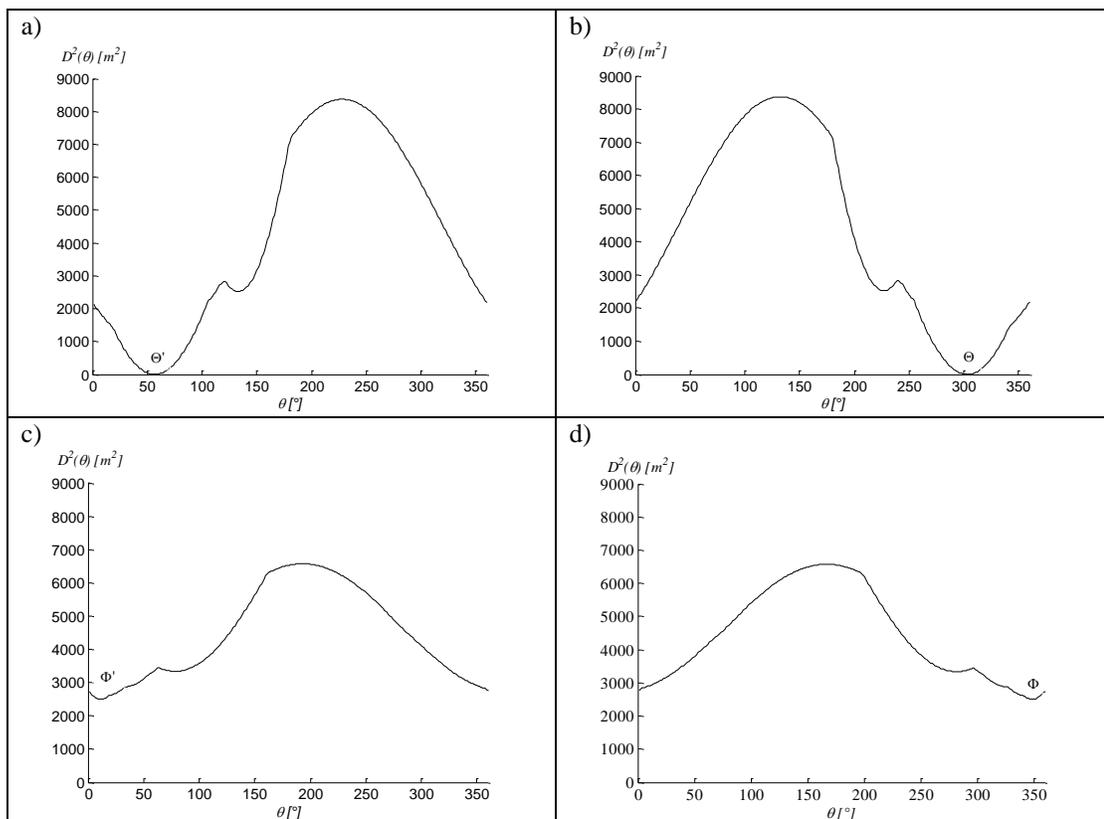


Figura 3.12 Estimación de la distancia total cuadrática entre pares de nodos tomando diferentes nodos pivotes.

En las gráficas se observa que el valor de la distancia cuadrática total se vuelve mínimo en dos combinaciones de constelaciones, y en cada una de ellas con un ángulo de rotación diferente. Los ángulos son  $\theta$  y su conjugado  $\theta'$ , con  $\theta' = 360^\circ - \theta$ .

Estos ángulos se obtienen al realizar las combinaciones adecuadas entre nodos que se usan como pivotes para la rotación. El parámetro  $\theta$  corresponde al ángulo de rotación con mínima distancia total cuadrática cuando los nodos utilizados como pivote coinciden con las posiciones reales del nodo común en ambas constelaciones. A su vez,  $\theta'$  corresponde al ángulo de rotación con distancia total cuadrática mínima cuando los nodos utilizados como pivote coinciden con las posiciones espejo del nodo común en ambas constelaciones.

- 8) En las combinaciones de constelaciones para las que se presenta  $\theta$  y  $\theta'$ , se identifican los pares de posiciones que tienen distancias cuadráticas mínimas para cada nodo estático y se mantienen para utilizarlas en la estimación de las posiciones buscadas. Los pares de posiciones para cada nodo que presentan distancias cuadráticas mayores se descartan.
- 9) Una vez que se han determinado las parejas de posiciones de los nodos estáticos en las cuales la distancia cuadrática es la mínima, la posición de cada nodo estático se calcula como el centroide o punto medio de dichas posiciones.

El centroide, que definirá la posición final estimada para cada nodo estático dentro de la red, está dado por:

$$\bar{S}_k(\bar{X}_k, \bar{Y}_k) = \left( \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m X_k^{M_j}, \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Y_k^{M_j} \right)$$

Donde:

$\bar{S}_k(\bar{X}_k, \bar{Y}_k)$  es la coordenada obtenida para cada nodo estático de la red.

$X_k^{M_j}$  es la coordenada en  $X$  obtenida para el nodo estático  $k$  por el nodo móvil  $j$ .

$Y_k^{M_j}$  es la coordenada en  $Y$  obtenida para el nodo estático  $k$  por el nodo móvil  $j$ .

$k$  es el número de nodo estático que se requiere ubicar  $k = 1, 2, 3, \dots$  hasta el número de nodos estáticos existentes en la red.

$j$  es el número de nodo móvil que proporciona su constelación y  $j = 1, 2, 3, \dots$  hasta el número de nodos móviles existentes en la red.

$m$  es el número de nodos móviles que aportan su constelación para calcular la ubicación de los nodos estáticos.

- 10) Cuando se tienen estas dos primeras constelaciones, formadas por los centroides obtenidos, pueden ser entregadas a otros usuarios móviles para que las utilicen en su recorrido a lo largo de la red, sepan qué nodos estáticos existen en ella y en dónde se encuentran ubicados y puedan dirigirse a los nodos de mayor interés.

- 11) Igual que en el caso anterior, un nuevo usuario móvil puede utilizar las constelaciones obtenidas hasta este punto para guiarse por la red. Tal nodo móvil puede determinar cuál de ambas soluciones es la correcta al seguir una trayectoria, ir percibiendo nodos que se encuentran a su alrededor y reacomodando o reorientando manualmente las constelaciones obtenidas.

El nodo móvil puede descartar una de las soluciones que se le han entregado si a lo largo de su camino realiza un cambio de trayectoria y nota que se mantiene escuchando a alguno de los nodos estáticos próximos a él o bien nota que deja de escuchar a tal nodo.

En la implementación de DoE realizada en MATLAB, la discriminación entre la solución real y la solución espejo obtenidas de las primeras dos constelaciones, se realiza de manera manual. Para ello se introdujo una función que muestra a un usuario ambas soluciones y se le solicita que elija la que mejor se apegue a la distribución real.

Este proceso solamente se lleva a cabo solo en una ocasión y permite obtener una única solución real, sin nodos espejos.

Una diferencia importante que existe entre aplicar DoE en escenarios con radios de cobertura igual al radio promedio de los nodos de la red o aplicar DoE para escenarios con radios de cobertura de los equipos diferentes al radio promedio de los nodos es que, en este segundo escenario, los nodos móviles 2, 3, 4 o m, además de utilizar los mapas de red generados por otros móviles, también pueden contribuir a mejorar estas constelaciones.

Esto se debe a que cada vez que llega un nuevo nodo móvil a la red, se le comparten las constelaciones que han sido generadas por móviles que pasaron anteriormente por la red. El nuevo nodo móvil puede combinar las constelaciones que recibe con la constelación que él mismo puede determinar a su paso por la red.

La constelación resultante, será la obtenida como el centroide de todas las posiciones estimadas por cada nodo móvil que haya pasado por la red para los nodos estáticos, más la posición calculada por este último nuevo móvil que ingresa a la red.

En la figura 3.13 se muestra una constelación obtenida al combinar la información de 100 nodos móviles que han pasado por la red. La ubicación real de los nodos estáticos se marca como \*, la posición estimada por DoE se marca como o. Cada uno de los nodos móviles ha calculado una posición para los nodos 2 y 3, y la marcan con una estrella y un rombo respectivamente. DoE estima la posición para los nodos 2 y 3 como el centroide de todas las posiciones calculadas por los móviles para cada nodo estático.

