



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA
DE LOCALIZACIÓN BASADO EN MOVILIDAD**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTAN:

ALTAMIRANO GUZMÁN GABRIEL NORBERTO

PEÑA NÚÑEZ FELIPE DE JESÚS

TUTOR:

DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS



2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **M.I. Jesús Reyes García**
Secretario: **Dr. Javier Gómez Castellanos**
Vocal: **M.I. Margarita Bautista González**
1^{er} Suplente: **M.I. Juventino Cuellar González**
2^{do} Suplente: **Dr. Victor Rangel Licea**

Lugar donde se realizó la tesis: México, D.F.

**TUTOR DE TESIS:
DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS**

Firma

DEDICATORIAS

Gabriel Norberto Altamirano Guzmán

A mis padres Marcelino y Teresa, por su apoyo y entusiasmo constante,
GRACIAS.

A mis hermanos Marcelino, Hilda, Rosalba y Eduardo, ustedes son los
verdaderos merecedores de este título.

A mis amigos y compañeros, por todos los momentos compartidos.

A mi *Alma máter*, Universidad Nacional Autónoma de México por la
formación Humanista que me ha brindado, pero sobre todo por permitirme
jugar con eso que llaman conocimiento.

DEDICATORIAS

Felipe de Jesús Peña Núñez

A mis padres Guadalupe y Felipe por su apoyo, confianza y compromiso en mi educación siendo los cimientos de este logro, sus enseñanzas y palabras de aliento siempre estarán presentes a cada paso que dé.

A mi Familia que siempre estuvo presente apoyándome en cada momento, siendo parte esencial en mi vida.

A mis amigos y compañeros que caminamos juntos a cada momento y hoy vemos culminado un sueño.

A mi asesor de Tesis Dr. Javier Gomez, por su apoyo y dedicación en este trabajo que está plasmado en estas páginas.

Índice

1	Introducción	- 3 -
1.1	Antecedentes	- 3 -
1.2	Problemas en Sistemas de Localización	- 7 -
1.3	Presentación DoE	- 9 -
1.4	Objetivo de la Tesis	- 11 -
1.5	Estructura de la Tesis	- 11 -
2	Estado del arte.....	- 13 -
2.1	Esquemas de Localización basados en Rango de Transmisión.....	- 13 -
2.1.1	Tiempo de Arribo	- 14 -
2.1.2	Diferencia de Tiempo de Arribo.....	- 17 -
2.1.3	Ángulo de Arribo.....	- 19 -
2.1.4	Atenuación de la Señal	- 21 -
2.2	Esquemas de Localización basados en Conectividad	- 22 -
2.2.1	Vector de Distancia.....	- 22 -
2.2.1	Escalamiento Multidimensional (MDS).....	- 23 -
3	DoE.....	- 25 -
3.1	Idea Fundamental del tema de Tesis	- 25 -
3.2	Operación de DoE.....	- 26 -
3.2.1	Proceso de Localización de los Nodos Estáticos	- 34 -
4	Experimentos DoE	- 38 -
4.1	Metodología de la Implementación del Método DoE	- 38 -
4.2	Implementación del Método DoE en Matlab	- 40 -
4.3	Experimento realizado en Ciudad Unversitaria	- 42 -
4.3.1	Resultados del Experimento en Ciudad Universitaria	- 43 -
4.4	Experimento en Localidad de la Ciudad de México	44
4.4.1	Resultados del Experimento de la Localidad de la Ciudad de México ...	51

5	Conclusiones	55
6	Bibliografía	56
7	Índice de Figuras.....	58
8	Índice de Tablas	59
9	Glosario.....	60

1 Introducción

En la actualidad los sistemas de localización están tomando una gran importancia debido a que proporcionan información relacionada con la ubicación de un dispositivo u objeto sin la necesidad de que el usuario tenga que proporcionar datos al sistema en uso. Esto resulta bastante atractivo debido a la gran facilidad con la que se puede hacer uso de este tipo de sistemas. Claro está que el uso de estos servicios tiene un costo, el cual depende primordialmente de la complejidad con la que el sistema de localización haya sido desarrollado y la tecnología utilizada para su implementación. Bastaría con observar cualquier sistema de localización que usemos comúnmente para darnos cuenta de que hay varios aspectos relacionados a ello. Ejemplos van desde una interfaz gráfica, mapas, hasta el propio hardware del dispositivo que se usa o el dispositivo en sí.

En este primer capítulo se aborda una breve descripción de sobre sobre los sistemas de localización e introducción del tema primordial de esta tesis el método DoE.

1.1 Antecedentes

Un sistema de localización es aquel que tiene la habilidad para ubicar a un usuario móvil en un área geográfica. Para poder llevar a cabo esto, el sistema en cuestión se auxilia de diferentes tecnologías e infraestructuras, las cuales permiten optimizar este proceso. Sin embargo, muchas veces el

uso de estas se ve reflejado en el costo que el usuario tiene que pagar por el servicio.

La localización se refiere a un lugar físico. Es posible distinguir distintos tipos de localización física tales como: Localización Descriptiva, Localización Espacial y Localización de Red. Aunque en esencia los tres tipos antes mencionados brindan cierta información referente al objetivo a localizar, cada uno hace referencia a un término en particular.

La Localización Descriptiva hace referencia primordialmente a lugares geográficos tales como montañas, ríos, territorios, casas, edificios o algún tipo de infraestructura que se encuentra sobre la superficie terrestre. La Localización Espacial se refiere principalmente a un punto en el espacio euclidiano, este punto denota una ubicación específica y generalmente está dada en forma de vector. Al ser de carácter espacial nos provee una ubicación que no necesariamente se encuentra sobre la superficie de la tierra, de ahí la diferencia que tiene directamente con el caso de la localización descriptiva. La Localización por Red es un concepto recientemente propuesto debido a la gran expansión que han tenido las redes de comunicaciones, tales como las redes de telefonía móvil. Este término se refiere primordialmente al sector dentro de la red donde se encuentra el dispositivo a localizar, ya sea un teléfono celular o cualquier otro dispositivo que se provea del servicio de red de comunicaciones.

Hasta el momento no hemos hablado de la complejidad de los sistemas de localización, ni de las herramientas de las que

se auxilia para conseguir ese objetivo. Por ello a continuación se dará una breve descripción de algunas de las herramientas de las que se auxilian estos sistemas, así como también se mencionaran algunos de los problemas o limitaciones en las que se ven inmersos estos. Más adelante, en el capítulo II, se abordarán los diferentes esquemas de localización que se usan en la actualidad con la finalidad de tener un panorama más amplio del tema a tratar.

Antes de mencionar dichas herramientas, cabe aclarar dos conceptos de vital importancia. Como ejemplo veamos el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) [3], el cual nos proporciona las coordenadas de un objeto basadas su posición que se encuentra en la tierra. Sin embargo dichos datos no le dicen mucho al usuario acerca de su posición. En consecuencia se necesita de una herramienta auxiliar que nos permita ubicar ese punto en alguna región sobre la tierra, de tal forma que la información presentada sea concreta y comprensible para el usuario. De ahí podemos ver que por un lado necesitamos de lo que se conoce como "Base de Datos Espacial", la cual hace referencia a los datos crudos que nos arroja un sistema de localización, que en este ejemplo es el GPS. Además, se necesita también de lo que se conoce como Sistemas de Información Geográfica (GIS), los cuales son sistemas de computadora que nos permitan procesar la información arrojada por los sistemas de localización.

Es necesario mencionar también que una de las herramientas clave para la ubicación gráfica de nuestro objetivo son los mapas. Pues de estos depende que el usuario final pueda tener un punto de referencia visual que le permita identificar correctamente la ubicación del objetivo. Para ello el sistema

en cuestión se auxilia de algunas herramientas de software previamente elaboradas como es el caso de "Google Maps" [5] o similares.

Hoy en día los sistemas basados en localización tienen un gran número de aplicaciones, algunas de ellas se mencionan a continuación. Actualmente el mayor uso de este tipo de sistemas está relacionado con los "Servicios de Información y Pregunta". En los cuales el usuario es capaz de obtener los puntos de interés más próximos al lugar en el que se encuentra, tales como: gasolineras, restaurantes, centros de recreación, entre otros. La flexibilidad de estos sistemas permite que se puedan especificar cuáles son los puntos de interés a visualizar. Puede presentarse el caso de que el sistema en cuestión requiera que se ingresen algunos datos para poder desplegar la información pedida. Otro uso está relacionado con la coordinación y administración del tráfico, así los conductores pueden ver que rutas deben de tomar para optimizar su traslado. El valor de estos sistemas radica en que se actualizan en tiempo real, permitiendo así que el usuario no solo conozca su ubicación sino que también pueda ser guiado por las diferentes vialidades.

Un tópico muy de moda hoy en día y que está relacionado con los servicios a medios de transporte tiene que ver con la comunicación entre los mismos a través de tecnologías tales como Bluetooth o WLAN. A través de las tecnologías es posible intercambiar información de los dispositivos pertenecientes a estas redes para conocer, por ejemplo, que tan cerca se encuentra un vehículo de otro. Este servicio aunque complejo, es importante pues hace uso de diferentes tecnologías y protocolos ampliamente usados en los sistemas de

localización. Finalmente, cabe mencionar que muchos de estos sistemas, en colaboración con otras herramientas, se utilizan para el rastreo de personas y rastreo de mercancías, que por su valor económico resulta imprescindible conocer su ubicación. A esto habría que agregar que en muchos de los casos la localización del usuario va acompañada de múltiples servicios, tales como pronósticos del clima, velocidad del móvil, tiempos aproximados de arribo al destino, entre otros.

1.2 Problemas en Sistemas de Localización

Como bien sabemos ningún sistema de localización es perfecto debido a múltiples factores que afectan los datos obtenidos, causando así un error en la exactitud obtenida en la posición del objetivo a localizar. Otros son factores externos (clima, geografía del medio) que insertan un margen de error en los resultados obtenidos. A continuación se procuran mencionar algunas de estas limitantes, con la finalidad de dar un panorama más general de las características que influyen en todo sistema de localización.

En el momento en que hacemos una petición de localización a nuestros sistemas nos encontramos inmersos en un medio ambiente que afecta los datos obtenidos. Por ejemplo, las señales no se propagan de igual forma en un ambiente con lluvia que en un ambiente seco; la potencia de la señal recibida no será la misma a la que se recibe en un ambiente libre de obstáculos. En muchos casos estos factores que en primera instancia no figuran ser parte del diseño de un sistema de localización, juegan un papel importante para determinar la utilidad real del sistema elaborado. También

habría que mencionar que la localización depende en gran medida de la geografía del lugar. Pues posiblemente en algunos casos no sea posible que el dispositivo, ya sea que se transporte en algún medio tripulado o no, pueda ser localizado. Por ejemplo los sistemas que se auxilian de satélites requieren tener línea de vista con el dispositivo móvil.

Otro factor importante a mencionar es el hardware necesario para procesar la cantidad de datos arrojados por nuestro sistema. En la mayoría de los casos es posible contar con este requisito, pues los servicios basados en localización buscan tener un gran número de plataformas donde operar. Sin embargo, también el software presenta un alto grado de complejidad y a veces su compatibilidad se ve restringida a los propios productos de la empresa que lo diseñó, siendo imposible que funcione en otras plataformas. Por tanto, para que estos operen correctamente se debe de adquirir el o los dispositivos necesarios que sean compatibles entre sí (hardware y software).

Así mismo sistemas tales como el GPS, además de cumplir con los requisitos arriba mencionados, utilizan infraestructura especializada tales como satélites. Debido a esto la relación costo-servicio se ve incrementada en una forma considerable, lo que da como resultado que no cualquier usuario pueda acceder a estos sistemas de forma fácil y barata. Los Sistemas de localización actuales son tan precisos como tan alto sea el costo a pagar, de forma proporcional por sus servicios.

Por supuesto que cada uno de los métodos de localización tiene sus limitantes muy particulares en relación al algoritmo utilizado para su implementación. Pero en general, cada uno de ellos presenta algunos de los problemas anteriormente mencionados.

