

# Distribución optimizada de balizas para sistemas de localización fundamentados en Trilateración Esférica e Hiperbólica

## MAEB 2007

J.O. Roa<sup>1</sup>, A.R. Jiménez<sup>1</sup>, F. Seco<sup>1</sup>, C. Prieto<sup>1</sup>, J.L. Ealo<sup>1,2</sup>, F. Ramos<sup>1</sup> y J. Guevara<sup>1</sup>

*Resumen*— Similar al funcionamiento del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), existen diversos sistemas desarrollados para la localización y el guiado de móviles en espacios interiores. En estos sistemas se estima la posición del móvil estableciendo una relación espacial, entre las balizas (satélites en GPS) y el móvil. Para lograr esto, comúnmente se utilizan técnicas de Trilateración Esférica (TE) o Hiperbólica (TH). En cualquier caso los buenos resultados de localización dependen de la correcta ubicación de las balizas, así como de la cantidad adecuada de ellas, con el fin de tener la cobertura deseada en el entorno de trabajo, costos bajos y precisión en las estimaciones de localización del móvil. En este trabajo se utilizó la metodología de optimización llamada DLS, con el fin de encontrar distribuciones optimizadas de balizas en sistemas que usan TE o TH. Con los resultados obtenidos aplicando cada técnica, se hace una comparación de distribuciones optimizadas de balizas entre sistemas que aplican TE y TH. Se distinguen distribuciones regulares de tripletas formando triángulos equiláteros y cuartetos en “Y” para TE y TH respectivamente, sin embargo la orientación de estos elementos base depende bastante de la forma del área a cubrir. Las soluciones obtenidas en TE usan alrededor de 40 % menos de balizas que con TH.

*Palabras clave*— Búsqueda Tabú, búsqueda Local, optimización de cobertura, dilución de precisión, trilateración esférica e hiperbólica.

### I. INTRODUCCIÓN

En el marco de la Computación Ubicua [1], se han desarrollado numerosos sistemas de localización y guiado de dispositivos móviles en espacios interiores. Muchos de estos sistemas de localización funcionan de forma parecida a como se hace en el GPS [2]. En estos sistemas el proceso para estimar la posición del móvil, está fundamentado en establecer una relación entre la posición conocida de las balizas, que están en el entorno del móvil, con un determinado número de distancias medidas entre la posición de las balizas y la posición desconocida del móvil.

Los métodos más usados para medir dichas distancias, son la emisión de señales (R.F, U.S, Laser, ..., etc.) entre las balizas y el móvil. El cálculo de las distancias está dado por la expresión  $d = c \cdot t$ , donde

$c$  es la velocidad de propagación de la señal emitida y  $t$  es el tiempo que tarda la señal en recorrer la distancia  $d$ . [3].

Dos técnicas que permiten establecer la relación entre las distancias medidas, la posición de las balizas y del móvil, son la TE, actualmente usada en GPS [4] y la TH usada en el sistema LORAN-C y Omega [4]. La principal diferencia entre estas técnicas, radica en el tipo de distancias que se miden entre las balizas y el móvil.

En TE el cálculo de la posición del móvil se basa en la medición de Tiempos Absolutos De Vuelo de la señal (TADV), entre las balizas y el móvil [5]. Por lo tanto, en esta técnica se mide un determinado número de distancias absolutas  $d_k$ , entre el punto móvil  $X_m$  con coordenadas desconocidas  $[x_m, y_m, z_m]$  y las balizas, ubicadas a su alrededor en sitios preestablecidos  $X_k$ , con coordenadas conocidas  $[x_k, y_k, z_k]$ , donde  $k = 1, 2, \dots, N$ , siendo  $N$  el número de balizas en la solución. En contraste en TH el cálculo de la posición del móvil, se basa en la medición de Diferencias de Tiempos De Vuelo de la señal (DTDV), entre las balizas y el móvil con respecto a una baliza de referencia  $X_{1(ref)}$  (en la práctica normalmente se usa la más cercana al móvil) [6]. Entonces en TH se miden las diferencias de distancia  $\Delta d_{k-1}$ , que hay entre la distancia de la baliza  $X_{1(ref)}$  al punto móvil  $X_m$  y las distancias de las demás balizas y el punto móvil  $X_m$ .