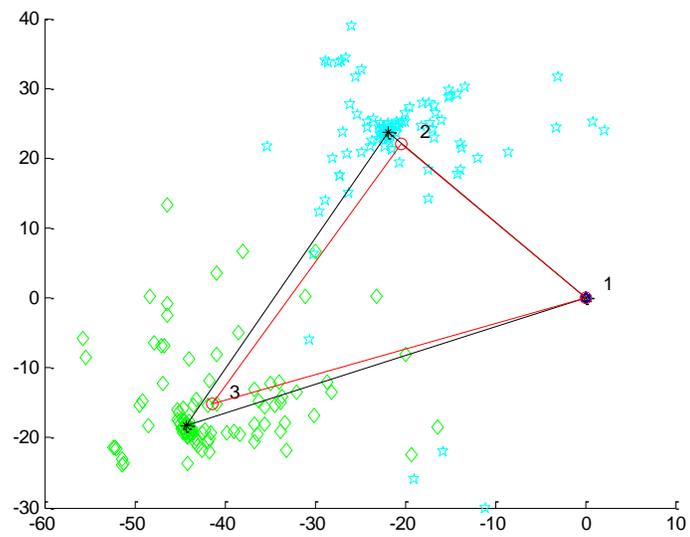


Figura 3.13 Constelación resultante de obtener los centroides de las posiciones estimadas para cada nodo estático por cada uno de los nodos que atraviesan la red.

---

## Capítulo 4. Implementación del algoritmo de ubicación de nodos en Matlab

El programa realizado en MATLAB se ha denominado DoE debido a que este nombre hace referencia a la Dirección de Encuentro (en inglés, *Direction of Encounter*), es decir al resultado que proporciona, que es la dirección aproximada a la cual se puede encontrar a los nodos estáticos que forman parte de una red.

### 4.1 Estructura del programa

DoE consta de un programa principal y varias funciones secundarias. DoE utiliza la información obtenida por nodos móviles que pasan por una red para determinar la ubicación de nodos estáticos en la misma red. DoE pretende obtener un mapa con la ubicación de los nodos estáticos lo más apegada posible a la realidad. La información generada por DoE se podrá utilizar para guiar nodos inalámbricos sobre la red y que puedan dirigirse fácilmente hacia otros nodos que le sean de interés.

### 4.2 Funcionamiento del programa

El programa puede ser ajustado con diversos parámetros que determinan las condiciones iniciales.

Parámetros configurables:

- Número de nodos estáticos y móviles
- Radio de transmisión promedio
- Trayectorias que pasen por el centro del escenario o no
- Ángulo de inclinación de las trayectorias variable
- Intervalo de variación en el alcance de transmisión del radio de cada nodo móvil
- Velocidad promedio de cada nodo móvil

Estos parámetros son configurados al inicio del programa

1) Creación del escenario de pruebas.

Dependiendo de los parámetros anteriores, se determinan las características del escenario sobre el que se desarrollará la simulación, es decir la ubicación de los nodos estáticos y las trayectorias que recorrerán los nodos móviles.

## 2) Generación de las constelaciones obtenidas por cada nodo móvil.

Después de definir el escenario de pruebas se generan los radios de alcance de cada nodo móvil. Los radios de alcance de los nodos móviles pueden ser aleatorios, de tal forma que su comportamiento se apegue más a la realidad. Para el caso general los radios de transmisión utilizados se determinan de manera aleatoria usando una distribución del tipo normal. Sin embargo, también se realizaron subrutinas que pueden modificarse para generar radios de transmisión crecientes, decrecientes y aleatorios con distribución uniforme. Los valores asignados a estos radios definen los instantes en que cada nodo móvil escucha por primera y última vez a cada nodo estático a lo largo de su camino, es decir los tiempos de primer y último encuentro. Mientras la distancia entre cada nodo móvil y cada nodo fijo sea menor o igual a su radio de transmisión, el programa estimará que puede existir comunicación entre ellos.

Los tiempos de primer y último encuentro son utilizados para formar la constelación que “observa” cada uno de los nodos móviles.

Cada constelación contiene dos puntos para la posible ubicación de cada nodo estático. Estos puntos corresponden a una posición “real” y a una posición “espejo” de los nodos fijos.

## 3) Obtención de constelaciones separadas para nodos reales y nodos espejo.

A partir de las constelaciones generadas por los primeros dos nodos móviles, se realiza un proceso de superposición, traslación y rotación entre ellas a fin de obtener un par de constelaciones mejoradas, en las cuales se separan las posiciones “reales” de las posiciones “espejo” de los nodos fijos.

El proceso se describe a continuación:

- Cada una de las constelaciones obtenidas por los nodos móviles 1 y 2 es trasladada hacia dos nuevos puntos de referencia: El primer punto de referencia que se utilizará como nuevo origen del sistema de coordenadas corresponde a la posición del nodo estático 1 que se encuentra a la derecha de la trayectoria seguida por el nodo móvil que generó cada constelación. El segundo punto de referencia que se utilizará como origen del sistema de coordenadas corresponde a la posición del nodo estático 1 que se encuentra a la izquierda de la trayectoria seguida por el nodo móvil.
- Una vez realizadas las traslaciones anteriores, las nuevas posiciones del nodo estático 1 se usan como pivote en el proceso de rotación. La rotación consiste en sobreponer la constelación 2 sobre la constelación 1, haciendo coincidir las posiciones del nodo estático 1 y, dejando fija la constelación 1, rotar sobre ella la constelación 2 a lo largo de 360°. En cada paso de la rotación se toma la distancia entre los nodos a la derecha y la izquierda de la constelación 2, respecto a los nodos de la izquierda y derecha de la constelación 1.

- El proceso se repite cuatro veces, pues es el número de combinaciones totales que pueden hacerse, tomando en cuenta que cada constelación se puede rotar sobre su nodo 1 estático de la derecha o su nodo 1 estático de la izquierda.
- Las constelaciones separadas (real y espejo) se obtienen como un promedio de las huellas dejadas para la ubicación de los nodos estáticos por cada móvil. La huella dejada por la constelación 2 se obtiene en el ángulo de rotación en el cual la suma de distancias cuadráticas entre nodos es mínima.

#### 4) Selección de la solución más cercana a los nodos reales.

En este punto del programa, el usuario elige manualmente la solución propuesta que más se acerque a las posiciones reales de los nodos estáticos. Esta solución se utilizará como referencia para los procesos siguientes del programa.

#### 5) Eliminación de los nodos espejo en las constelaciones obtenidas por los nodos móviles que entran a la red después de los dos primeros nodos móviles.

Cada constelación obtenida por un nodo móvil que atraviese la red contendrá posiciones real y espejo para cada nodo estático que escuche. A fin de separar y desechar los nodos espejo, las constelaciones nuevas se rotan sobre la constelación elegida en el punto anterior. Dado que esta constelación elegida ya no contiene posiciones espejo, al hacer las comparaciones entre constelaciones, solamente se presenta coincidencia de los nodos reales. El resto de los nodos no coincide con ningún otro nodo de la constelación mejorada, y por lo tanto se pueden descartar.

- Cada constelación obtenida por nodos móviles que entran a la red después de los nodos 1 y 2, se traslada hacia las coordenadas del nodo estático 1 a la derecha de su trayectoria y hacia las coordenadas del nodo estático 1 a la izquierda de su trayectoria.
- Una vez realizadas las traslaciones anteriores, las nuevas posiciones del nodo estático 1 se usan como pivote en el proceso de rotación. La rotación consiste en sobreponer la constelación en turno sobre la constelación seleccionada sin espejos. La constelación n-ésima se rota sobre la constelación mejorada a lo largo de 360°. En cada paso de la rotación se toma la distancia entre los nodos a la derecha y la izquierda de la constelación sin espejo, respecto a los nodos de la izquierda y derecha de la constelación que está siendo rotada.
- La rotación se repite dos veces. La primera vez se usa como pivote el nodo estático real 1 de la constelación n-ésima. La segunda vez, el punto usado como pivote es el nodo estático espejo 1.
- La constelación sin espejo para cada nodo móvil (del 3 en adelante) se obtiene como la huella dejada por dicho móvil para cada nodo estático en el ángulo de rotación en el cual el promedio y la desviación estándar en las distancias entre nodos son mínimos.