1.3 Presentación DoE

Esta tesis está basada en un nuevo método de localización llamado DoE (Direction of Encounter) [1], el cual busca minimizar el uso de hardware o infraestructura que actualmente utilizan los sistemas de localización; por ejemplo, el uso de estaciones base o satélites. Se plantea así un algoritmo basado únicamente en la capacidad que tienen ciertos dispositivos móviles (nodos móviles) en una red inalámbrica para detectar las señales provenientes de los diferentes nodos que se encuentran en sus alrededores. El objetivo de DoE es que de una manera fácil y barata se pueda conocer la ubicación aproximada de los nodos, sin necesidad de hacer uso de las herramientas antes mencionadas. La movilidad que presentan los nodos está sujeta por supuesto a los diferentes medios de transporte, tales como automóviles, personas caminando u otros, y también en gran medida a las condiciones geográficas y ambientales en el cual se encuentra dicho nodo. Estos factores influirán de forma significativa en la velocidad, aceleración y la manera en la que el dispositivo móvil se mueve dentro de una región. Aunque en muchos de los casos estos factores no tienen un gran impacto en los resultados obtenidos.

Gracias a la movilidad que presentan estos nodos, es posible localizar de manera aproximada la ubicación geográfica de los nodos estáticos (tales como Puntos de Acceso, módems, entre otros). El conjunto de nodos estáticos detectados es llamado constelación. Para la correcta implementación de este método se deben de cumplir dos requisitos. El primero de ellos tiene que ver directamente con la movilidad que presentan los nodos en una región de cobertura perteneciente a un nodo estático. Específicamente se debe de cumplir que el nodo móvil cruce la región de cobertura de dicho nodo. El segundo requisito es que estos nodos móviles deben de operar en modo monitor. El modo monitor es uno de los seis modos (Master, Managed, Ad-hoc, Mesh, Repeater y Monitor) en que puede operar una tarjeta de red inalámbrica. En el modo monitor la tarjeta de red inalámbrica es capaz de capturar el tráfico de paquetes que circulan por la red inalámbrica sin necesidad de estar asociado a un punto de acceso. De esta forma es posible recopilar y almacenar la información de los nodos que sean detectados a través de un dispositivo móvil. Posteriormente, los datos obtenidos son procesados y con ello se obtiene el o los puntos de ubicación de los nodos de una región delimitada. Gracias a que los requisitos previamente mencionados no representan ningún costo monetario, este método resulta más atractivo que los ya existentes. Además, en busca de optimizar el proceso de localización, la información recolectada por cada uno de estos nodos móviles puede ser compartida mediante una solicitud de los nodos móviles vecinos que se detecten entre sí.

Cabe mencionar que al igual que otros métodos de localización ya implementados, DoE presenta un margen de error. En muchos casos las condiciones del medio en las cuales se lleva a cabo

la puesta en marcha de este método influyen en la exactitud que se consigue. Sin embargo, como se verá en el capítulo V, en la mayoría de los casos se consigue una buena aproximación de la localización espacial de los nodos estáticos.

1.4 Objetivo de la Tesis

El objetivo de esta tesis es evaluar el desempeño del Sistema de Localización Basado en Movilidad denominado DoE (Direction of Encounter) en un ambiente real.

La principal aportación de este trabajo fue realizar un estudio de campo del método DoE para medir el desempeño del modelo Teórico con el implementado, analizando los resultados de exactitud del posicionamiento geográfico del método DoE.

1.5 Estructura de la Tesis

El contenido del presente trabajo se organiza de la siguiente manera: en el capítulo II se hace una revisión de los distintos esquemas de localización, describiendo de forma general su funcionamiento y características particulares. En el capítulo III, se revisa el método de localización tema principal de esta tesis (DoE), se plantea la idea fundamental del mismo así como su funcionamiento. En el capítulo IV, se muestran los experimentos realizados en diferentes lugares con la finalidad de comprobar la eficacia del método planteado. Se describe el proceso que se siguió, así como también se plasman los resultados obtenidos y las limitaciones a las que nos enfrentamos en la implementación del mismo. Finalmente, en el capítulo V, se presentan las

conclusiones en base a los resultados obtenidos a través del desarrollo de esta tesis.

2 Estado del arte

Un Sistema de Localización consiste de terminales móviles, las cuales son el objetivo a localizar, para ello generalmente se apoyan de puntos de referencia (estaciones base) y una estación central la cual ejecuta el algoritmo de localización para obtener las coordenadas de las terminales móviles. Dicha información es procesada por una aplicación la cual presenta la ubicación de las terminales móviles de forma gráfica.

En este capítulo se presentan de forma general los esquemas de localización los cuales se clasifican en dos grandes grupos: Sistemas de localización basados en rango de transmisión y Sistemas de localización basados en conectividad.

2.1 Esquemas de Localización basados en Rango de Transmisión

El primer grupo hace referencia a aquellos sistemas que se encargan de obtener la posición de un objetivo en base al rango de cobertura de la estación base, las cuales sirven como puntos de referencia para obtener la ubicación aproximada de la terminal objetivo realizando mediciones de tiempo, potencia y ángulo de recepción de la señal. Los métodos que se abordan a continuación son el ToA (Tiempo de Arribo), TDoA (Diferencia de Tiempo de Arribo), AoA (Ángulo de Arribo) y SA (Atenuación de la señal).

2.1.1 Tiempo de Arribo

ToA (Tiempo de Arribo) es un método que permite estimar el tiempo que la señal o transmisión tarda en propagarse desde el transmisor y hasta el receptor. Este método calcula la distancia mediante la siguiente ecuación

$$d = \tau c$$

donde ***d*** es la distancia estimada, ***τ*** es el tiempo de arribo y ***c*** es la constante de la velocidad de la luz. Este método usa una lateración circular, es decir, es necesario partir de tres estaciones base las cuales tienen un rango de cobertura representado por una circunferencia. En una circunferencia se pueden localizar varias terminales o APs. Para efectos didácticos se tomará una terminal la cual se desea localizar, a la cual llamaremos terminal objetivo (ver Figura 2.1a) [4].

Al localizar la terminal objetivo, esta se puede encontrar en cualquier parte de la zona de cobertura (ver Figura 2.1a). Al sobreponer un segunda circunferencia se limita a dos posibles ubicaciones de la terminal objetivo, las cuales se observan en la intersección de las dos circunferencias (ver Figura 2.1b). Finalmente, al sobreponer una tercera circunferencia (ver Figura 2.1c), se observa que las tres circunferencias se interceptan en un punto en común, ubicación en la cual se encuentra la terminal objetivo.

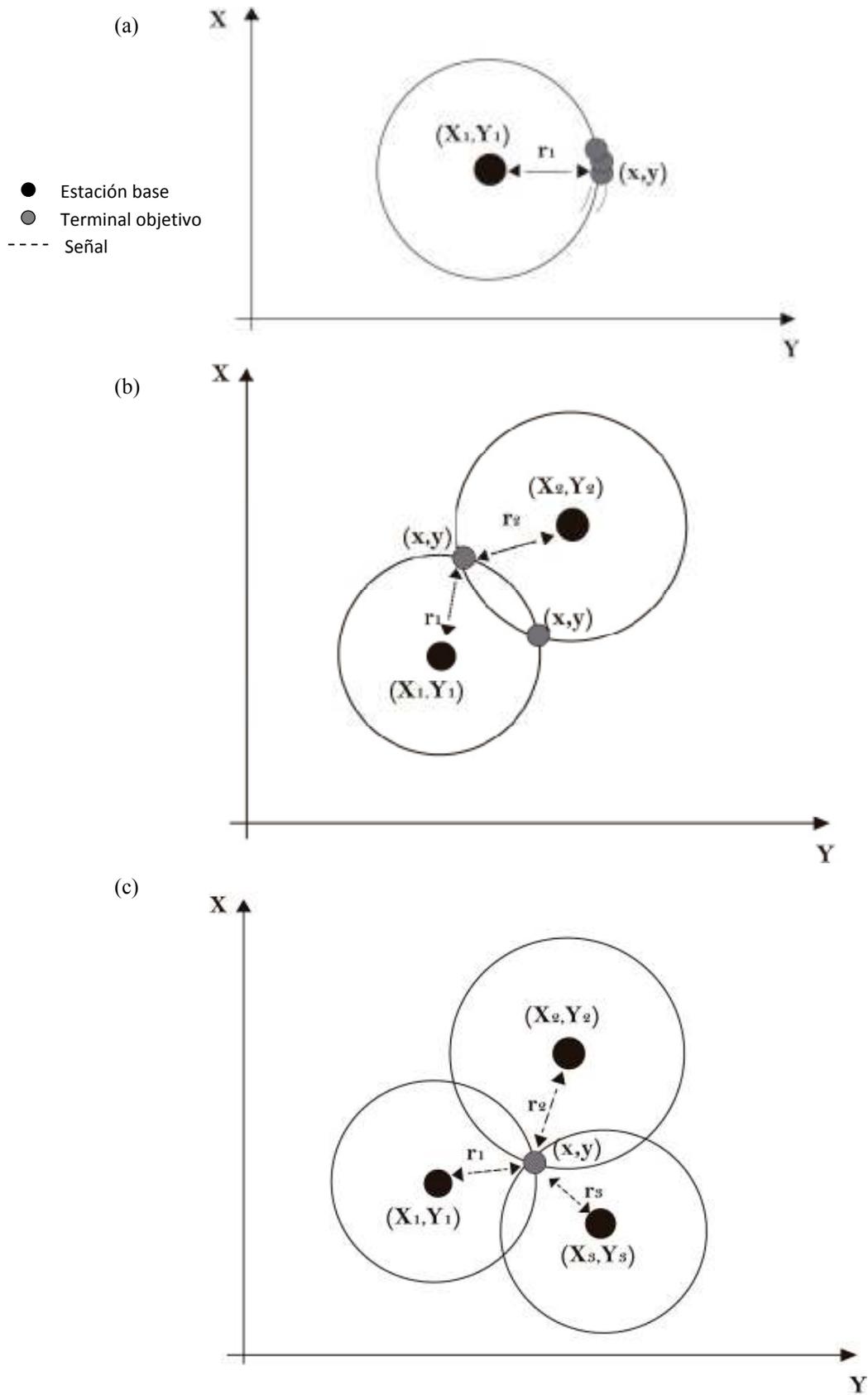


Figura 2.1 Lateración circular

En este método las estaciones base deben de estar en sincronía, si no es así se traduciría como una ubicación imprecisa de la terminal. En la Figura 2.1c se ejemplifica de manera ideal cuando los relojes están sincronizados.

Para calcular la distancia a partir de las estaciones base se usa la siguiente ecuación:

$$r_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}$$

Diferentes factores tales como la sincronización del reloj del transmisor y receptor, refracción, la propagación multitrayectoria, etc., derivan en un margen de error ϵ . Por lo tanto la distancia real r_i se expresa como la suma de la distancia aproximada p_i más el margen de error ϵ .

$$r_i = p_i + \epsilon$$

Por lo que dependiendo de la precisión de las medidas y los factores antes mencionados, se obtiene como resultado que las circunferencias (rangos de cobertura) se interceptan dentro de un rango aproximado. La ubicación real de la terminal objetivo se encuentra dentro de esta zona debido al margen de error de cada una de las circunferencias.

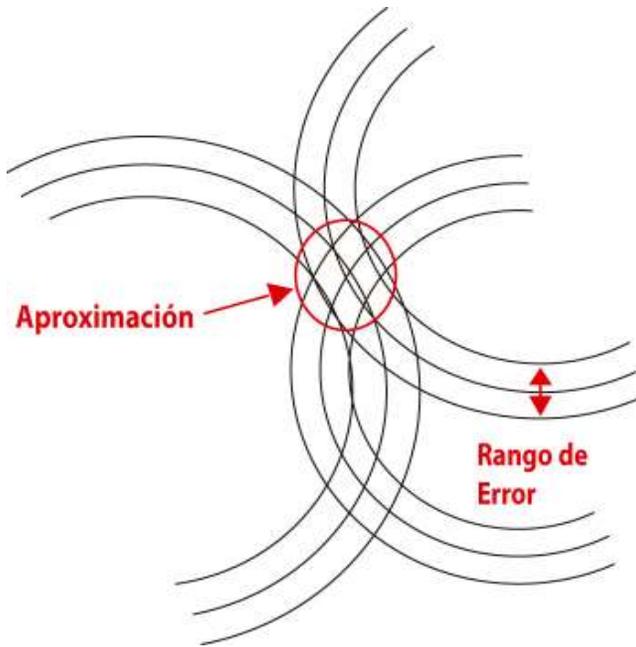


Figura 2.2 Aproximación de Localización

El método ToA es empleado por el sistema GPS, el cual utiliza tres satélites para medir la distancia y así triangular la posición de la terminal. Además, el sistema GPS se auxilia de una cuarta estación base para la corrección del tiempo y sincronización entre el transmisor y el receptor para disminuir el error.