El hecho de establecer la relación espacial entre balizas y móvil con base en TADV o DTDV, hace que se presenten diferentes condicionamientos en la solución del sistema de ecuaciones. En la práctica estos condicionamientos influyen directamente en la cantidad de balizas que deben ser “visibles” desde el móvil, para dar solución al sistema de ecuaciones, además dónde se deben ubicar las balizas, para evitar singularidades en el cálculo, obteniendo buenos resultados de localización en el sistema [7].

Por lo tanto, dos aspectos importantes que dependen de la técnica de trilateración aplicada e influyen en los resultados obtenidos con un sistema de localización, son: 1. Encontrar la mejor ubicación de las balizas. 2. Conocer la cantidad mínima requerida que garantice la cobertura necesaria. Bajo este enfoque diversos trabajos han presentado algu-

<sup>(1)</sup> Instituto de Automática Industrial - CSIC. Ctra. Campo Real Km 0.2; 28500 La Poveda. Madrid (España). <sup>(2)</sup> Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle (Colombia). E-mail: {javieroa, arjimenez, fseco, cprieto, jealo, f Ramos, jguevara} @iai.csic.es

nas metodologías para resolver el problema de ubicar correctamente los sensores, [8], [9], [10], [11] y [12]. No obstante la mayoría de estos estudios están enfocados a aplicaciones diferentes a la planteada en este trabajo, solo algunos como [9] y [12], abordan la optimización de la ubicación de sensores para localización de dispositivos móviles en interiores, sin embargo la solución está limitada a puntos específicos preestablecidos en el área de trabajo. Consideraciones que nos motivan a presentar en este documento, los resultados obtenidos de comparar distribuciones optimizadas de balizas aplicando TE y TH, con el fin de obtener criterios que ayuden en la selección de la técnica de trilateración más adecuada para implementar en un sistema de localización. Para esto se utilizó la metodología de optimización llamada *Diversified Local Search* (DLS), que demostró buenos resultados optimizando dichos aspectos en [16].

En la siguiente sección presentamos el objetivo principal, basado en la necesidad de conocer y evaluar distribuciones de balizas al aplicar TE o TH, en sistemas de localización. En la sección 3 se hace una breve descripción de las técnicas TE y TH. En la sección 4 se describe el GDOP como factor que permite valorar las configuraciones de balizas. En la sección 5 se describen los parámetros que definen el problema y la función de coste. Posteriormente, se describe la estrategia de optimización implementada. En la sección 7 se presentan algunos resultados comparativos obtenidos de distribuciones optimizadas de balizas, aplicando TE y TH. Por último en las secciones 8 se presentan las conclusiones del trabajo y se plantean los trabajos futuros.

## II. OBJETIVO

Utilizando un proceso de optimización que basa su funcionamiento en una metodología heurística, se busca evaluar y comparar soluciones de cobertura, obtenidas con la optimización de la ubicación y cantidad de balizas, en sistemas de localización de dispositivos móviles que utilizan TE y TH. Se analizarán las distribuciones de balizas resultantes, y de que forma mejoran las soluciones tradicionales basadas en distribuciones en rejillas regulares o panel de abeja.

## III. TRILATERACIÓN ESFÉRICA VS HIPERBÓLICA

Con el propósito de plantear las bases que determinan el funcionamiento de la metodología de optimización propuesta, en esta sección se presenta una descripción breve de los aspectos que definen la técnica TE y la TH, y cuales son las consideraciones que se deben tener en cuenta al ubicar las balizas cuando se usa cada técnica de trilateración.

### A. Trilateración Esférica

Como se dijo anteriormente, en TE la relación entre las posiciones  $X_k$  de las balizas y las distancias  $d_k$ , permite estimar la posición  $X_m$  del móvil. En la

figura 1 se observa la representación del problema en TE.