#### 6) Determinación de las posiciones de los nodos por cada nodo móvil.

Hasta este punto se tienen las huellas de las posiciones estimadas para los nodos estáticos dejadas por los nodos móviles 1 y 2, así como las constelaciones sin espejos obtenidas por los nodos móviles 3 en adelante.

Para determinar el lugar en dónde dejará sus huellas cada nodo móvil del 3 en adelante, se realiza la rotación de su constelación sin espejo sobre una constelación de huellas dejada por un móvil anterior, que puede ser seleccionado de diferentes maneras:

- a) De manera secuencial, tomando las huellas dejadas por un móvil inmediato anterior.
- b) De manera aleatoria, entre los nodos que han pasado por la red.
- c) Por parejas de constelaciones secuenciales, una vez que se tienen todas las constelaciones del total de nodos móviles.

Nuevamente, las huellas que dejará cada móvil corresponderán a las posiciones estimadas para los nodos fijos en el ángulo de rotación con menor error promedio, entre la constelación que se va rotando y las huellas dejadas por el móvil anteriormente seleccionado.

7) Determinación del centroide a partir de las posiciones calculadas por cada nodo móvil.

Con las huellas dejadas por cada nodo móvil, se puede obtener un centroide para cada nodo fijo, como el promedio de las coordenadas las huellas acumuladas en cada momento.

8) Obtención del error entre la posición estimada para cada nodo fijo y su posición real.

El resultado de este procedimiento es un diagrama con la posición estimada de cada uno de los nodos fijos que componen la red inicial. En este diagrama o mapa, también denominado constelación, pueden unirse cada uno de los puntos correspondientes a los nodos estáticos y crear una figura geométrica.

El error absoluto promedio obtenido puede calcularse como la diferencia que existe entre el tamaño de cada uno de los lados de la figura (constelación) obtenida y el tamaño de cada uno de los lados de la constelación real, entre el número de lados o segmentos que se presentan en la constelación obtenida.

$$\bar{e}_{abs} = \frac{1}{\frac{n(n-1)}{2}} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left| \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} - \sqrt{(\bar{X}_i - \bar{X}_j)^2 + (\bar{Y}_i - \bar{Y}_j)^2} \right|$$

Donde

$n$  es el número de nodos estáticos en la red.

$X_i, X_j$  Son las coordenadas reales en  $X$  para los nodos estáticos  $i$  y  $j$ .

$Y_i, Y_j$  Son las coordenadas reales en  $Y$  para los nodos estáticos  $i$  y  $j$ .

$\bar{X}_i, \bar{X}_j$  Son las coordenadas calculadas en  $X$  para los nodos estáticos  $i$  y  $j$ , después de haber pasado por la red 1, 2, 3 o hasta “m” nodos móviles.

$\bar{Y}_i, \bar{Y}_j$  Son las coordenadas calculadas en  $Y$  para los nodos estáticos  $i$  y  $j$ , después de haber pasado por la red 1, 2, 3 o hasta “m” nodos móviles.

El error relativo obtenido puede calcularse como la diferencia que existe entre el tamaño de cada uno de los lados de la figura (constelación) obtenida y el tamaño de cada uno de los lados de la constelación real divididos entre el tamaño de cada uno de los lados de la constelación real.

El error relativo promedio se obtiene al dividir el error relativo entre el número de segmentos o lados en la constelación:

$$\bar{e}_{rel} = \frac{1}{\frac{n(n-1)}{2}} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left| \frac{\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} - \sqrt{(\bar{X}_i - \bar{X}_j)^2 + (\bar{Y}_i - \bar{Y}_j)^2}}{\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}} \right| \times 100 [\%]$$

Donde, al igual que en el error absoluto,

$n$  es el número de nodos estáticos en la red.

$X_i, X_j$  Son las coordenadas reales en  $X$  para los nodos estáticos  $i$  y  $j$ .

$Y_i, Y_j$  Son las coordenadas reales en  $Y$  para los nodos estáticos  $i$  y  $j$ .

$\bar{X}_i, \bar{X}_j$  Son las coordenadas calculadas en  $X$  para los nodos estáticos  $i$  y  $j$ , después de haber pasado por la red 1, 2, 3 o hasta “m” nodos móviles.

$\bar{Y}_i, \bar{Y}_j$  Son las coordenadas calculadas en  $Y$  para los nodos estáticos  $i$  y  $j$ , después de haber pasado por la red 1, 2, 3 o hasta “m” nodos móviles.

La figura 4.1 muestra un ejemplo de las posiciones obtenidas para una red compuesta por 3 nodos estáticos, después de que han pasado por ella 100 nodos móviles. Al unir las posiciones estimadas para cada nodo estático se forma una figura triangular.

Las distancias entre los nodos reales pueden denominarse R1-R2 (distancia entre los nodos 1 y 2), R2-R3 (distancia entre los nodos 2 y 3) y R3-R1 (distancia entre los nodos 3 y 1), mientras que las distancias entre los nodos obtenidos como centroides de posiciones acumuladas, pueden denominarse C1-C2 (distancia entre los centroides 1 y 2), C2-C3 (distancia entre los centroides 2 y 3) y C3-C1 (distancia entre los centroides 3 y 1).

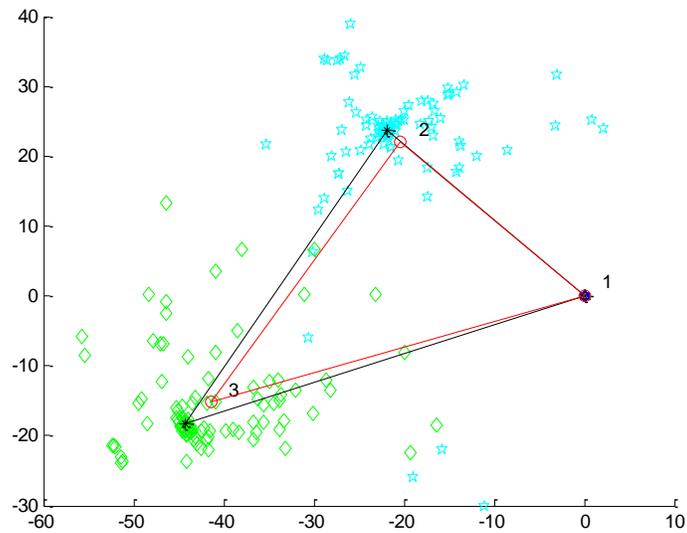


Figura 4.1 Constelación resultante para una red inalámbrica después de obtener los centroides de las posiciones estimadas para cada nodo estático por cada uno de los nodos que atraviesan la red.

Finalmente, también puede observarse cómo la diferencia de las distancias existentes entre las posiciones de los nodos reales y las distancias existentes entre las posiciones estimadas por DoE varía conforme el número de nodos móviles considerados para la estimación cambia.

La figura 4.2 muestra un ejemplo de cómo el error promedio en las distancias existentes entre las posiciones estimadas por DoE varía conforme el número de nodos móviles considerados para la estimación cambia. Esta gráfica fue obtenida en un experimento después de haber pasado 100 nodos móviles por la red y cuyos radios de alcance varió de manera aleatoria con una distribución normal entre 99 y 101 metros.

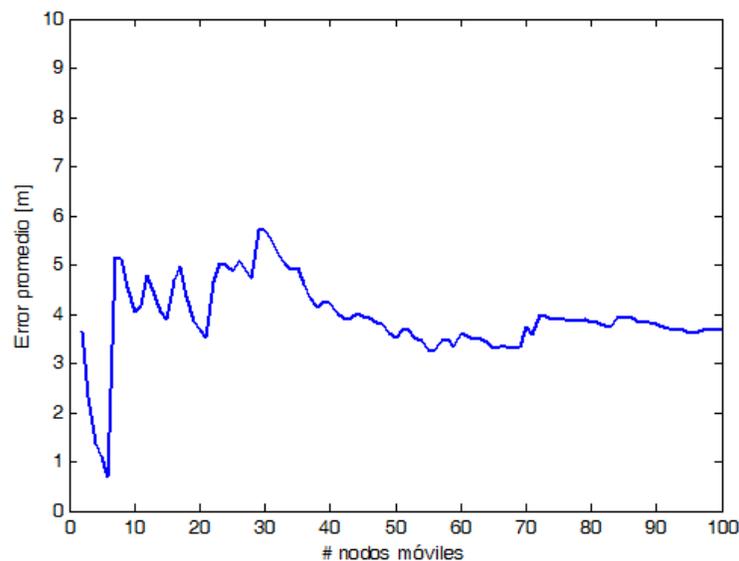


Figura 4.2 Error promedio en las distancias entre las posiciones de los nodos reales y las posiciones estimadas por DoE para una red de 3 nodos estáticos.