2.1.2 Diferencia de Tiempo de Arribo

TDoA (Diferencia de Tiempo de Arribo), también es conocida como laterización hiperbólica [4]. Al igual que ToA se aproxima con la ayuda de tres estaciones base (Figura 2.3b). Tomando en cuenta una terminal objetivo como se muestra en la Figura 2.3a, cuando está emite una señal las estaciones base la recibirán en momentos ligeramente diferentes debido a la

diferencia de distancias que existe entre la terminal objetivo respecto a cada una de las estaciones. Es posible trazar una hipérbola la cual nos permitirá determinar la ubicación de la terminal objetivo.

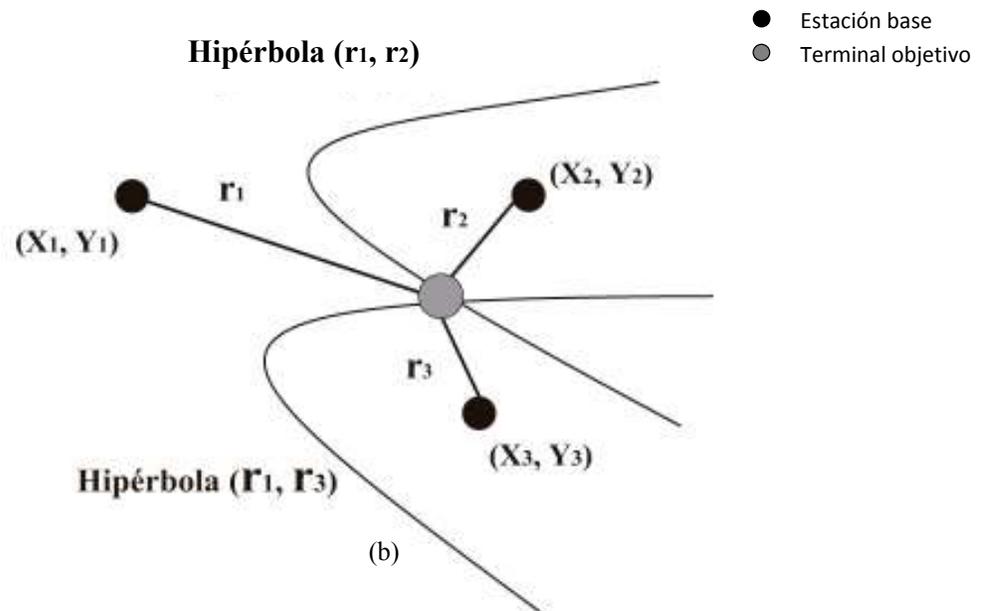
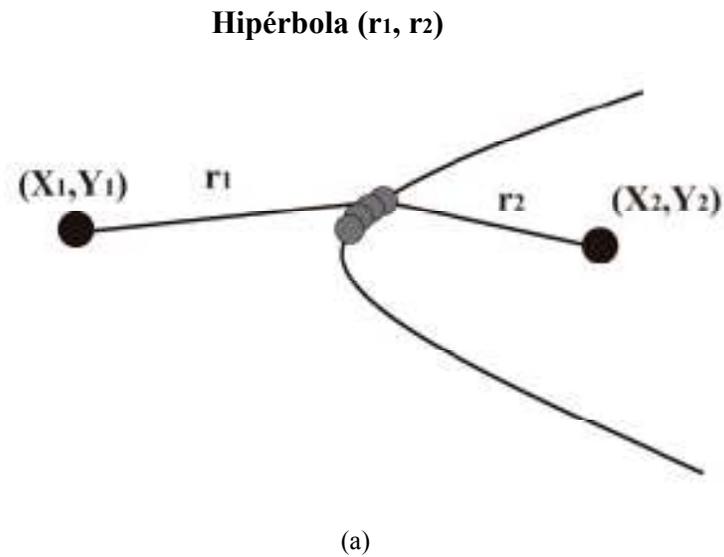


Figura 2.3 Lateración hiperbólica

En la Figura 2.3a se observa la hipérbola (r_1, r_2) en la cual se encuentra la terminal objetivo. Dichos receptores o estación base se encuentran a diferentes distancias denotadas por r_1 (distancia de la primer estación base a la terminal objetivo) y r_2 (distancia de la segunda estación base a la terminal objetivo).

En la Figura 2.3b se considera una tercera estación base, esto proporciona una segunda hipérbola (hipérbola (r_1, r_3)). La intersección de estas dos hipérbolas da la aproximación de la ubicación de la terminal objetivo. La diferencia de distancia de la terminal objetivo con respecto a dos estaciones base está dada por [3]:

$$d_{ij} = r_i - r_j$$

$$d_{ij} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} - \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2 + (Z_j - z)^2}$$

donde $i \neq j$

En conclusión, esta técnica busca capturar el intervalo de transmisión de datos en vez de los retardos de propagación. Este método es empleado por las técnicas de localización celulares.

2.1.3 Ángulo de Arribo

AoA (Ángulo de Arribo). Este método requiere de dos estaciones base con ubicación conocida para triangular la posición del objetivo en base al ángulo que se tiene entre las estaciones base y el objetivo. AoA requiere de un arreglo

de antenas o antenas direccionales que son especialmente diseñadas en base al sistema y objetivo a localizar, lo que hace que dicho método sea muy costoso. Este tipo de antenas se emplean para estimar la dirección de llegada de la señal que transmite el nodo estático.

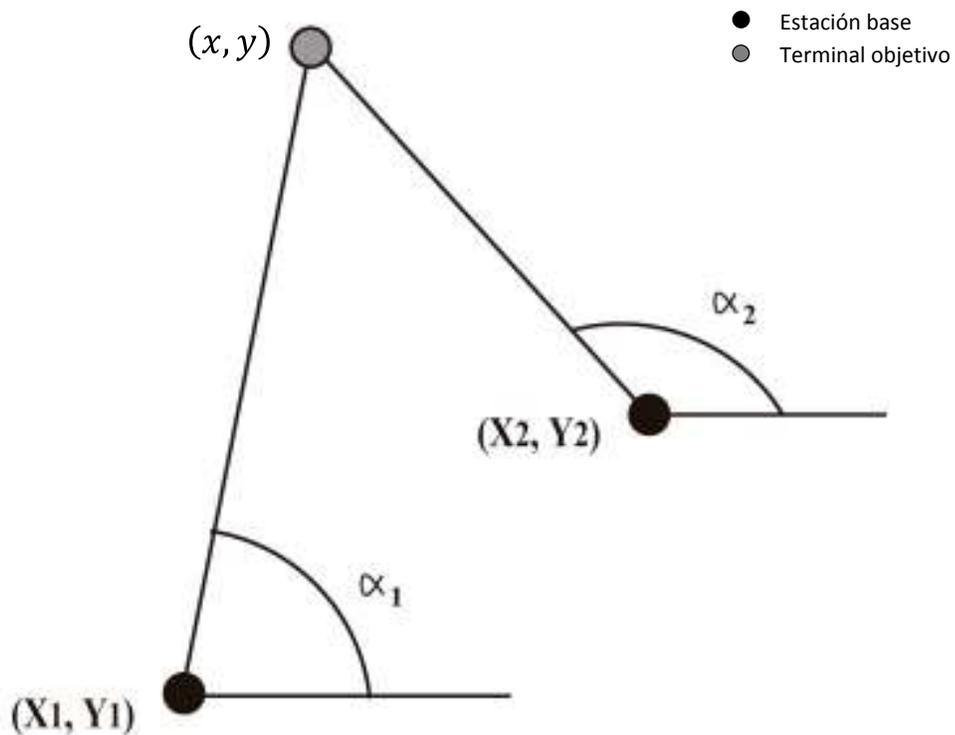


Figura 2.4 Ángulo de arribo

En la Figura 2.4 se ilustra el principio de AoA, la primera estación base cuyas coordenadas son conocidas (X_1, Y_1) estima la dirección de la señal de arribo, de tal forma que se obtiene una línea que cruza la terminal objetivo con la línea de ubicación de la estación base. El mismo procedimiento lo realiza la segunda estación base con coordenadas (X_2, Y_2) , de

tal manera que donde se interceptan las líneas que atraviesan la terminal objetivo se obtiene la aproximación de la ubicación de la terminal [3].

Cuando no se tiene una línea de vista entre la terminal y la estación base se tienen errores, debido a pérdidas por multitrayectorias, refracción, reflexiones, entre otros. Para compensar estos errores se recomienda que se empleen más de dos estaciones base para emplear dicho método.

Para estimar el ángulo de la dirección de la señal con respecto a la estación base se emplea la siguiente fórmula

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{Y_i - y}{X_i - x}\right)$$

Donde (X_i, Y_i) son las coordenadas de la estación base, (x, y) son las coordenadas del objetivo [4].

2.1.4 Atenuación de la Señal

SA (Atenuación de la Señal) este método se basa en analizar la intensidad de la señal recibida. Para el espacio libre la potencia de la señal se puede calcular mediante la fórmula de Friis para espacio libre:

$$P_{rx} = \frac{P_{tx}}{\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2}$$

donde P_{rx} es la potencia recibida, P_{tx} la potencia transmitida,

λ la longitud de onda y R la distancia entre el receptor y el transmisor [3].

Esta fórmula es una aproximación, pues la potencia de la señal recibida no se comporta como tal en una ciudad debido a los diversos obstáculos en la trayectoria de la señal, y puede sufrir cambios importantes. La señal recibida puede presentar caídas de potencia debido a pérdidas por multitrayectos, y a causa de los obstáculos que la señal encuentre en su camino.

Por lo tanto este método solo da una aproximación de la ubicación de la terminal objetivo, pues varía el rango de cobertura como antes se mencionó.

2.2 Esquemas de Localización basados en Conectividad

El segundo grupo hace referencia a aquellos sistemas que se encargan de obtener la posición de un objetivo en base a la conectividad de la estación base, las cuales sirven como punto de referencia para obtener la aproximación de la ubicación de la terminal objetivo mediante mediciones de conectividad como número de saltos, retardos, ancho de banda, entre otros

2.2.1 Vector de Distancia

DV (Vector de Distancia). Este algoritmo está basado en utilizar las mediciones de conectividad para estimar la ubicación de los nodos o terminales. Estas mediciones se anexan a un vector o arreglo para almacenar dicha

información de conectividad, el cual es empleado por algunos protocolos de ruteo como RIP. De tal manera que cuando el paquete viaja, el vector registra el número de saltos que este da y calcula la distancia hasta llegar a su destino. Dicho vector actualiza constantemente una tabla de información. Esta tabla es un mapa de la red, la cual emplea para encontrar el camino más corto para el destino del paquete. Una estación base puede ubicar una terminal u objetivo realizando una triangulación con la información de otras dos estaciones [5].

El método más utilizado para el vector de distancia es el algoritmo de Bellman-Ford, dicho algoritmo como ya se mencionó contiene un vector de información acerca de la distancia o saltos conocidos de los caminos más cortos entre los nodos.

En el algoritmo de Bellman-Ford los caminos más cortos se inician con un valor de infinito, mientras que la distancia desde el transmisor hasta sí mismo es igual a cero.

2.2.1 Escalamiento Multidimensional (MDS)

MDS (Escalamiento Multidimensional). Este algoritmo, al igual que el anteriormente descrito, utiliza la información de conectividad o la distancia entre las estaciones para estimar la ubicación de la terminal u objetivo.

Este algoritmo calcula primero las distancias más cortas, es decir, las que tienen el menor número de saltos entre todos los nodos de la red. Esta información es recabada por una

matriz de distancia (i,j) , la cual, como ya se mencionó, almacena la distancia más corta entre los nodos i y j [5].

3 DoE

En este capítulo se presenta una descripción del modo de operación y funcionamiento del Método DoE [1][2], se describen los requerimientos necesarios para su correcto funcionamiento.

3.1 Idea Fundamental del tema de Tesis

El método DoE clasificado como un Sistema de Localización basado en conectividad de Redes inalámbricas aprovecha la movilidad de ciertos nodos que cruzan una región de cobertura con la finalidad de estimar la ubicación geográfica de los nodos estáticos que se encuentran transmitiendo en ese momento. De esta forma se minimiza de sobremanera el uso de infraestructura especial o el uso de aplicaciones que por su complejidad y costo son una limitante para el usuario final. DoE considera que los nodos estáticos se encuentran transmitiendo mientras los nodos móviles atraviesan la región de cobertura de los nodos estáticos. Finalmente, auxiliándose de un mapa y datos recabados (tiempo de primer avistamiento y último avistamiento) durante el monitoreo, DoE tiene la capacidad de mostrar la localización aproximada de los nodos estáticos.