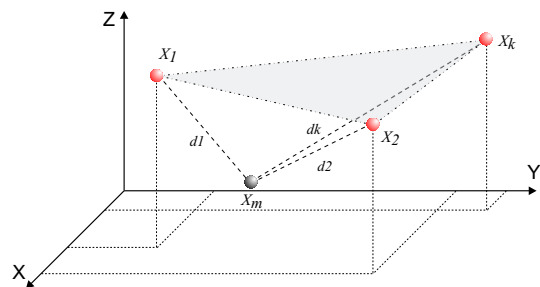


Fig. 1. Representación del problema de TE.

Por lo tanto el proceso para conocer  $X_m$ , consiste en plantear un sistema de ecuaciones del tipo:

$$d_k^2 = (x_m - x_k)^2 + (y_m - y_k)^2 + (z_m - z_k)^2 \quad (1)$$

Donde  $k = 1, 2, \dots, N$ . Siendo  $N$  el número de balizas usadas en el cálculo. En TE el mínimo número de balizas necesario para conocer la posición del móvil es tres.

Luego, linealizando y expresándolo de forma matricial tenemos:

$$A \cdot X = B \quad (2)$$

Donde  $A$  y  $B$  son matrices con términos conocidos y  $X$  contiene las coordenadas desconocidas  $[x_m, y_m, z_m]$ , de la posición del móvil.

Con solución para  $N \geq 3$ ,

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (3)$$

Sin embargo la ecuación 3 no es soluble si  $|A| = 0$  y por consiguiente  $A$  no es invertible. En un caso práctico, esta situación se puede presentar por las siguientes razones:

1. cuando las balizas presentes en el cálculo están alineadas o muy cercanas a estarlo.
2. Si el dispositivo móvil y las balizas están en el mismo plano.
3. Si el móvil está ubicado sobre una de las balizas presente en el cálculo.

Los casos dos y tres se puede descartar, si consideramos que en un recinto las balizas están colocadas en el techo y el móvil se desplazará por debajo de ellas. Sin embargo en el caso uno, la precisión y exactitud de las estimaciones de posición del móvil, dependen de que tan cercanas están las balizas a ser colineales o como están ubicadas con respecto a la posición del móvil.

En la figura 2 se ilustra la representación de dos posibles casos en la localización de un móvil en 3D, con un sistema de localización que aplica TE. Podemos observar que el móvil en la posición "a", tiene disponible tres balizas en las posiciones  $X_1, X_2$

y  $X_3$ , la distribución de esta tripleta corresponde a una buena distribución de balizas. Sin embargo, cuando el móvil está en la posición “b”, el cálculo de  $X_m$  se dificulta, debido a que las posiciones  $X_3, X_4$  y  $X_5$  son casi colineales.

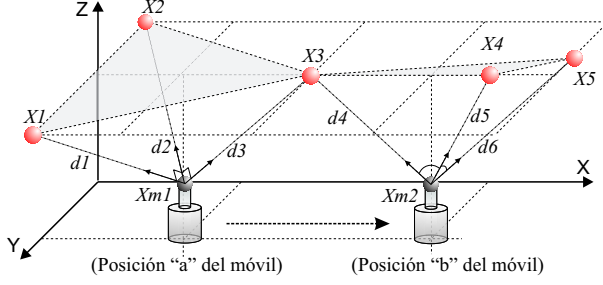


Fig. 2. Representación de una buena y mala configuración de balizas (Posición “a” y “b” del móvil, respectivamente).

### B. Trilateración Hiperbólica

De manera similar al caso esférico, en TH se puede conocer la posición desconocida del móvil resolviendo un sistema de ecuaciones, en este caso con base en las diferencias de distancia  $\Delta d_{k-1}$  medidas, que hay entre la distancia de la baliza de referencia  $X_{1(ref)}$  al punto móvil  $X_m$  y las distancias de las demás balizas  $X_2, X_3, \dots, X_k$  al punto móvil  $X_m$ . En la figura 3 se muestra una representación gráfica de las diferencias de distancias  $\Delta d_1, \Delta d_2, \dots, \Delta d_{k-1}$ .