En la figura 4.3 se muestra el ejemplo de cómo el error promedio relativo, para el mismo experimento después de haber pasado 100 nodos móviles por la red y cuyos radios de alcance variaron de manera aleatoria entre 99 y 101 metros. Se observa que el error relativo tiende a estabilizarse en un valor cercano al 7%

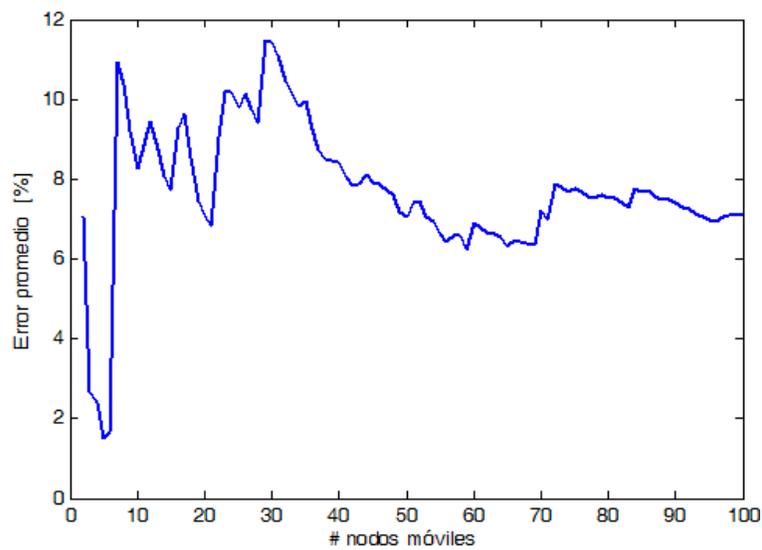


Figura 4.3 Error promedio relativo en las distancias entre las posiciones de los nodos reales y las posiciones estimadas por DoE para una red de 3 nodos estáticos.

## Capítulo 5. Pruebas y resultados

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, el objetivo de DoE es la localización de nodos estáticos dentro de una red inalámbrica. Esta ubicación de nodos estáticos puede ser utilizada como guía para nodos móviles que entran en ella, de tal forma que puedan saber hacia dónde moverse para llegar a un nodo que les sea de interés.

Supongamos que tenemos una constelación formada por cuatro nodos estáticos A, B, C y D y es atravesada por dos nodos móviles (nodo móvil 1 y móvil 2), como se muestra la figura siguiente.

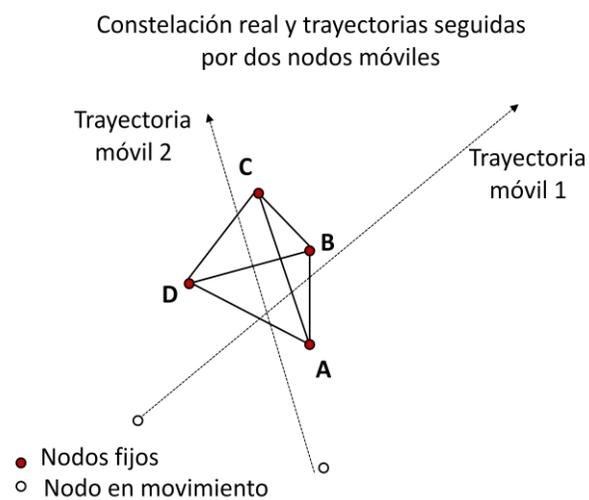


Figura 5.1 Constelación real de nodos de una red inalámbrica y trayectorias seguidas por dos nodos móviles que atraviesan la red.

Al combinar la información de los nodos móviles, se tiene como resultado un mapa similar al mostrado en la figura 5.2.

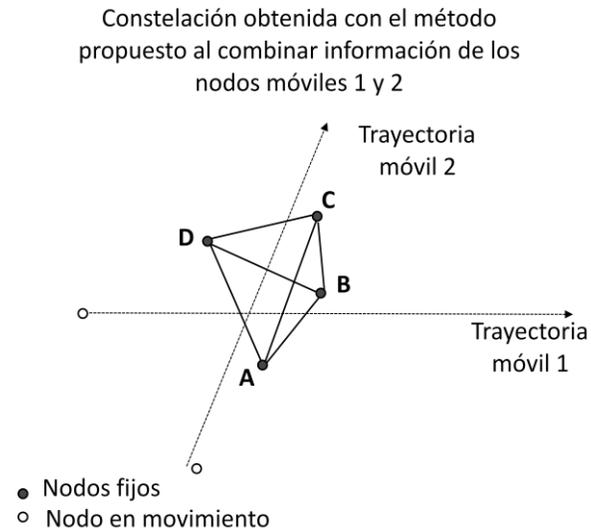


Figura 5.2 Constelación real de nodos de una red inalámbrica y trayectorias seguidas por dos nodos móviles que atraviesan la red.

Aunque el objetivo de DoE es generar y proveer a otros usuarios con un mapa de la red inalámbrica que muestre la existencia de los estáticos y su distribución geográfica, dado que no se cuenta con posiciones absolutas de referencia de ninguno de los nodos, la solución ofrecida por el método de localización está constituida sólo por posiciones relativas a las trayectorias de los nodos móviles que pasan por la red.

Sin embargo, aunque la constelación definida por DoE, no se encuentra en la misma orientación que la constelación original, sí pueden verse los nodos estáticos que constituyen la red original. Los nodos de la constelación estimada tienen el mismo acomodo y presentan las mismas posiciones relativas que los nodos reales. Además, tanto en la constelación original como en la constelación obtenida por el método, se pueden también apreciar las relaciones de distancias entre diferentes nodos. Para el ejemplo mostrado estas distancias son:  $\overline{AB}$ ,  $\overline{AC}$ ,  $\overline{AD}$ ,  $\overline{BC}$ ,  $\overline{BD}$  y  $\overline{CD}$ .

Por ello, como se mencionó en el capítulo anterior, se designaron dos medidas de desempeño para corroborar la validez de DoE. Además del acomodo visual de los nodos, se propone medir el error promedio y el error promedio relativo. Ambos errores indican la diferencia de distancias entre nodos estáticos dentro de la constelación obtenida y dentro de la constelación real.

---

## 5.1 Descripción de las pruebas

Los resultados mostrados en este capítulo corresponden a tres diferentes experimentos, realizados bajo las siguientes condiciones:

- Número de nodos estáticos,  $n = 3$ .
- Número de nodos móviles,  $m = 100$ .
- Trayectorias aleatorias que no pasan por el centro del escenario con ángulo de inclinación de las trayectorias variable.
- Velocidad promedio de cada nodo móvil 1 m/s.
- Alcance de transmisión de cada nodo móvil variable con una distribución de tipo normal, con media  $R = 100$  metros.
- Desviación estándar de  $\sigma = 1$  metro en el experimento 1,  $\sigma = 5$  metros en el experimento 2 y  $\sigma = 10$  metros en el experimento 3.

De estas condiciones, se desprende que la variación en el alcance de transmisión de los nodos móviles presenta un valor igual a  $\frac{\sigma}{R} \times 100$  [%]. Por lo tanto la variación en el alcance de transmisión para los experimentos 1, 2 y 3 es de 1%, 5% y 10% , respectivamente.

Con estos tres experimentos se pudo verificar la exactitud del método de localización y se pudo apreciar cómo el resultado se afecta de acuerdo con el principal factor de cambio, definido como la variabilidad del alcance de cobertura entre los nodos estáticos y móviles. Esto, de manera similar al escenario en la vida real en que la cobertura de un nodo inalámbrico puede verse afectada por factores externos como obstáculos, zonas de sombra o tipo de terreno.

Cada experimento se repitió 100 veces.