3.2 Operación de DoE

En un primer acercamiento podemos suponer que dentro de cierta región geográfica se encuentra una distribución de nodos estáticos que son parte de una red inalámbrica. Los nodos estáticos se encuentran transmitiendo y por tanto es posible que sean detectados por nodos móviles que en ese momento estuvieran cruzando las distintas regiones de cobertura de estos nodos estáticos. Como consecuencia, podemos obtener una primera distribución de nodos estáticos. Así para cada nodo móvil que se encuentra cruzando una región de cobertura en particular, se espera obtener la misma distribución de nodos estáticos. Claro está que la posición de estos últimos será relativa con respecto a la trayectoria de cada nodo móvil. En la Figura 3.1 se presenta un ejemplo de red inalámbrica. En ella se pueden apreciar las distancias relativas entre cada nodo estático, así como también las direcciones que siguen los nodos móviles dentro de esta región.

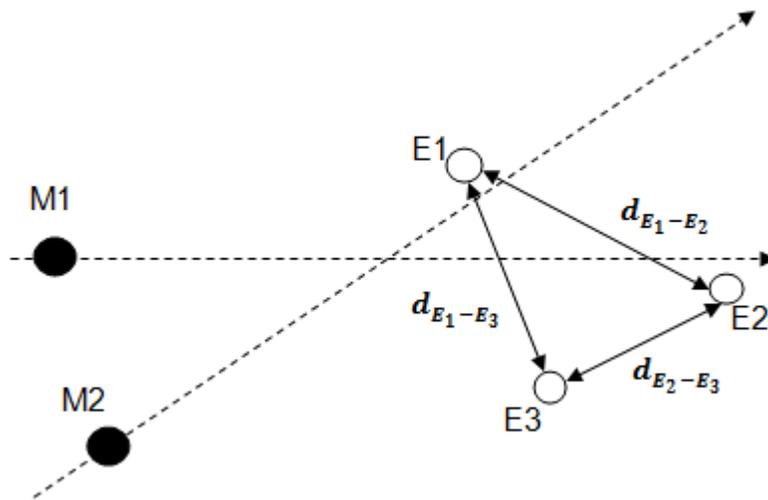


Figura 3.1 Distribución de una red inalámbrica con tres nodos estáticos (E1, E2 y E3) y dos nodos móviles atravesando la red (M1 y M2).

Para un mejor entendimiento de la Figura 3.1 se marca la dirección que toman los nodos móviles por una flecha y una línea punteada. Además de ello se les asigna la letra M, haciendo referencia al termino de movilidad. Por otro lado a los nodos estáticos se les asigna la letra E. Así cada nodo estático mantendrá una posición diferente en relación al nodo móvil que escucha de acuerdo a la posición que este último mantenga en el instante en que está escuchando. Por facilidad en la Figura 3.1, solo se muestran tres nodos estáticos y dos nodos móviles que se desplazan dentro de esta región. En la realidad el número de nodos móviles y estáticos puede ser mucho mayor.

Debido a que cada nodo estático mantiene una posición fija, se les puede asociar un par de coordenadas de la forma (X,Y) . Así es posible obtener la distancia entre estos nodos de acuerdo al par de valores con que cuenta cada uno de estos últimos. Las distancias entre los nodos estáticos se pueden calcular de la siguiente forma

$$d_{E_m-E_n} = \sqrt{(X_{E_m} - X_{E_n})^2 + (Y_{E_m} - Y_{E_n})^2}$$

donde m y n representan el número asociado al nodo móvil.

A la distancia previamente calculada también se le conoce como distancia intermodal o euclidiana. En la figura antes descrita, esta distancia está representada por una línea con una flecha en cada extremo que une los nodos estáticos encontrados. Como se puede observar, el orden en que se toman los nodos para realizar el cálculo no tiene importancia. Una

vez que se ha descrito la idea fundamental de funcionamiento, veamos cómo se lleva a cabo la detección de estos nodos.

Como se mencionó en el Capítulo 1.3, cada nodo móvil que se encuentre trabajando en modo monitor es capaz de capturar el tráfico de paquetes que circula por la red inalámbrica. De esta forma al estar dentro de la región de cobertura de cada nodo estático transmitiendo, el nodo móvil será capaz de detectarlos. Sin embargo, cabe resaltar que la detección no implica que el nodo móvil sea capaz de localizar o calcular la posición geográfica absoluta de los nodos estáticos como lo hace GPS por ejemplo. Por esta razón se debe de cumplir que además de que el nodo móvil sea capaz de detectar la fuente de transmisión es necesario que en un momento dado también sea capaz de perderla, es decir, salir del rango de cobertura. La razón de ello se ilustra en las Figuras 3.2, 3.3 y 3.4, en la que por facilidad el nodo móvil se mueve en línea recta paralelo al eje x , y atraviesa la región de cobertura del nodo estático E_m .

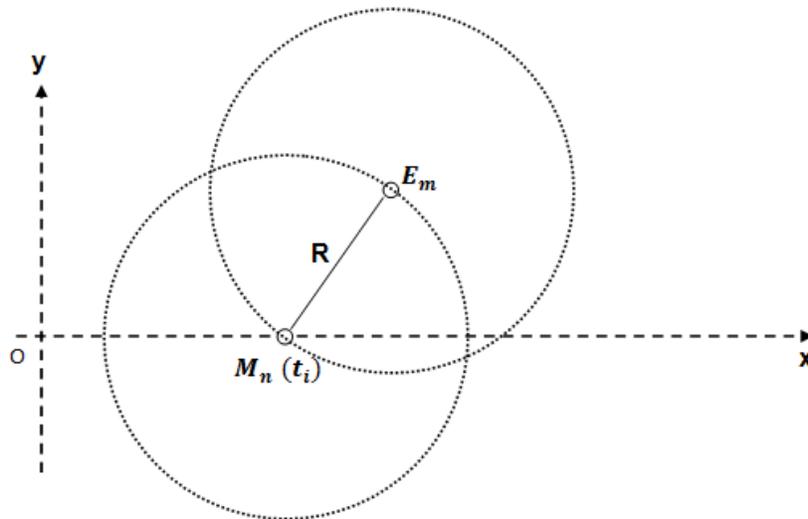


Figura 3.2 Momento en que por primera vez el nodo móvil M_n detecta al nodo estático E_m .

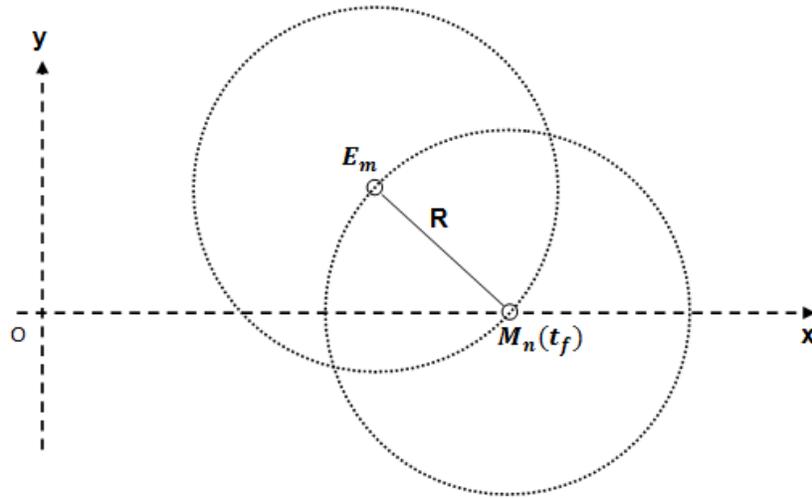


Figura 3.3 Momento en que por última vez el nodo móvil M_n detecta al nodo estático E_m .

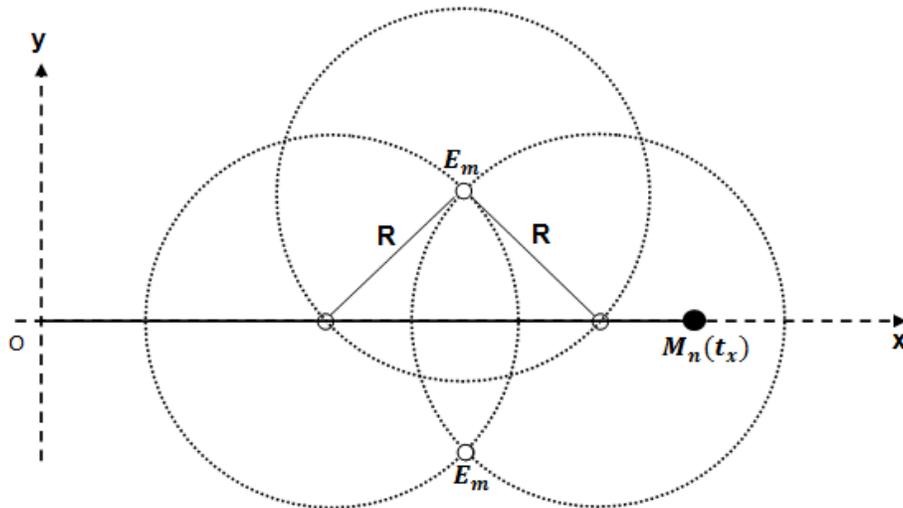


Figura 3.4 Monitoreo por el nodo móvil M_n en un instante después de haber atravesado la región de cobertura del nodo E_m .

De las Figuras 3.1, 3.3 y 3.4 se pueden destacar varios aspectos importantes. El primero de ellos es que como ya se había mencionado, se necesitan presentar dos instantes en particular. El primero de ellos es el momento en que por

primera vez se detecta el nodo estático, es decir, el momento en el que el nodo móvil entra a la región de cobertura del nodo estático. El segundo de ellos es precisamente el momento en que por última vez fue visto o se detectó que el nodo estático se encontraba transmitiendo, es decir, el momento en el que el nodo móvil salió del rango de cobertura del nodo estático. Por múltiples razones la detección del nodo móvil hacia el nodo estático se puede perder antes de salir formalmente de la región de cobertura. Por ejemplo, el dispositivo en cuestión fue apagado, o la potencia de la señal con que se recibía se decremento demasiado, siendo así imposible detectarla por la tarjeta de red inalámbrica. Por el momento haremos a un lado esas posibilidades y supondremos que el rango de transmisión de la señal se mantiene constante mientras un nodo móvil atraviesa el área cubierta del nodo estático. Además, supondremos que el nodo móvil se mueve a velocidad constante y en línea recta.

En la Figura 3.2 se observa que en un instante de tiempo, el nodo móvil detecta por primera vez a la fuente de transmisión, la cual teóricamente tiene un rango de cobertura fijo. Asignamos la letra R al radio del rango de cobertura, el cual nos permite trazar un círculo con centro en el nodo móvil, cuyo radio es igual al radio de cobertura de nuestro nodo estático. De manera similar, cuando el nodo móvil ve por última vez el nodo estático (ver Figura 3.3), es posible trazar un círculo con centro en el nodo móvil con las mismas características que cuando lo detectó por primera vez. Ahora bien, una vez obtenido esto se procede a realizar la superposición del par de circunferencias generadas con la finalidad de obtener el par de puntos de intersección de la

posible ubicación del nodo que transmite respecto a nuestro nodo móvil.

En la Figura 3.4 se observa que la ubicación real del nodo estático es la que se encuentra en la parte superior de la dirección de movimiento del nodo móvil. Siendo el punto de intersección inferior el espejo. Sin embargo, en la realidad desconocemos la ubicación real de los nodos estáticos, por lo que posteriormente se tendrá que determinar cuál de los nodos corresponde a la ubicación del nodo espejo y cual corresponde a la ubicación real.

Los instantes en los cuales se detecta y se pierde la transmisión se denotan respectivamente como t_i y t_f . Siendo así posible obtener el tiempo transcurrido entre el primer y último encuentro, al cual denotaremos como t_{if} y lo llamaremos periodo de encuentro. De manera que lo podemos calcular como sigue:

$$t_{if} = t_f - t_i$$

Una vez que se ha calculado el periodo de encuentro, es posible calcular la distancia recorrida por el dispositivo móvil de acuerdo a la siguiente formula

$$d_{if} = v * t_{if}$$

donde v es la velocidad del nodo móvil, la cual idealmente se mantiene constante.