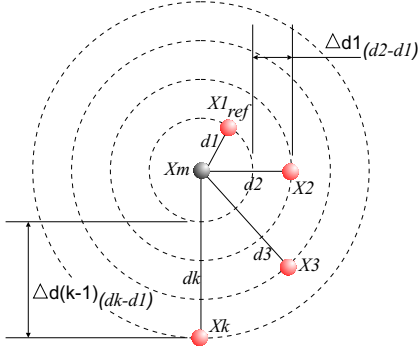


Fig. 3. Representación de la obtención de las  $\Delta d_{k-1}$  en TH.

Entonces, usando diferencias de distancias el sistema de ecuaciones necesario para conocer  $X_m$ , se puede escribir de la siguiente forma:

$$(d_1 + \Delta d_{k-1})^2 = (x_m - x_k)^2 + (y_m - y_k)^2 + (z_m - z_k)^2 \quad (4)$$

Donde  $k = 1, 2, \dots, N$ . En TH el mínimo número de balizas para conocer la posición del móvil es cuatro.

Entonces, linealizando la ecuación 4, aplicando y solucionando las ecuaciones 2 y 3, se obtienen las coordenadas  $[x_m, y_m, z_m]$  de la posición del móvil.

No obstante solucionar el sistema de ecuaciones en TH, también está condicionado a poder invertir la matriz  $A$ , al igual que en TE, por lo tanto desde el punto de vista práctico, tiene las mismas

limitaciones en la ubicación de las balizas y el móvil. Además en TH existe una condición más que no permite dar solución al sistema, debido a que se cumple  $|A| = 0$ , esto ocurre cuando la ubicación de las balizas y la posición del móvil, hacen que se generen distancias iguales entre móvil y balizas, por consiguiente determinadas  $\Delta d_{k-1}$  son cero, generando singularidades en el cálculo matemático. En la figura 4 se muestra una posible configuración de balizas, que crea áreas por donde la posición del móvil no puede ser calculada en TH, debido a que se generan distancias iguales.

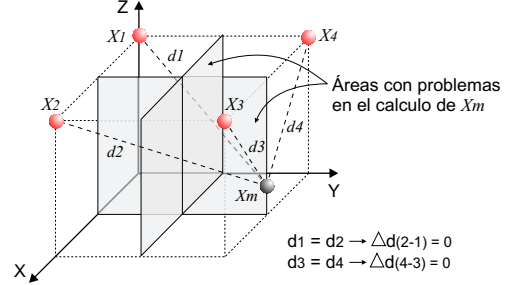


Fig. 4. Representación de una mala distribución de balizas en TH.

Hemos visto que tanto en TE como en TH, existen configuraciones de balizas que generan problemas en la localización del móvil. Aunque estos casos en la teoría parecen fácilmente detectables, en la práctica es un problema difícil de resolver, debido a que el número de balizas puede aumentar considerablemente, de acuerdo al tamaño del área de trabajo, resultando difícil de manejar. Además, la forma de dicha área de trabajo puede tener forma irregular, complicando aun más la decisión de donde ubicar las balizas. Por lo tanto, garantizar la cobertura deseada, con la cantidad mínima de balizas, asegurando una buena configuración de ellas para cualquier posición donde el móvil se encuentre, no es un problema trivial. Una solución podría ser utilizar una alta densidad de balizas, dispersas de forma aleatoria por el área de trabajo, de tal forma que el móvil siempre tenga al alcance muchas más balizas para el cálculo, minimizando la posibilidad de generar singularidades, sin embargo el costo de una solución es uno de los aspectos que normalmente se considera importante a la hora de hacer una implementación.