## 5.2 Resultados de las pruebas

### 5.2.1 Experimento 1. Variación del radio de transmisión del 1%

Este experimento se ejecutó 100 veces. Cada vez se utilizaron las siguientes características comunes:

- Número de nodos estáticos,  $n = 3$ .
- Número de nodos móviles,  $m = 100$ .
- Trayectorias aleatorias que no pasan por el centro del escenario con ángulo de inclinación de las trayectorias variable.
- Velocidad promedio de cada nodo móvil 1 m/s.
- Alcance de transmisión de cada nodo móvil variable con una distribución de tipo normal, con media  $R = 100$  metros.
- Desviación estándar de  $\sigma = 1$  metro.

En conjunto, de las 100 ejecuciones, el error absoluto promedio en distancias entre nodos estáticos reales y nodos estáticos calculados,  $\bar{e}_{abs}$ , fue de 2.61 m, distribuyéndose de la siguiente forma:

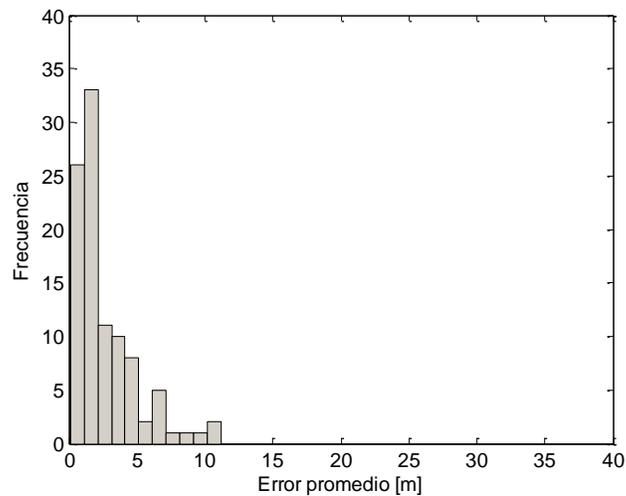


Figura 5.3 Distribución de error absoluto promedio después de haber realizado 100 experimentos con radios de cobertura promedio de 100 m y variación de  $\pm 1\%$

En conjunto, de las 100 ejecuciones, el promedio en el error relativo en distancias entre nodos estáticos reales y nodos estáticos calculados,  $\bar{e}_{rel}$  fue de alrededor de 6%, manteniéndose en general por debajo del 30%, distribuyéndose de la siguiente forma:

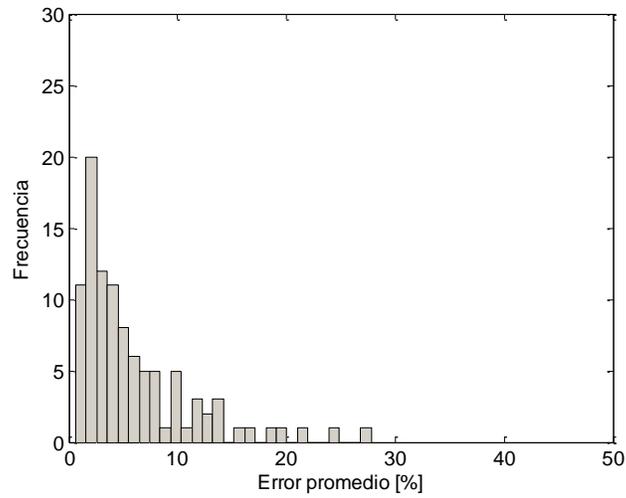


Figura 5.4 Distribución de error relativo promedio después de haber realizado 100 experimentos con radios de cobertura promedio de 100 m y variación de  $\pm 1\%$

En la figura 5.5 se muestra el detalle de uno de los 100 experimentos:

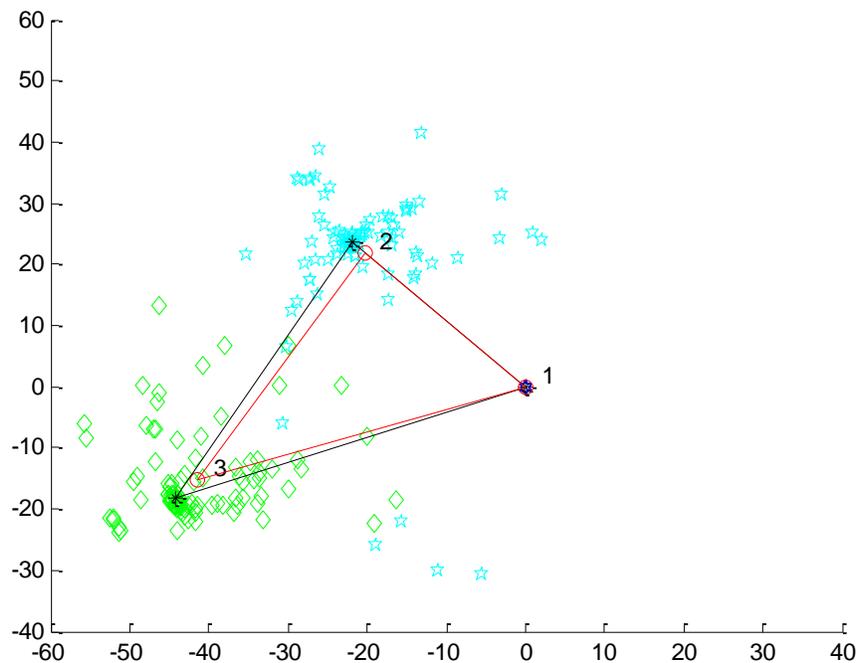


Figura 5.5 Constelación real, constelación obtenida y posiciones estimadas por cada móvil para los nodos estáticos de la red inalámbrica. Experimentos con radio promedio de cobertura de 100 metros y variación de  $\pm 1\%$

En la figura 5.5 se observan los tres nodos estáticos que forman la red, llamados de manera secuencial nodo 1, 2 y 3, marcados con asterisco. Dado que el nodo 1 fue utilizado como nodo pivote y referencia en cada una de las iteraciones de traslación y rotación para encontrar la posición de nodos estimados por cada móvil, siempre aparece como el origen de la constelación final, sin ningún cambio.

Los nodos 2 y 3 fueron estimados como el centroide de las posiciones determinadas para ellos por cada uno de los 100 nodos móviles. Las marcas en forma de estrella corresponden a las posiciones encontradas para el nodo 2, mientras que las marcas en forma de rombo corresponden a las posiciones encontradas para el nodo 3.

El centroide final para cada nodo, se marca como una pequeña circunferencia.

En este experimento particular, las distancias entre los nodos estáticos calculados y los nodos estáticos reales fueron:

Tabla 1. Comparativo de distancia entre nodos en la constelación real y distancia entre nodos en la constelación obtenida con DoE. Experimento 1

	Distancias reales [m]	Distancias encontradas [m]	Diferencia de distancia [m]	Error Promedio [m]
Nodo1-Nodo2	32.33	29.95	-2.38	3.69
Nodo1-Nodo3	47.65	42.72	-4.93	
Nodo2-Nodo3	47.89	44.14	-3.76	

### 5.2.2 Experimento 2. Variación del radio de transmisión del 5%

Este experimento se ejecutó 100 veces. Cada vez se utilizaron las siguientes características comunes:

- Número de nodos estáticos,  $n = 3$
- Número de nodos móviles,  $m = 100$
- Trayectorias aleatorias que no pasan por el centro del escenario con ángulo de inclinación de las trayectorias variable.
- Velocidad promedio de cada nodo móvil 1 m/s.
- Alcance de transmisión de cada nodo móvil variable con una distribución de tipo normal, con media  $R = 100$  metros
- Desviación estándar de  $\sigma = 5$  metros.