Las coordenadas para los nodos estáticos entonces pueden calcularse mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$E_n \begin{cases} X_{E_n} = \frac{d_{if}}{2} \\ Y_{E_n} = \pm \sqrt{R^2 - \left(\frac{d_{if}}{2}\right)^2} \end{cases}$$

Ambas soluciones proporcionadas por las ecuaciones anteriores son igualmente validas, por lo que ahora es igualmente valido plantear la *distancia internodal* para el caso de los nodos espejo como:

$$d^*_{E_m-E_n} = \sqrt{(X^*_{E_m} - X^*_{E_n})^2 + (Y^*_{E_m} - Y^*_{E_n})^2}$$

Dada la incertidumbre para determinar cuál de las dos soluciones es la correcta, necesitamos que al menos otro nodo móvil atraviese la región de cobertura de los nodos estáticos previamente localizados, con la finalidad de obtener otra constelación dentro de la cual se espera que contenga los mismos nodos estáticos. La nueva constelación obtenida nos proporcionará para cada uno de los nodos localizados dos posibles soluciones. Una en el lado izquierdo y la otra en el lado derecho. Se asignan así las letras I y D para denotar la orientación de estos con respecto al nodo móvil. También se proporciona una notación grafica distinta para cada uno de las soluciones geométricas. Por tanto la superposición de al menos dos de estas constelaciones es capaz de arrojarnos cuatro posibles ubicaciones para cada nodo estático. Las cuales nos permitirán definir y diferenciar la solución correcta de la solución espejo.

Una de las limitantes de este método es que un solo nodo móvil es incapaz de determinar la verdadera posición de los nodos detectados.

En la Figura 3.5 se puede observar la distribución de los nodos estáticos, cada uno con sus dos posibles ubicaciones representando a los nodos reales y a los espejos. Así mismo se marca la trayectoria seguida por el nodo móvil al atravesar la región correspondiente en la red inalámbrica.



Figura 3.5 Distribución de nodos en una red inalámbrica de acuerdo a su posición respecto a la trayectoria del nodo móvil.

Con la finalidad de optimizar el proceso de localización, cualquier nodo móvil puede intercambiar la información de las constelaciones obtenidas con cualquier otro nodo móvil que así lo solicite.

3.2.1 Proceso de Localización de los Nodos Estáticos

A continuación se describe la parte medular del método DoE, la cual nos permitirá finalmente localizar de forma relativa la ubicación del nodo estático. El procedimiento es el siguiente.

Primero: superponer el par de constelaciones obtenidas previamente, mostrando para cada caso los nodos reales y los nodos espejos.

Segundo: se toma un nodo de referencia el cual aparece en ambas constelaciones. Posteriormente, se procede a superponer las constelaciones tomando como punto de referencia el nodo seleccionado. Esto causará una traslación en una de las constelaciones. Así mismo hay que considerar que al tener dos posibles ubicaciones para cada nodo por constelación, al final se pueden obtener cuatro combinaciones distintas. Por ejemplo, si tomamos como referencia el nodo 3, tendríamos así:

$$1) E_3^{D\Delta} \text{ con } E_3^{D\odot} \quad 2) E_3^{D\Delta} \text{ con } E_3^{I\odot} \quad 3) E_3^{I\odot} \text{ con } E_3^{I\Delta} \quad 4) E_3^{I\odot} \text{ con } E_3^{D\Delta}$$

Donde el símbolo Δ y \odot hacen referencia a los nodos E_m , detectados por los nodos móviles M1 y M2, respectivamente.

Tercero: de las cuatro posibles combinaciones antes mencionadas solo una de ellas será seleccionada, y las otras 3 serán descartadas. Después se procederá a tomar como punto de referencia el par seleccionado y rotar una de las dos constelaciones con respecto a la otra. La rotación estará dada por un ángulo phi (φ).

Las siguientes figuras muestran el proceso mencionado:

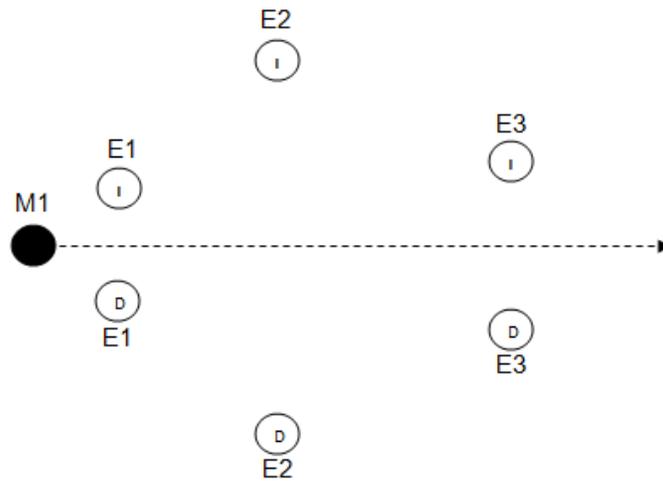


Figura 3.6 Constelación obtenida por el móvil M_1 .

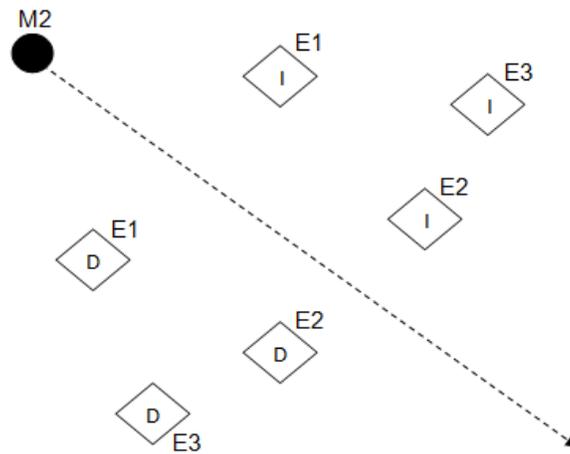


Figura 3.7 Constelación obtenida por el móvil M_2 .

Las *distancias intranodo* las denotaremos como $d_{E_m}^2(\varphi)$, las cuales nos servirán como una herramienta para determinar a que ángulo se debe de rotar nuestra constelación de acuerdo a la distancia mínima obtenida; se calculan de acuerdo a:

$$d^2_{E_m}(\varphi) = (X^{D\Delta}_{E_m}(0) - X^{D\ominus}_{E_m}(\varphi))^2 + (Y^{D\Delta}_{E_m}(0) - Y^{D\ominus}_{E_m}(\varphi))^2$$

$$d^2_{E_m}(\varphi) = (X^{D\Delta}_{E_m}(0) - X^{I\ominus}_{E_m}(\varphi))^2 + (Y^{D\Delta}_{E_m}(0) - Y^{I\ominus}_{E_m}(\varphi))^2$$

$$d^2_{E_m}(\varphi) = (X^{I\Delta}_{E_m}(0) - X^{D\ominus}_{E_m}(\varphi))^2 + (Y^{I\Delta}_{E_m}(0) - Y^{D\ominus}_{E_m}(\varphi))^2$$

$$d^2_{E_m}(\varphi) = (X^{I\Delta}_{E_m}(0) - X^{I\ominus}_{E_m}(\varphi))^2 + (Y^{I\Delta}_{E_m}(0) - Y^{I\ominus}_{E_m}(\varphi))^2$$

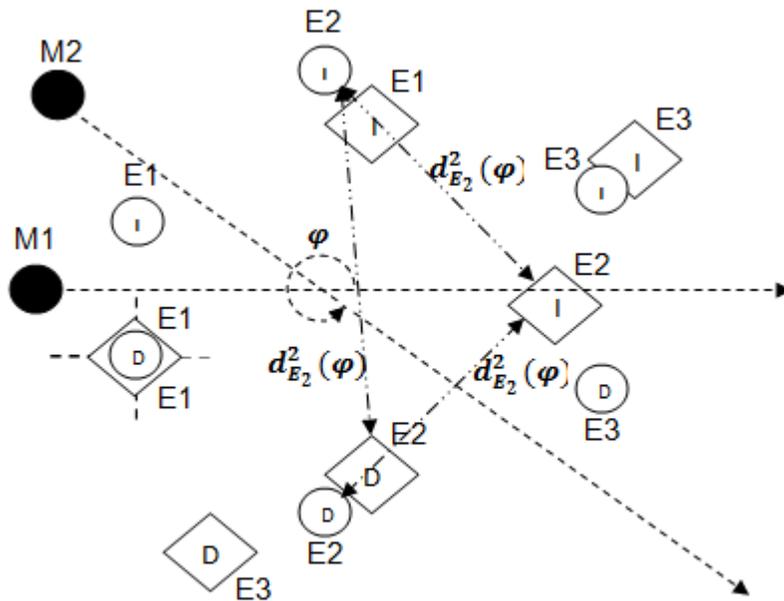


Figura 3.8 Superposición de las constelaciones de la Fig. 3.6 y Fig. 3.7, punto de referencia nodo $E1^D$.

Además, las coordenadas de cada nodo se representan con las letras (X,Y) . Por ejemplo, el par ordenado del nodo $E3$ izquierdo de la constelación detectada por el móvil 1 se escribe como $(X^{I\Delta}_{E_3}, Y^{I\Delta}_{E_3})$; notese también que cada coordenada tiene un ángulo correspondiente. En el caso de la constelación en que no se efectuó la rotación el ángulo es 0,

para la otra constelación el ángulo se denota como (φ) . Tomando como referencia la Figura 3.8, podemos descartar el par de nodos cuyas distancias intranodales no presentan el valor mínimo. La ubicación real de los nodos estáticos queda representada en la Figura 3.9.

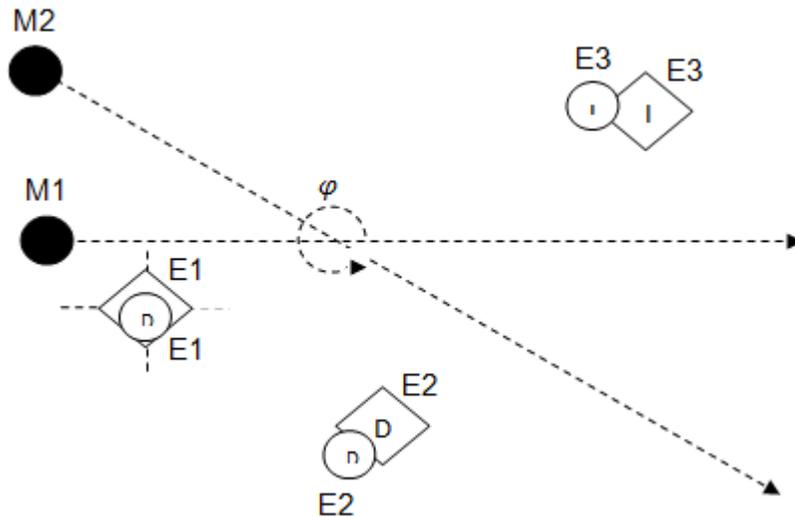


Figura 3.9 Distribución de la ubicación real de los nodos una vez que se han eliminado los espejos.

DoE resulta ser efectivo en tanto que es realmente simple de implementar, siempre y cuando se cumpla con las condiciones de movilidad y operación de la tarjeta en modo monitor.

4 Experimentos DoE

En este capítulo se explicará el proceso que se siguió en la realización de los experimentos con la finalidad de determinar si el método de localización DoE nos permite localizar nodos estáticos en base a las condiciones establecidas en los capítulos anteriores. A lo largo de este capítulo se hará una descripción detallada de cada uno de los pasos que se siguieron con la finalidad de comprobar la exactitud de este método.