## IV. GDOP

En la sección anterior se mostró que los buenos resultados en la estimación de la posición del móvil, en un sistema de localización fundamentado en TE o TH, dependen en gran parte de la correcta ubicación de las balizas. Una forma de saber si una determinada configuración de balizas, es buena o mala para utilizarse en los cálculos de localización, es usar el factor conocido como GDOP (*Geometric Dilution of Precision*) [4], que califica la geometría que hay entre la ubicación de las balizas y la posición del móvil,

teniendo en cuenta la precisión vertical, horizontal y tiempo (sincronismo del sistema). Debido a que en el problema de la correcta ubicación de balizas, solo nos interesa conocer la dilución de la precisión de la posición del móvil, en adelante este factor será llamado PDOP (*Position Dilution of Precision*).

Por definición el PDOP en TE y TH, es la relación entre la desviación estándar del error de la posición del móvil y la desviación estándar del error de las distancias medidas. Dado por:

$$PDOP = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}}{\sigma_d} \quad (5)$$

Este representa la amplificación de la desviación estándar del error de las medidas sobre los cálculos de la posición [13].

Geométricamente el PDOP se puede definir como 1 dividido por el volumen de una figura poliédrica, cuyo vértice es el móvil receptor y los lados son los vectores unitarios en la dirección del móvil a cada una de las balizas (a mayor volumen de la figura poliédrica, menor valor numérico de PDOP) [14]. De tal forma que el PDOP está relacionado directamente con la ortogonalidad de los vectores directores que se forman en las direcciones móvil-balizas. Por lo tanto, en la medida en que las balizas se separen o acerquen entre si, la ortogonalidad se pierde aumentando el valor de PDOP.

## V. PARÁMETROS QUE DEFINEN EL PROBLEMA Y FUNCIÓN DE COSTE

El problema consiste en encontrar la ubicación del menor número de balizas, para tener cobertura en toda el área de trabajo, con buenas condiciones geométricas para hacer los cálculos de TE y TH, [15]. Para lograr esto primero se deben definir los parámetros iniciales que establecen las condiciones de funcionamiento del algoritmo. A continuación se describen brevemente:

### Áreas de trabajo y de ubicación de balizas:

Se han especificado dos áreas, una corresponde al área de trabajo donde se hacen los cálculos de localización del móvil, (plano  $Z = Z_{mov}$  en la figura 5) y otra corresponde al área donde se desplazan las balizas buscando la mejor ubicación (plano  $Z = Z_{bal}$  en la figura 5).

**Radio de cobertura:** Este parámetro depende del ángulo de cobertura de los transductores, la altura de las balizas ( $Z_{bal}$ ) y del móvil ( $Z_{mov}$ ). Siendo  $r$  el radio de la circunferencia formada por el corte del lóbulo de las balizas con el plano  $Z = Z_{mov}$ . El radio de cobertura está dado por la expresión 6.

$$r = (Z_{bal} - Z_{mov}) \times \tan(\theta) \quad (6)$$

Donde,  $\theta$  es el ángulo de cobertura.

**Función de coste:** Las distribuciones de balizas son evaluadas, mediante tres factores que consideramos importantes de acuerdo al estudio realizado en

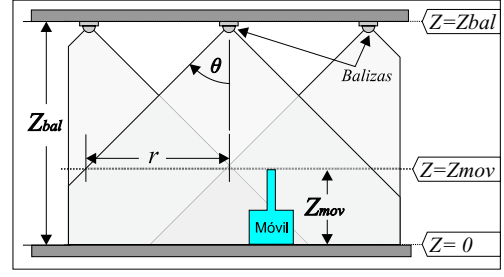


Fig. 5. Planos que restringen la ubicación de balizas y altura del móvil, y el radio de cobertura de los lóbulos de emisión de cada baliza.

[7], siendo la precisión, la disponibilidad y el costo de la solución. Por lo tanto, la optimización consiste en un proceso de minimización de la siguiente función de coste:

$$f(x) = \underbrace{\overline{PDOP} \times K1}_{\text{Imprecisión}} + \underbrace{\frac{(ASD) \times K2}{\text{Área}}}_{\text{No Disponibilidad}} + \underbrace{\frac{N \times K3}{\text{Área}}}_{\text{Costo}} \quad (7)$$

**Área:** Es el área de trabajo en donde se desean hacer los cálculos de localización.

**PDOP:** Es la media de los valores de PDOP esférico para TE y PDOP hiperbólico para TH, calculado en todos los puntos de una cuadrícula con 10 cm. de separación entre puntos, cubriendo el área de localización del móvil.