En conjunto, de las 100 ejecuciones, el error promedio en distancias entre nodos estáticos reales y nodos estáticos calculados,  $\bar{e}_{abs}$ , fue de 8.65 m, distribuyéndose de la siguiente forma:

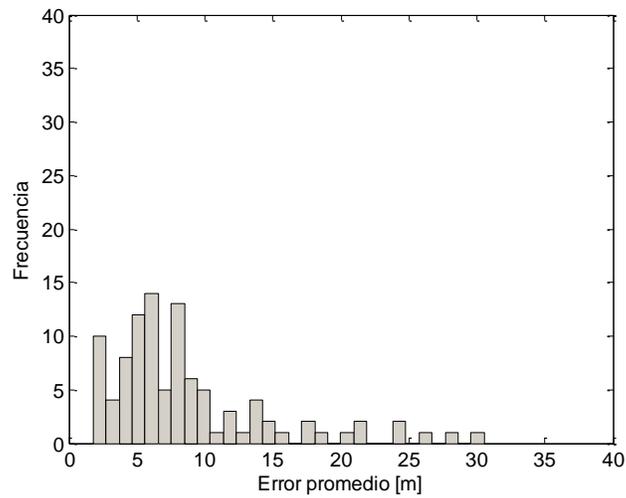


Figura 5.6 Distribución de error absoluto promedio después de haber realizado 100 experimentos con radios de cobertura promedio de 100 m y variación de  $\pm 5\%$

De igual forma, de las 100 ejecuciones, el error relativo promedio en distancias entre nodos estáticos reales y nodos estáticos calculados,  $\bar{e}_{rel}$  fue del 20%, distribuyéndose de la siguiente forma:

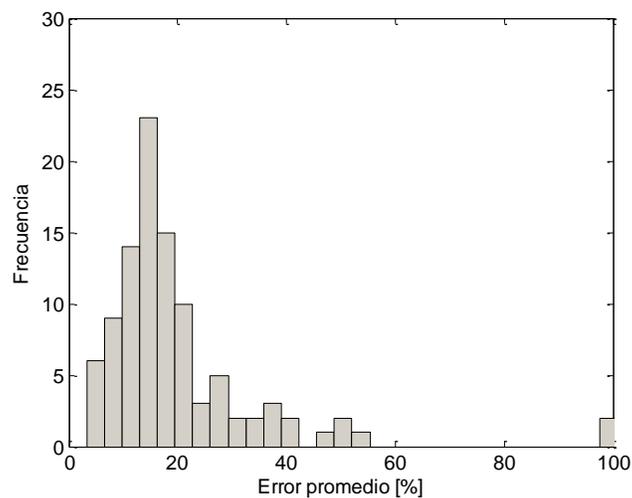


Figura 5.7 Distribución de error relativo promedio después de haber realizado 100 experimentos con radios de cobertura promedio de 100 m y variación de  $\pm 5\%$

En la figura 5.8 se muestra el detalle de uno de los 100 experimentos:

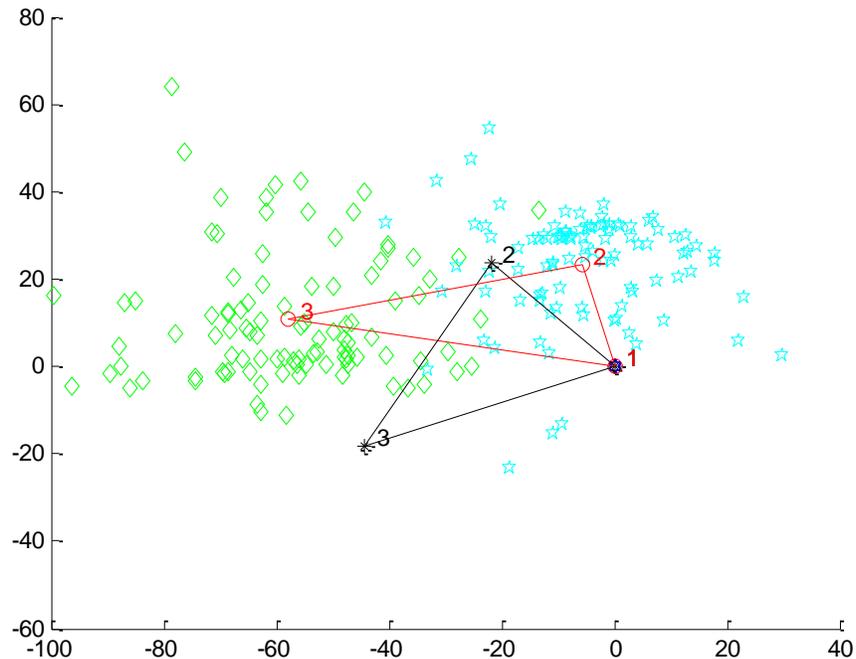


Figura 5.8 Constelación real, constelación obtenida y posiciones estimadas por cada móvil para los nodos estáticos de la red inalámbrica. Experimentos con radio promedio de cobertura de 100 metros y variación de  $\pm 5\%$

En la figura se observan 3 nodos estáticos llamados de manera secuencial nodo 1, 2 y 3, marcados con asterisco. Dado que el nodo 1 fue utilizado como nodo pivote y referencia en cada una de las iteraciones de traslación y rotación para encontrar la posición de nodos estimados por cada móvil, siempre aparece como el origen de la constelación final, sin ningún cambio.

Los nodos 2 y 3 fueron estimados como el centroide de las posiciones determinadas para ellos por cada uno de los 100 nodos móviles. Las marcas en forma de estrella corresponden a las posiciones encontradas para el nodo 2, mientras que las marcas en forma de rombo corresponden a las posiciones encontradas para el nodo 3.

El centroide final para cada nodo, se marca como una pequeña circunferencia.

En este experimento particular, las distancias entre los nodos estáticos calculados y los nodos estáticos reales fueron:

Tabla 2. Comparativo de distancia entre nodos en la constelación real y distancia entre nodos en la constelación obtenida con DoE. Experimento 2

	Distancias reales [m]	Distancias encontradas [m]	Diferencia de distancia [m]	Error Promedio [m]
Nodo1-Nodo2	32.33	23.99	-8.33	8.36
Nodo1-Nodo3	47.65	53.56	5.91	
Nodo2-Nodo3	47.89	58.74	10.85	

### 5.2.3 Experimento 3. Variación del radio de transmisión del 10%

En este experimento, el método de localización de nodos dentro de redes inalámbricas se ejecutó 100 veces. En cada una de esas 100 ejecuciones se generó un escenario de pruebas diferentes, pero de las mismas características:

- Número de nodos estáticos,  $n = 3$
- Número de nodos móviles,  $m = 100$
- Trayectorias aleatorias que no pasan por el centro del escenario con ángulo de inclinación de las trayectorias variable.
- Velocidad promedio de cada nodo móvil 1 m/s.
- Alcance de transmisión de cada nodo móvil variable con una distribución de tipo normal, con media  $R = 100$  metros
- Desviación estándar de  $\sigma = 10$  metros.

En conjunto, de las 100 ejecuciones, el error promedio en distancias entre nodos estáticos reales y nodos estáticos calculados,  $\bar{e}_{abs}$ , fue de 10.53 m, distribuyéndose de la siguiente forma:

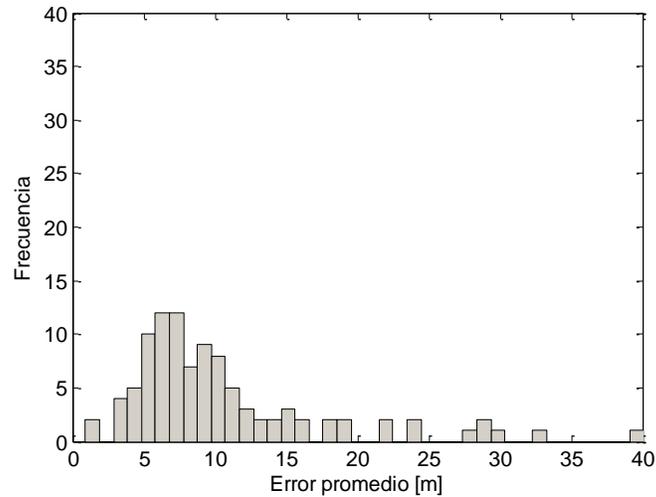


Figura 5.9 Distribución de error absoluto promedio después de haber realizado 100 experimentos con radios de cobertura promedio de 100 m y variación de  $\pm 10\%$

Finalmente, en esta serie de 100 ejecuciones, el error relativo promedio en distancias entre nodos estáticos reales y nodos estáticos calculados,  $\bar{e}_{rel}$ , fue del 27%, y llegando a sobrepasar del 100% en un par de experimentos. El error relativo promedio se tuvo una distribución como la que se muestra en la figura 5.10:

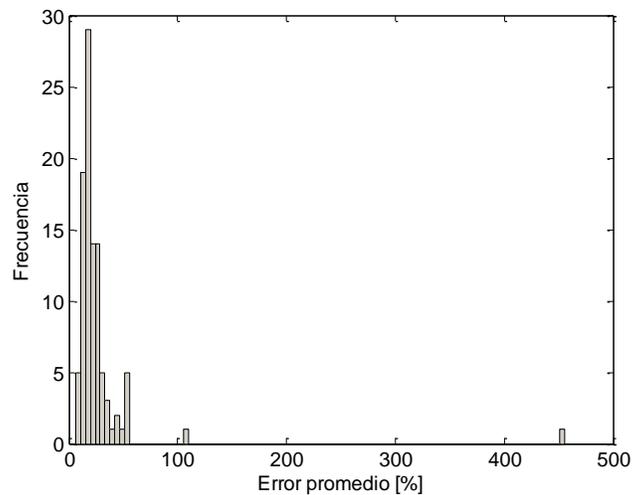


Figura 5.10 Distribución de error relativo promedio después de haber realizado 100 experimentos con radios de cobertura promedio de 100 m y variación de  $\pm 10\%$

En la siguiente figura se muestra el detalle de uno de los 100 experimentos:

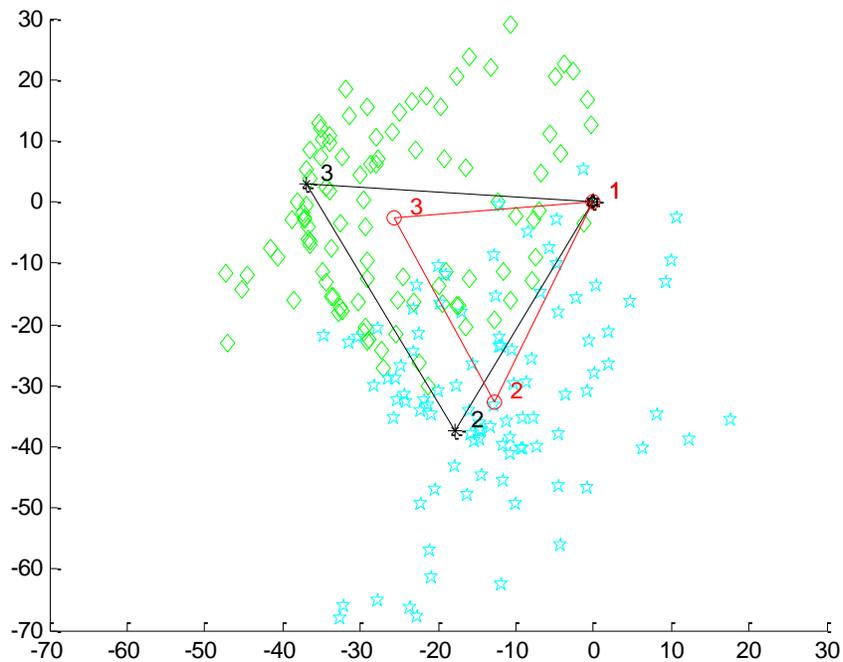


Figura 5.11 Constelación real, constelación obtenida y posiciones estimadas por cada móvil para los nodos estáticos de la red inalámbrica. Experimentos con radio promedio de cobertura de 100 metros y variación de  $\pm 10\%$

En la figura se observan los nodos estáticos llamados de manera secuencial nodo 1, 2 y 3, marcados con asterisco negro. Dado que el nodo 1 fue utilizado como nodo pivote y referencia en cada una de las iteraciones de traslación y rotación para encontrar la posición de nodos estimados por cada móvil, siempre aparece como el origen de la constelación final, sin ningún cambio.

Los nodos 2 y 3 fueron estimados como el centroide de las posiciones determinadas para ellos por cada uno de los móviles. Las marcas en forma de estrella corresponden a las posiciones encontradas para el nodo 2, mientras que las marcas en forma de rombo corresponden a las posiciones encontradas para el nodo 3.

El centroide final para cada nodo, se marca como una pequeña circunferencia en color rojo.

En este experimento particular, la distancia entre los nodos estáticos calculados y los nodos estáticos reales fueron:

Tabla 3. Comparativo de distancia entre nodos en la constelación real y distancia entre nodos en la constelación obtenida con DoE. Experimento 3

	Distancias reales [m]	Distancias encontradas [m]	Diferencia de distancia [m]	Promedio [m]
Nodo1-Nodo2	41.35	35.07	-6.28	9.81
Nodo2-Nodo3	44.57	32.75	-11.82	
Nodo3-Nodo1	37.09	25.78	-11.32	

## 5.2 Comparación de resultados de DoE y resultados obtenidos con otros métodos de localización.

El incremento en uso de redes inalámbricas y aplicaciones basadas en localización de nodos, ha traído consigo el incremento en los métodos de localización. Dependiendo de las características y uso de las redes, los métodos de localización a utilizarse podrán estar dentro del grupo de los métodos basados en distancia o el grupo de los métodos basados en conectividad.

Un sin número de trabajos previos hacen énfasis en que al funcionar de manera diferente, el desempeño de los métodos pertenecientes a cada grupo, también es diferente.

En general, los métodos basados en distancia son mucho más exactos que los métodos basados en conectividad, pero tienen como desventaja de requerir hardware especializado, lo cual los hace costosos.

Debido a que DoE es un método basado en conectividad, es difícil hacer una comparación de los resultados obtenidos aquí con respecto a los resultados que proporcionan los métodos basados en distancia.

Como referencia, en la Tabla 4 se muestra parte de los resultados de un estudio de métodos de localización basados en mediciones de la señal, realizado por [13].

Tabla 4. Comparativo de precisión y costos en diferentes formas de estimación de distancias para métodos de localización. Tabla adaptada de [13]

Parámetro utilizado para la estimación	Precisión	Costo o requerimientos
Tiempo de arribo de la señal	Centímetros - metros	Sincronización / Hardware
Defasamiento en la señal	< que la longitud de la onda	Hardware
Potencia Recibida	Metros	--
Ángulo de llegada de la señal	--	Hardware

Dentro de los resultados encontrados para otros métodos de localización basados en conectividad, se tiene que:

- 1) Según [3], para los casos de estudio de los métodos basados en intersección rectangular y hexagonal, el error en la estimación de las posiciones de nodos puede verse afectada por el número total de nodos en la red y el porcentaje de nodos ancla existentes.
  - a. En intersección rectangular los valores oscilan desde 20 a 70 metros. En el mejor caso, se realizaron pruebas con 300 nodos de los cuales 60% eran nodos ancla. En el caso de mayor error se trabajó con 100 nodos totales, siendo un 10 % de ellos ancla.
  - b. En intersección hexagonal, los valores oscilan desde 18 a 68 metros. El menor error se obtuvo en escenarios con 300 nodos, de los cuales 60% eran nodos ancla. El mayor error se presentó al trabajar con 100 nodos totales, con un 10 % de ellos siendo ancla.

En ambos casos se estimó el radio promedio de alcance de los nodos en 100 metros.

- 2) De acuerdo con [5], para APIT, el error en la estimación de las posiciones de los nodos puede variar en función del número de nodos ancla que pueden detectar a los nodos de ubicación desconocida, la densidad de nodos vecinos, el grado de irregularidad en los radios de cobertura de los nodos o incluso debido a variaciones en la exactitud de la ubicación de los nodos ancla provista por sistemas de GPS. El error varió con respecto a los radios de cobertura  $R$ , en un intervalo de  $0.4R$  hasta un máximo de casi  $6R$ . Esto para un radio de cobertura promedio de 100 metros, podría indicar una variación en las posiciones desde 40 hasta 600 metros.
- 3) En DoE, los errores presentados estuvieron en función de la variabilidad del radio de transmisión de los nodos. El error absoluto mínimo obtenido fue de menos de 1 metro, en casos con radio de cobertura variable de 100 metros  $\pm 1\%$  y el error absoluto máximo fue de alrededor de 40 metros al utilizar radios de cobertura variable de 100 m  $\pm 10\%$ . Sin embargo, debe destacarse que este error no corresponde a la diferencia entre la posición

---

real de cada nodo y su posición estimada, sino a la diferencia en el tamaño del segmento que une 2 nodos adyacentes.

Se puede observar que la exactitud presentada en estos 3 métodos de localización, se encuentra en órdenes de magnitud similares.