4.1 Metodología de la Implementación del Método DoE

Primero se procedió a realizar el proceso de monitoreo con la finalidad de recabar un conjunto de datos que nos proporcionaran la información necesaria para dar con la localización de los puntos de acceso. Para ello se procedió a poner la tarjeta de red inalámbrica de una laptop en modo monitor. Como esta no es una opción generalmente permitida en los sistemas operativos, se utilizó la distribución de GNU/Linux llamada "Backtrack" enfocada a la seguridad informática, apoyándose de las herramientas "airmon-ng" y "airodump-ng". Esta última herramienta permitió obtener un conjunto de archivos con los datos capturados por la interfaz de red inalámbrica. Los comandos utilizados se exponen y se explican a continuación:

Comando para activar el modo monitor antes de capturar trafico

```
>>airmon-ng start wlan0
start: activar modo monitor
wlan0: tarjeta de red inalámbrica
```

Comando para capturar datos transmitidos a través del protocolo 802.11

```
>>airodump-ng --write captura -c 8 mon0
--write: crea un archivo de nombre "captura"
-c: captura el canal específico "8"
mon0: interfaz de red para trabajar en modo monitor
```

Debido a que el modo monitor capta las señales provenientes de los puntos de acceso alrededor de la banda de 2.4 GHz, fue necesario limitar la detección de la tarjeta de red a un canal en específico. Lo anterior con la finalidad de reducir la cantidad de datos obtenidos y así poder analizarlos de manera óptima. Aun cuando se seleccionó un solo canal de escucha, la cantidad de datos fue suficiente (alrededor de 100 AP encontrados) para realizar la implementación del método DoE. En concreto se obtenían: el tiempo en que por primera vez se vio el AP, el tiempo en que por última vez se vio el AP y la dirección MAC del AP. Así mismo era posible obtener más datos como la potencia de recepción o el nombre con que se tiene identificado el dispositivo AP. Sin embargo, para este análisis fue suficiente con los primeros tres mencionados.

A continuación se muestra una figura en la cual se pueden apreciar los datos obtenidos durante el monitoreo.

Network	NetType	ESSID	BSSID	Info	Channel	FirstTime	LastTime	BestQuality	MaxRate
1	infraestructur	WGUESTLX0	00:26:0B:6E:EC:A0		10	Mon Feb 27 12:06:57 2012	Mon Feb 27 12:07:05 2012	-81	54.0
2	infraestructur	INFINITUMd	F4:C7:14:CF:39:AC		8	Mon Feb 27 12:06:58 2012	Mon Feb 27 12:07:33 2012	-83	54.0
3	infraestructur	INFINITUMd	64:16:F0:2C:02:1D		6	Mon Feb 27 12:06:54 2012	Mon Feb 27 12:07:31 2012	-81	54.0
4	infraestructur	ISCE	00:23:69:6B:49:BB		8	Mon Feb 27 12:06:49 2012	Mon Feb 27 12:07:36 2012	-83	54.0
5	infraestructur	BGROWTH	00:C0:CA:41:9D:A5		9	Mon Feb 27 12:06:58 2012	Mon Feb 27 12:08:07 2012	-80	54.0
6	infraestructur	INFINITUM2	00:19:E4:D0:7A:89		6	Mon Feb 27 12:06:54 2012	Mon Feb 27 12:07:12 2012	-78	54.0
7	infraestructur	ISCE	00:23:69:6B:83:66		8	Mon Feb 27 12:06:51 2012	Mon Feb 27 12:07:14 2012	-85	54.0
8	infraestructur	INFINITUM5	00:1F:9F:6E:04:18		6	Mon Feb 27 12:06:50 2012	Mon Feb 27 12:07:00 2012	-78	54.0
9	infraestructur	Motorola	00:21:00:4C:3B:A3		1	Mon Feb 27 12:06:49 2012	Mon Feb 27 12:06:49 2012	-78	54.0
10	infraestructur	MELO	00:24:17:B9:86:FD		7	Mon Feb 27 12:06:52 2012	Mon Feb 27 12:07:48 2012	-81	54.0
11	infraestructur	ISCE	00:23:69:6B:49:4E		8	Mon Feb 27 12:06:49 2012	Mon Feb 27 12:07:49 2012	-85	54.0
12	infraestructur	INFINITUM9	00:23:51:CF:B8:41		9	Mon Feb 27 12:06:51 2012	Mon Feb 27 12:07:37 2012	-76	54.0
13	infraestructur	AXTEL-CAB8	14:D6:4D:CA:CA:B8		9	Mon Feb 27 12:06:59 2012	Mon Feb 27 12:07:11 2012	-80	54.0
14	infraestructur	LogGamers	A0:21:B7:A4:D2:EE		7	Mon Feb 27 12:07:00 2012	Mon Feb 27 12:11:50 2012	-80	54.0

Figura 4.1 Datos del Monitoreo

Al analizar los datos obtenidos se puede observar que algunos de estos resultaban nulos debido a que en algunos casos los tiempos en que se vieron los AP por primera y última vez eran iguales. Dado que esto podría causar un error en la implementación del programa, se decidió descartarlos. Como se planteó en los capítulos anteriores, una condición necesaria para el buen funcionamiento de este método es que el dispositivo móvil atravesara la región de cobertura del AP. De otra forma no se podría obtener la intersección de los círculos correspondientes al rango de cobertura del AP. Así, en la implementación del programa desarrollado se filtraron los datos nulos como en este caso, y se seleccionaron los datos adecuados como es el caso de los tiempos y las direcciones MAC correspondientes a cada dispositivo localizado.

4.2 Implementación del Método DoE en Matlab

La idea fundamental del programa realizado en Matlab fue procesar los datos recabados a partir del monitoreo, los cuales se encontraban guardados en archivos con extensión ".csv". El primer paso fue tomar los datos útiles tales como:

el tiempo del primer avistamiento del AP, el tiempo del último avistamiento del AP y la dirección MAC del AP monitoreado. Con los datos obtenidos se calculó el tiempo total del recorrido para posteriormente auxiliarnos de la herramienta Google Earth[ref], con la cual medimos la distancia total del recorrido de la ruta experimental. Una vez obtenidos el tiempo total y distancia total del recorrido se procedió a calcular la velocidad del móvil.

En base al área de monitoreo se obtuvo un mapa en el cual se muestreó la ruta en cuestión para realizar la distribución y asignación de tiempo a cada muestra del recorrido. Así mismo se utilizó para ubicar de forma geográfica los puntos de primer y último avistamiento del AP para graficar las circunferencias con radio igual al radio de cobertura del AP. Posteriormente se localizaron las dos intersecciones de las circunferencias, las cuales corresponden a la ubicación real del AP y a su espejo.

Se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente para las diferentes rutas tomadas con la finalidad de obtener otra constelación, la cual se usó para eliminar los espejos del AP y diferenciar la ubicación real del AP. Cabe aclarar que en el método DoE se realiza el proceso de rotación que en este caso no se implementó debido a que se tenían las trayectorias previamente establecidas. Sin embargo, para este caso la eliminación de espejos se realizó calculando la distancia mínima entre las posibles soluciones de los AP.

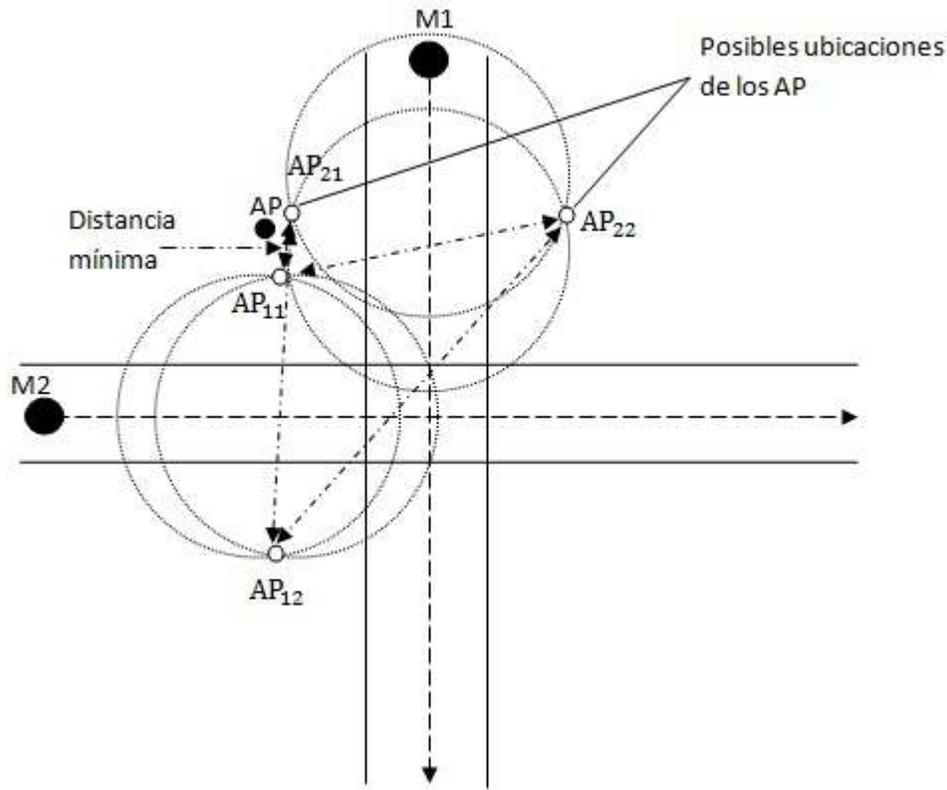


Figura 4.2 Eliminación de espejos mediante el cálculo de la distancia mínima

Como se puede observar en la Figura 4.2, la distancia mínima nos indica que esas son las ubicaciones correspondientes a la ubicación real del AP. Por tanto las soluciones restantes se descartan y se procede a realizar un promedio de las coordenadas correspondientes a las soluciones reales con la finalidad de obtener una sola ubicación del AP.

4.3 Experimento realizado en Ciudad Universitaria

El primer experimento que se realizó fue en las instalaciones de Ciudad Universitaria, pues el lugar presentaba un buen número de APs lo cual nos facilitaba el monitoreo. La ruta escogida para el monitoreo es la que se muestra en la Figura

4.3, la cual circula por el circuito interior de Ciudad Universitaria. Para ello tomamos como punto de inicio la parada correspondiente a la Facultad de Química. El monitoreo se realizó en un automóvil particular.

4.3.1 Resultados del Experimento en Ciudad Universitaria

Como se había establecido en el capítulo 3, una de las condiciones que se tiene que satisfacer para implementar el esquema de funcionamiento del método DoE es que al menos se cuente con dos constelaciones diferentes con la finalidad de eliminar los espejos y localizar los AP. Dadas las condiciones del circuito, fue imposible continuar realizando aproximaciones en esta ruta dado que al superponer la constelación obtenida en una dirección y la constelación obtenida durante el recorrido en dirección contraria, se obtenía la misma distribución de APs impidiendo la posibilidad de discernir entre el AP real y el AP espejo. Además de ello, se contaba con la particularidad de que a lo largo de la trayectoria se realizaron paradas debido a los semáforos que se encuentran a lo largo del circuito, lo cual introduce errores pues en un primer acercamiento se planteó que el móvil se traslada a una velocidad constante a lo largo del rango de cobertura del AP. En este caso no se cumplió y por tanto los datos obtenidos en muchos casos no eran confiables. En la Figura 4.3 se muestran los resultados de las posibles ubicaciones de los APs y en la tabla 1 se muestra la información de la ruta del monitoreo realizado en CU.