**ASD:** Corresponde al área sin disponibilidad de servicio de localización, esta situación puede ocurrir por dos casos concretos: 1. cuando no hay cobertura, por no tener señal de la cantidad de balizas necesaria en el cálculo. 2. Cuando se producen singularidades en el cálculo matemático, por la mala configuración de las balizas.

**N:** Es el número de balizas de la solución.

**K1, K2:** Ponderar la función de coste de acuerdo a la importancia que se le quiera dar a la precisión y a la cobertura, con respecto al costo de la solución. Para nuestro caso en donde se ha puesto un precio por baliza de 200 euros, los valores de K1 y K2 se han ajustado a 10 y 500, respectivamente.

**K3:** Representa el precio de cada baliza usada en la solución. Esta dado en *moneda/baliza*. Para este estudio se dejó en  $K3 = 200$  euros.

## VI. METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN

En esta sección se describe la metodología de optimización DLS, presentada en [16]. La cual fue utilizada, en las pruebas realizadas, como herramienta para encontrar las diferencias entre distribuciones optimizadas de balizas en sistemas de localización que usan TE y TH.

En la figura 6 se observa un diagrama que representa la metodología propuesta. El proceso consiste en establecer una distribución inicial de balizas, mediante un proceso de *Iniciación*, posteriormente el proceso de optimización se basa en la búsqueda de

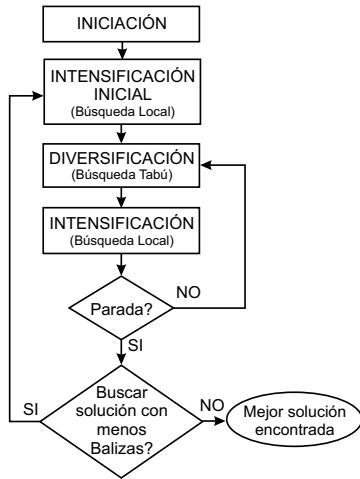


Fig. 6. Diagrama de flujo general del proceso de optimización.

posiciones vecinas de balizas que mejoren la solución, incluyendo etapas de *Intensificación* y *Diversificación*. Estas etapas son alternadas hasta satisfacer alguna condición de parada determinada por el usuario, como número de ciclos, valor de la función de coste, tiempo de ejecución del proceso. A continuación se describe cada etapa del proceso:

#### A. Inicialización:

Esta parte se encarga de generar un número inicial de balizas y distribuir las en el área de trabajo, cumpliendo con la cobertura especificada por el usuario, usando el mínimo número posible de balizas. Esta distribución se obtiene mediante el procedimiento llamado Pre-proceso, implementado en la metodología propuesta en [15] y [17]. Que consiste en generar una distribución regular cuadriculada ó panel de abeja y eliminar las balizas redundantes.

#### B. Intensificación

Esta etapa se basa en una Búsqueda Local (BL). Consiste en evaluar la función de coste de una solución, desplazando cada una de las balizas, a sus vecindades correspondientes. Se busca detectar las posiciones vecinas donde deben ser desplazadas las balizas para mejorar la solución. Su objetivo principal es hacer cambios en la configuración de balizas, que resulten solo en un mejoramiento de la solución.

Cada vez que se evalúan todos los vecinos de todas las balizas en una distribución, decimos que se ha completado un ciclo de *Intensificación*. Cada ciclo inicia determinando un orden aleatorio de evaluación de balizas, de acuerdo a este orden se toma la primera baliza y se desplaza a cada uno de sus vecinos, evaluando la función de coste de la distribución en cada caso, si existe un valor de evaluación mejor que el valor de la solución actual, la baliza correspondiente se desplaza a la posición vecina que produce dicho valor. En caso contrario, es decir ninguna posición vecina es mejor que la

posición actual, la baliza no se desplaza conservando su posición inicial. De igual forma este proceso se realiza con todas las balizas hasta completar un ciclo.