### 5.3 Conclusiones del capítulo

De acuerdo con los experimentos desarrollados se puede apreciar que las constelaciones de nodos obtenidas mediante el método de localización propuesto, generalmente presentan la misma distribución y forma que la constelación original de nodos estáticos.

Dependiendo de la dirección de la trayectoria del primer nodo móvil que se utiliza para obtener las constelaciones mejoradas, la orientación de la constelación puede variar. Cuando se trata de una constelación inicial con un error elevado, en caso de que se mantenga como referencia para obtener las constelaciones combinándola con constelaciones de otros nodos, puede acarrear ese error.

Una forma que se encontró para minimizar este riesgo es que las constelaciones de nuevos nodos móviles no se comparen con una constelación específica ni con alguna constelación individual, sino con el centroide obtenido a partir de la combinación de múltiples constelaciones previas.

En las estimaciones individuales por cada nodo móvil para las posiciones de los nodos estáticos es notorio cómo al incrementar la variabilidad del radio de cobertura de los nodos, las posiciones estimadas se dispersan también en mayor proporción y aun cuando la posición final se obtiene como el centroide de ellas, también se ve afectado conforme a la dispersión.

También se observa que el cambio en los radios y variaciones de la cobertura de los nodos incide directamente sobre el error medio obtenido. Así, para radios de cobertura con variación de solamente 1%, el error promedio se mantuvo menor a 12 metros, al incrementar la variabilidad de los radios al 5%, este error aumentó hasta un máximo cercano a los 30 metros y al final, con variabilidad del 10 % en el radio de transmisión, el error promedio en las distancias entre nodos se incrementó hasta alcanzar picos de 40 metros. Esto se traduce en errores de aproximadamente 10%, 30% y 40% del incremento en el radio nominal.

De igual forma, se observó que conforme la variabilidad en el radio de transmisión aumentó, el error promedio relativo, en términos de porcentaje, también se incrementó. Para los experimentos con radio promedio de 100 metros y variabilidad de  $\pm 1\%$ , el error promedio relativo se ubicó entre 0 y 28%. Para los experimentos con variabilidad en los radios de cobertura de  $\pm 5\%$ , el error promedio relativo se ubicó entre 0 y 55%, llegando en un par de casos a 100%. En los casos experimentales con radio promedio de 100 metros y variabilidad de  $\pm 10\%$ , el error promedio

relativo se ubicó entre 0 y 60% con un par de casos extraordinarios que alcanzaron 100% y 453% de error.

En relación con el desempeño de otros sistemas de localización basados en conectividad, se observa que los errores absolutos de DoE están en el mismo orden de magnitudes que los errores presentados en intersección rectangular, hexagonal y en el método APIT.

## Capítulo 6. Conclusiones de la tesis

En esta tesis se presentó DoE que es un método para localización y ubicación de nodos dentro de una red inalámbrica. DoE está basado en la movilidad y en la capacidad que tienen los nodos de red inalámbrica de detectar cuándo entran o salen del área de cobertura de otros nodos. DoE, no requiere la instalación de equipo adicional en los nodos. Esta condición simplifica el proceso de implementación de la solución y también reduce los costos asociados.

Si bien, este método es similar a aquellos métodos basados en conectividad, también tiene sutiles diferencias. DoE no brinda posiciones absolutas de los nodos encontrados, sino posiciones relativas en referencia a las trayectorias de los nodos móviles que se utilizan para el funcionamiento del método, lo cual, sin embargo no lo hace menos efectivo. Por el contrario, puede utilizarse para propósitos sencillos como la identificación de sitios dentro de campos universitarios, zonas comerciales o en redes destinadas a usuarios con perfil simplemente de esparcimiento.

Los errores obtenidos debido a la variabilidad en los radios de cobertura de los nodos inalámbricos es un tema que debe considerarse, y puede destacarse, con base en los experimentos realizados, que este método funciona mejor cuando las redes inalámbricas se encuentran dentro de un ambiente homogéneo, libre de zonas oscuras y obstáculos que puedan influir en esta variabilidad.

Algunas otras aplicaciones a futuro de métodos como el presentado en este trabajo pueden ser el determinar las rutas a seguir por ciertos nodos en función de la necesidad que tengan de conectarse a nodos que realicen tareas específicas y se encuentren a grandes distancias de él. También, al combinar esta localización con el conocimiento de perfiles específicos de usuarios, puede implementarse un manejo de contenido especial para cada usuario en función de su ubicación.

Finalmente, la aportación principal del método es considerar la capacidad para aprovechar la movilidad que tienen los nodos al encontrarse en una red inalámbrica y a partir de ella desarrollar nuevas formas de establecer las posiciones de nodos, alternativas a los métodos tradicionales de localización y determinación de rutas .

## Glosario

AoA: *Angle of Arrival*, en español Ángulo de Llegada

APIT: *Approximated Point In Triangulation*, en español Punto Aproximado en Triangulación.

DoE: *Direction of Encounter*, en español Dirección de Encuentro

GPS: *Global Positioning System*, en español Sistema de Posicionamiento Global

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

PDA: *Personal Digital Assistant*, en español Asistente Digital Personal

RSSI: *Received Signal Strength Indicator*, en español Indicador de la Intensidad de la Señal Recibida

TDoA: *Time Difference of Arrival*, en español Diferencia en el Tiempo de Arribo

TIC: Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

ToA: *Time of Arrival*, en español Tiempo de Arribo

WiFi: *Wireless Fidelity*, terminología usada también para denominar a una red inalámbrica de área local

WLAN: *Wireless LAN*, en español Red Inalámbrica de Área Local

---

## Referencias

- [1] González Marco Antonio, Gómez Javier, Lopez-Guerrero Miguel, Torres-Fernandez Jose E. y Rangel Victor. "GUIDE: Guiding Users in Distributed Environments for WLAN and Ad Hoc Networks". Networking and Electronic Commerce Research Conference 2008 (NAEC 2008). Italia. Septiembre 2008.
- [2] González Silva, Marco Antonio. "Diseño e implementación de un sistema guía de nodos ad hoc sobre redes híbridas inalámbricas". Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas. 2008.
- [3] Garcia, E. M., Bermudez, A., Casado, R., Quiles, F. J. "Wireless Sensor Network Localization using Hexagonal Intersection". International Federation for Information Processing. Volumen 248 Wireless Sensor and Actor Networks. Boston: Springer. 2007
- [4] García Polo, Eva María. "Técnicas de Localización en Redes Inalámbricas de Sensores". Actas XXI Curso de Verano de la Universidad de Castilla-La Mancha. "Redes inalámbricas de sensores: arquitecturas y aplicaciones". Ed. Ediciones de la Universidad de Castilla - La Mancha. Albacete, España. Julio 2008.
- [5] He, T., Huang, C., Blum, B. M., Stankovic, J. A., & Abdelzaher, T. "Range-free localization schemes for large scale sensor networks". Proceedings 9th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM Press 2003.
- [6] <http://www.cisco.com>
- [7] Herrero García, Alberto. "Localización de nodos dentro de una red inalámbrica de sensores". Trabajo de Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Cataluña. Junio 2009.
- [8] Cisco Systems."Módulo I y II de curso CCNA Exploration Versión 4.0". En <http://www.cisco.com/web/learning/netacad>. 2007.
- [9] Martín Sergio, Castro Manuel, Gil Rosario, Peire Juan. "Experiencias con un gestor de aplicaciones basado en localización mediante redes inalámbricas". Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, UNED. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia v. 8: 1 y 2. España 2005.
- [10] Descripción del sistema de localización vehicular en [http://www.telcel.com/portal/empresas/loc\\_vehicular.html](http://www.telcel.com/portal/empresas/loc_vehicular.html). Consultado 15 noviembre 2011.
- [11] Instituto Nacional de Informática y Geografía. "Estadística a propósito del día mundial del internet". Datos nacionales. Aguascalientes. Mayo 2011.
- [12] Moreno Escobar, Carlos Ernesto. "Localización en redes inalámbricas de sensores". Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana. Enero 2011.

[13] Rejane Dalce, Thierry Val, Adrien Van Den Bossche. "Comparison of Indoor Localization Systems Based on Wireless Communications". *Wireless Engineering and Technology. Scientific Research*. 2011