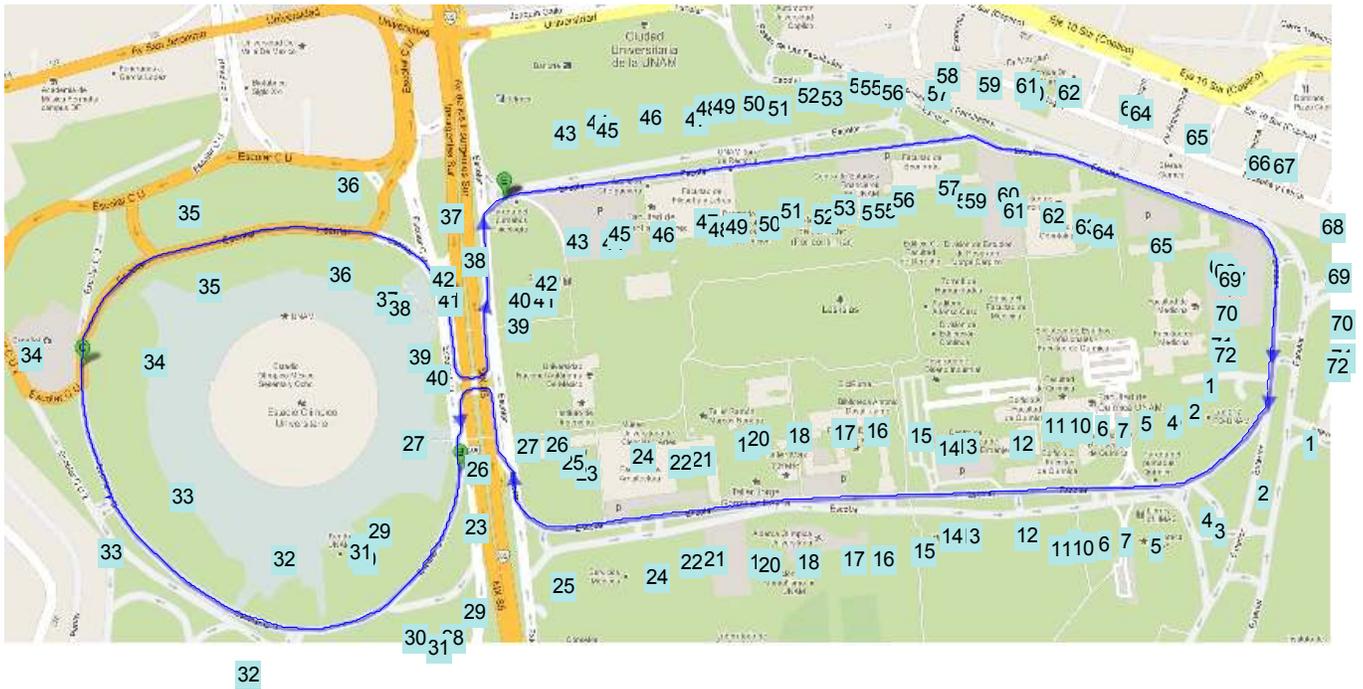


Figura 4.3 Ubicación de APs en CU

Longitud de la ruta	Tiempo de recorrido
4.8 Km	10 minutos 29 segundos

Tabla 1. Datos de recorrido en CU

4.4 Experimento en Localidad de la Ciudad de México

El segundo experimento que se realizó fue en los alrededores de la estación Poliforum. A diferencia del primer experimento realizado en Ciudad Universitaria, en este caso se buscó un lugar el cual permitiera obtener al menos dos constelaciones diferentes, que como se observó anteriormente en el primer experimento realizado fue un factor limitante y por tanto no se completó el proceso de ubicación de los APs.

A continuación se muestra el mapa de la localidad seleccionada para realizar el experimento

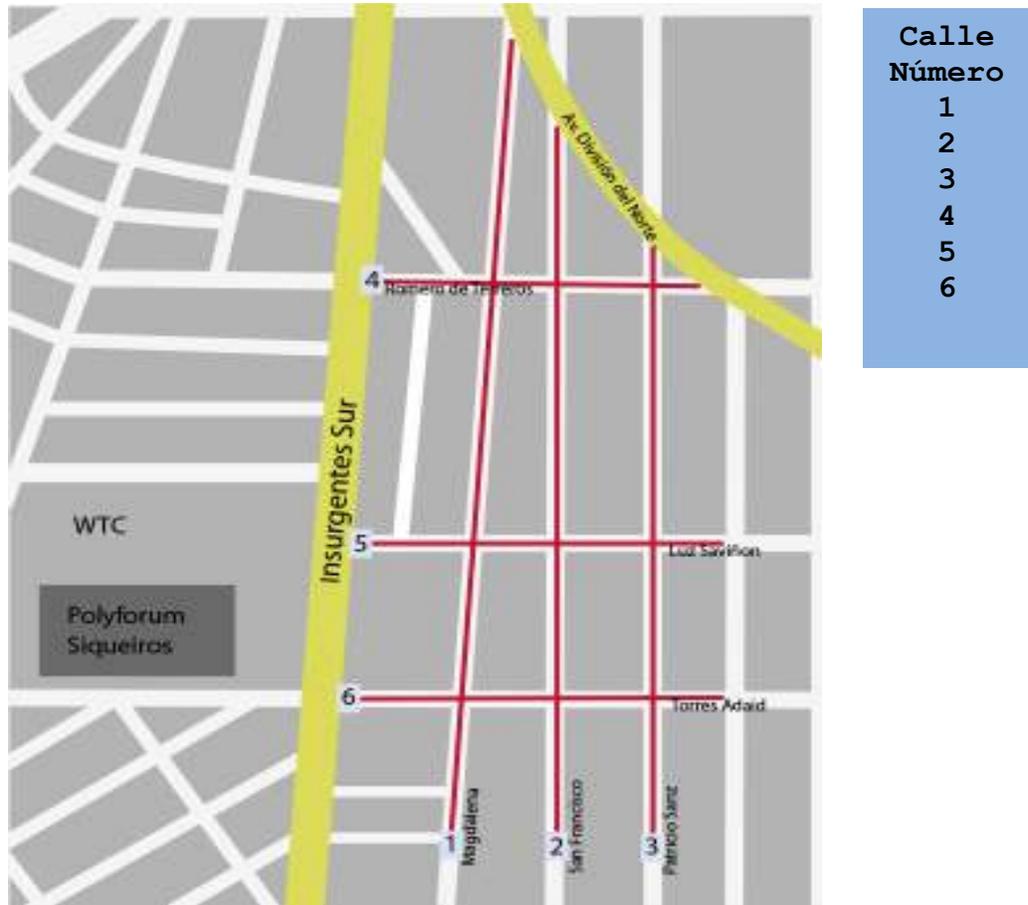


Figura 4.4 Mapa de las calles de la localidad seleccionada

Se observa en la Figura 4.4 que la distribución de las calles presenta las condiciones adecuadas para realizar el proceso de localización mediante el uso del método DoE. Con condiciones adecuadas se hace referencia en que se pueden obtener múltiples constelaciones, y las calles presentan trayectorias casi rectas por las regiones de transmisión de los AP.

Las calles escogidas para realizar el monitoreo se señalan en la Figura 4.4. Como se puede observar estas presentan una distribución paralela y en algún lugar se interceptan con calles que las cruzan casi a 90°. La finalidad de buscar que las calles presentaran esta distribución, además de la ya mencionada anteriormente, fue que se detectaran un número considerable de APs en común entre las calles. Siendo las intersecciones donde se encontró un mayor número de APs en común. Posteriormente se realizó el monitoreo de las rutas seleccionadas. Debido a las condiciones del lugar tales como el cruce de autos y semáforos, el monitoreo se realizó a pie y buscamos que la velocidad a la cual se movía el nodo móvil (laptop) fuera constante y aproximadamente la misma para cada calle.

Una vez que se recabaron los datos se procedió a realizar el mapeo correspondiente de las calles utilizadas para el recorrido. Así mismo, mediante el uso de la herramienta "Google Earth", se calculó la distancia de cada uno de los recorridos y se obtuvo la velocidad correspondiente a cada uno de los mismos. En la Tabla 1 se muestran las velocidades calculadas.

# Calle	Distancia recorrida [m]	Tiempo de recorrido[s]	Velocidad[m/s]
Calle 1	823.65	614	1.34
Calle 2	732.22	585	1.27
Calle 3	604.88	460	1.31
Calle 4	284.05	225	1.26
Calle 5	331.5	250	1.32
Calle 6	340	254	1.33

Tabla 2. Parámetros obtenidos (Distancia, Tiempo y Velocidad)

Con los datos calculados se realizó la asignación tiempo-distancia, en la cual a cada par de coordenadas obtenidas durante el mapeo se le asignó un tiempo en relación a la velocidad previamente calculada.

Una vez que se contó con los datos descritos en la Tabla 1 se procesaron mediante el uso del programa realizado en Matlab. De ello se obtuvo un mapa con los correspondientes APs, tanto el real como su espejo. En la Figura 4.5 se muestra el resultado obtenido para la calle 4.



Figura 4.5 Monitoreo de la Calle 4

Posterior a ello se descartaron los APs que no eran comunes en dos calles, es decir, aquellos que no tenían referencia para obtener su ubicación real y eliminar su espejo. El procedimiento utilizado para ello fue hacer uso de las Direcciones MAC de los APs, debido a que no pueden existir dos dispositivos con la misma dirección MAC. Para esto bastó con buscar que direcciones MAC eran iguales en los diferentes archivos correspondientes al monitoreo de cada calle. De esa forma se conservaron las direcciones MAC que al menos se encontraban en dos archivos y se descartaron los restantes.

A continuación se realizó la superposición para comparar las dos constelaciones entre dos calles que se interceptaban. Distinguiendo así las dos posibles ubicaciones del AP real y su espejo correspondiente a cada constelación, para finalmente obtener una aproximación de la ubicación del AP real. Para ello se calculó la distancia entre el AP₁₁ de la primera constelación, con respecto al AP₂₁ y el AP₂₂ de la segunda constelación, realizando el mismo procedimiento para el AP₁₂ de la primera constelación. Al comparar las distancias calculadas se distinguieron el AP_{real1} y el AP_{real2} siendo la distancia entre estos dos nodos la menor. En la Figura 4.2 y 4.6 se muestra el procedimiento descrito anteriormente.

En la Figura 4.6, tomando como referencia la calle 4, se utilizaron cuatro constelaciones donde se muestran los APs cuya dirección MAC aparece a su vez en las calles 1, 2 y 3.

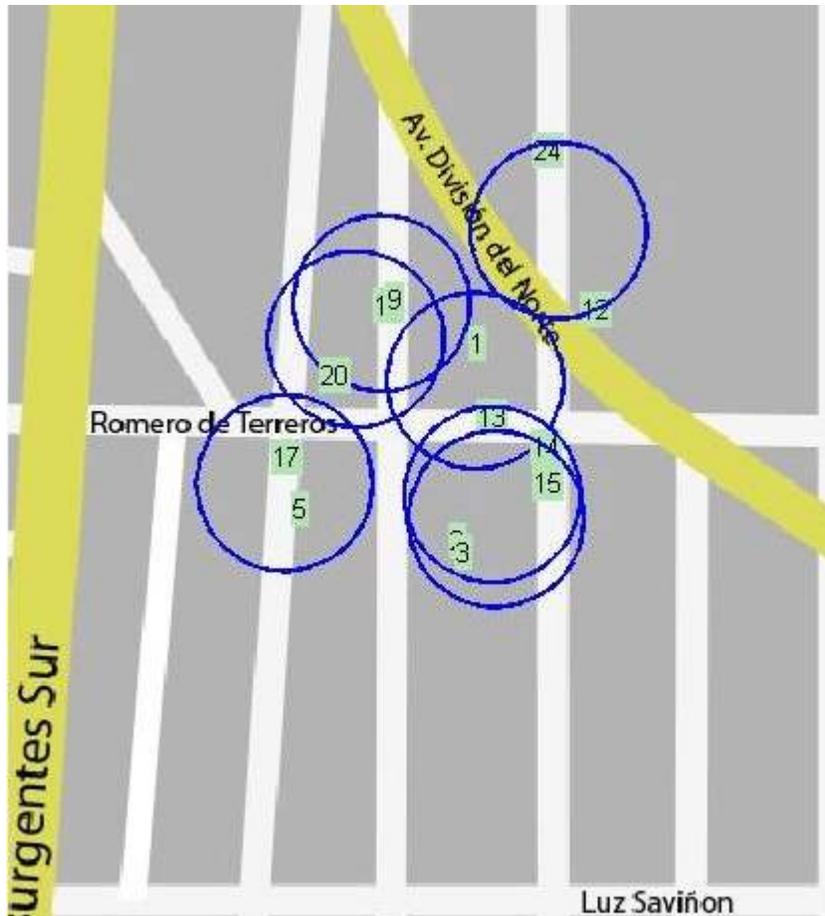


Figura 4.6 Primera aproximación con dos constelaciones

Nodo	Nodo	MAC
1	13	00:21:00:EB:43:89'
2	14	00:18:3F:48:DF:A1'
3	15	02:24:64:D4:BE:D3'
5	17	00:23:51:70:C5:A1'
8	19	00:24:17:8B:F4:A9'
9	20	08:19:A6:C3:98:09'
12	24	00:21:7C:10:54:09'

Tabla 3. Correspondencia entre Direcciones MAC y etiquetas de la Figura 4.6

Con la finalidad de obtener una mejor aproximación en la ubicación real de los APs, se tomaron un mayor número de constelaciones para un mismo AP. Por lo tanto se realizó una comparación para determinar los AP que aparecían en múltiples archivos (calles). Debido a que en su mayoría los rangos de cobertura de los AP detectados eran menor que la distancia entre las calles, se detectaron una cantidad mínima de estos dispositivos (tres AP en común en tres archivos). Las constelaciones correspondientes a los tres archivos fueron suficientes para obtener una comparación más acertada de la ubicación real de los AP. En la Figura 4.7 se muestra el resultado obtenido.

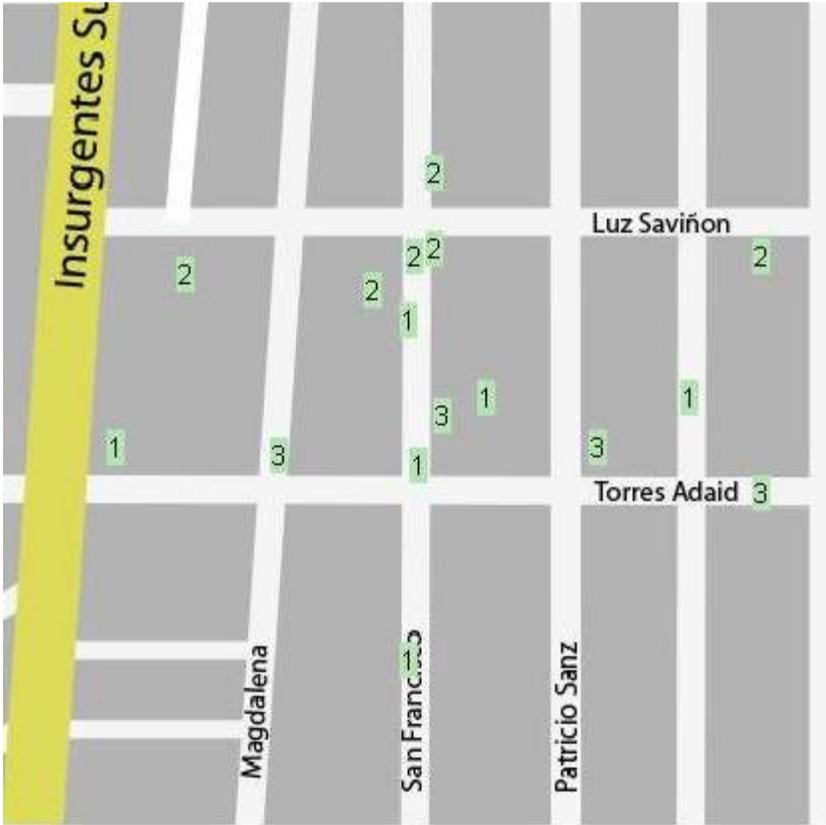


Figura 4.7 Primera aproximación de 3 APs y 3 constelaciones

Etiqueta	Dirección MAC
1	'00:1E:C7:ED:FC:B1'
2	'00:1F:B3:D4:53:69'
3	'02:2E:EE:5B:36:57'

Tabla 4. Correspondencia entre Direcciones MAC y etiquetas de la Figura 4.7

4.4.1 Resultados del Experimento de la Localidad de la Ciudad de México

En la Figura 4.8 se muestra la imagen con los resultados obtenidos al realizar el proceso anterior. Como se puede observar, se usa una notación diferente para cada dispositivo localizado, en particular círculos, triángulos y cuadrados. Se puede observar así que el número de APs detectados en los diversos recorridos fueron tres. Además de ello cabe resaltar que las ubicaciones obtenidas durante el proceso presentan una diferencia mínima. Por lo tanto se puede tener una idea más clara de la ubicación del AP. Con la finalidad de obtener un solo punto para cada AP se realizó un promedio de las coordenadas de X e Y de los nodos reales estimados que se muestran en la Figura 4.8, donde las figuras (círculos, triángulos y cuadrados) de mayor tamaño representan la ubicación promedio de cada AP.



Figura 4.8 Aproximación de la ubicación real de los APs

Etiqueta	Dirección MAC
	'00:1E:C7:ED:FC:B1'
	'00:1F:B3:D4:53:69'
	'02:2E:EE:5B:36:57'

Tabla 5. Asociación Figuras Geométricas y MAC

Finalmente, se buscó la localización física de los dispositivos con la finalidad de obtener el error que nos pudiera decir que tan exacto es el método DoE. De los tres dispositivos que se muestran en la figura anterior solo se pudo localizar uno de ellos con dirección MAC '00:1F:B3:D4:53:69', el cual está etiquetado con los círculos. Dicho dispositivo pertenece a un despacho jurídico

que se encuentra ubicado en la calle de Luz Saviñon esquina con San Francisco. En la Figura 4.8 se observa su ubicación la cual tiene asociada el siguiente par de coordenadas (408.93, 471.73). Con lo cual es posible obtener el margen de error de acuerdo a la siguiente formula

$$\frac{|valor\ aproximado - valor\ exacto|}{|valor\ exacto|} * 100$$

Para la ubicación en "x" tenemos

$$\frac{|408.93 - 390|}{|390|} * 100 = 4.85 \%$$

Para la ubicación en "y" tenemos

$$\frac{|471.73 - 442|}{|442|} * 100 = 6.72 \%$$



Figura 4.9 Comparación de la ubicación real y la ubicación estimada por el método DoE

Como se observa el porcentaje de error obtenido entre la ubicación real del dispositivo y la estimación hecha por el método DoE es del 4.85% en "X" y del 6.72% en "Y", lo cual se traduce en una diferencia de 30 metros entre las ubicaciones mencionadas.

5 Conclusiones

Dado los actuales sistemas de localización que usan infraestructura y hardware con altos costos y complejidad, el sistema de localización DoE resultó ser una buena alternativa para localizar nodos estáticos en una red inalámbrica mediante el uso de un dispositivo móvil. En los experimentos realizados a lo largo de esta tesis se obtuvieron resultados aceptables ya que el porcentaje de error obtenido entre la ubicación real del nodo estático y la ubicación estimada por el método DoE fue del 4.85% en "X" y 6.72% en "Y", que se traduce a una diferencia de aproximadamente 30 metros. Cabe mencionar que encontramos ciertas limitaciones en la implementación de este método tal como: la velocidad del nodo móvil debe de ser lo más constante posible con la finalidad de que la distribución de tiempos sea uniforme. DoE solo brinda posiciones relativas con referencia a la trayectoria del nodo móvil el cual realizó el monitorio.

Sin embargo creemos que el método DoE puede mejorar su precisión tomando en cuenta los siguientes puntos: una mejor resolución de la imagen de la ruta experimental nos permite obtener un mayor número de muestras con lo cual se obtiene una mejor precisión en la distribución de tiempos y longitud. Se puede reducir el margen de error de este método si se utiliza en conjunto con otro método de localización tal como el método RSS (Received Signal Strenght), ya que nos permite tomar en cuenta la potencia de la señal recibida siendo posible obtener una mayor precisión en el rango de cobertura del nodo estático.

6 Bibliografía

- [1] "Direction of Encounter (DoE): A Mobility-based Location Method for Wireless Networks", M. Pascoe, J. Gomez, V. Bonilla, M. Lopez-Guerrero, V. Rangel y E. Rodriguez.

- [2] Bonilla G. Verónica, "Propuesta de un Método Basado en Movilidad para la Ubicación de Equipos en una Red Inalámbrica", UNAM 2012.

- [3] Guoqiang Mao, Baris Fidan. "Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks", Information Science Reference, Estados Unidos Mayo 2009.

- [4] Axel Küper. "Location-based Services, Fundamentals and Operation", John Wiley & Sons, Inglaterra, Octubre 2005.

- [5] Carlos A. S. Oliveira, Panos M. Pardalos. "Mathematical Aspects of Networking Routing Optimization", Springer, Agosto 2011.

- [6] <http://maps.google.com.mx>, "Google Maps"

- [7] <http://www.mathworks.com/>

- [8] Izaskun Pellejero, Fernando Andreu, "Fundamentos y aplicaciones de seguridad en redes WLAN: de la teoría la práctica", Marcombo, Junio 2006.

- [9] Aftab Ahmad, "Mobile Data Networks", John Wiley & Sons, Agosto 2005.

- [10] David Muñoz, Frantz Bouchereau, "Position Location Techniques and Applications", Academic Press, Mayo 2009.
- [11] Krzysztof W. Kolodziej, Johan Hjelm, "Local Positioning Systems: LBS Applications and Services", CRC/Taylor & Francis 2006.
- [12] Mohinder S. Grewal, "Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration", John Wiley, Marzo 2007.
- [13] Tsui, "Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach", John Wely & Sons, Enero 3.
- [14] Michale Kennedy, "The Global Positioning System and GIS: An Introduction", Taylor & Francis, 2002.
- [15] <http://www.aircrack-ng.org/>
- [16] Yunhao Liu, Location, Localization, and Localizability, Springer 2011.

7 Índice de Figuras

Figura 2.1 Lateración Circular	15
Figura 2.2 Aproximación de Localización	17
Figura 2.3 Lateración Hiperbólica	18
Figura 2.4 Angulo de Arribo	20
Figura 3.1 Distribución de una red inalámbrica, con tres nodos estáticos (E) y dos nodos móviles atravesando la red (M).	26
Figura 3.2 Momento en que por primera vez el nodo móvil M_n detecta al nodo estático E_m	28
Figura 3.3 Momento en que por última vez el nodo móvil M_n detecta al nodo estático E_m	29
Figura 3.4 Monitoreo por el nodo móvil en un instante después de haber atravesado la región de cobertura del nodo E_m	29
Figura 3.5 Distribución de nodos en una red inalámbrica de acuerdo a su posición respecto a la trayectoria del nodo móvil	33
Figura 3.6 Constelación obtenida por el móvil M_1	35
Figura 3.7 Constelación obtenida por el móvil M_2	35
Figura 3.8 Superposición de las constelaciones de la Fig. 3.6 y Fig. 3.7 a, punto de referencia nodo $E1^D$	35
Figura 3.9 Distribución de la ubicación real de los nodos una vez que se han eliminado los espejos	37
Figura 4.1 Datos del Monitoreo	40
Figura 4.2 Eliminación de espejo mediante el cálculo de la distancia mínima	42
Figura 4.3 Prueba en CU	44
Figura 4.4 Mapa de las calles de la localidad seleccionada	45
Figura 4.5 Monitoreo de la Calle 4	47
Figura 4.6 Primera aproximación con dos constelaciones	49
Figura 4.7 Primera aproximación de 3 APs y 3 constelaciones	50
Figura 4.8 Aproximación de la ubicación real de los APs	52
Figura 4.9 Comparación de la ubicación real y la ubicación estimada por el método DoE	54

8 Índice de Tablas

Tabla 1. Datos de recorrido en CU	44
Tabla 2. Parámetros obtenidos (Distancia, Tiempo y Velocidad)	46
Tabla 3. Correspondencia entre Direcciones MAC y etiquetas de la Figura 4.6	49
Tabla 4. Correspondencia entre Direcciones MAC y etiquetas de la Figura 4.7	51
Tabla 5. Asociación figuras Geométricas y dirección MAC	52

9 Glosario

AoA	Ángulo de llegada (Angle of Arrival), método empleado para el posicionamiento de un nodo basado en la medición del ángulo de arribo de la señal al nodo.
AP	Punto de Acceso, dispositivo que permite acceder a una red inalámbrica a las terminales que se encuentran dentro del rango de cobertura.
Dirección MAC	Dirección de Control de Acceso al Medio, identificador de la tarjeta de red que consiste en un conjunto de 48 bits agrupados. Los primeros 6 dígitos identifican al fabricante y los últimos
DoE	Dirección de Encuentro (Direction of Encounter), algoritmo basado en conectividad para la localización de nodos en una red inalámbrica.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System), sistema que permite determinar la posición de un objeto en todo el mundo.
Lateración	Método empleado para el posicionamiento, el cual utiliza como referencia dos puntos de acceso, para los cuales se trazan sus rangos de cobertura donde sus puntos de intersección es la probable ubicación del nodo estático.
TDoA	Diferencia en el Tiempo de arribo (Time Difference of Arrival), método empleado para el posicionamiento de un nodo en una red inalámbrica calculando la diferencia de tiempo de arribo de la señal.
ToA	Tiempo de Arribo (Time of Arrival), método empleado para el posicionamiento basado en el cálculo del tiempo en el que arriba una señal al nodo.
Trilateración	Método empleado para el posicionamiento, el cual utiliza como referencia tres puntos de acceso, para los cuales se trazan sus rangos de cobertura donde sus puntos de intersección es la probable ubicación del nodo estático.
SA	Atenuación de la Señal (Signal Attenuation), método empleado para obtener el posicionamiento de un nodo basado en el cálculo de la atenuación de la señal al llegar al nodo.