Cada una de las balizas de la solución, tiene 8 posiciones vecinas que están alrededor, en direcciones igualmente espaciadas a 45 grados, desde 0 a 315 grados, a una distancia determinada. Inicialmente la distancia entre la posición actual de la baliza y cada posición vecina es de 0.5 metros. Posteriormente esta distancia disminuye en pasos de 0.1 metros, cada vez que pasado un ciclo, no se encuentra una solución con mejor valor en la función de coste.

El proceso de *Intensificación* finaliza principalmente cuando la distancia entre las balizas y sus respectivas vecindades se hace cero. Sin embargo, al finalizar esta etapa, se dejó la posibilidad de hacer una corta *Intensificación*, dejando fija la distancia entre vecindad y baliza en 0,3 m. y aumentando progresivamente las direcciones de búsqueda, cuando no hay mejoría, hasta llegar a un número definido por el usuario.

De acuerdo a las pruebas realizadas, una buena cantidad de direcciones de búsqueda inicial es 8, porque se abarcan las principales direcciones de búsqueda en el plano, obteniéndose un proceso de optimización que lleva rápidamente a un mínimo local. En el caso de realizar una corta *Intensificación*, nosotros observamos que aumentando las direcciones de búsqueda hasta 11, se puede obtener cierta mejoría en las soluciones. Realizar este proceso con más de 11 direcciones no representa una mejora significativa en la solución, en cambio el costo computacional generado si aumenta considerablemente.

En la figura 7 se ilustra como está distribuida la vecindad de una baliza con 8 direcciones, desde el primer ciclo del proceso, en donde la distancia de búsqueda es 0,5 m. hasta el ultimo ciclo donde la distancia de búsqueda se reduce a 0,1 m.

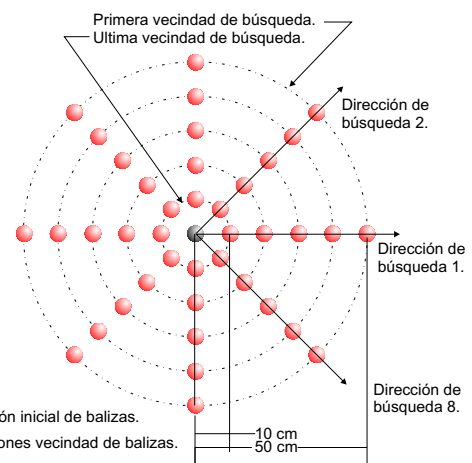


Fig. 7. Vecindad de una baliza.

#### C. Diversificación:

Esta etapa se basa en los principios de Búsqueda Tabú (BT) [18]. Inicia cuando la etapa de *Intensifi-*

cación no puede mejorar más una solución. En esta etapa se realizan desplazamientos de balizas a nuevas áreas del espacio de búsqueda, mediante estrategias basadas en la prohibición de movimientos. El objetivo principal es salir del mínimo local, encontrado en la etapa de *Intensificación*. De tal forma que en el siguiente ciclo de *Intensificación* se inicie con una nueva distribución, que pueda conducir a encontrar una mejor solución.

Inicialmente se define un orden aleatorio en la evaluación de las balizas. Siguiendo este orden, se toma la primera baliza y se evalúa su vecindad, de forma similar a la etapa de *Intensificación*, con la diferencia que en este caso la baliza siempre realiza un movimiento, tomando la mejor posición de la vecindad, aunque esta nueva posición degene la solución. Luego, dejando esta baliza en su nueva posición, se continúa haciendo el mismo proceso en secuencia con las balizas restantes. De esta forma, se consigue que en un ciclo de *Diversificación* todas las balizas se desplacen a su mejor vecino. Y rápidamente se consigue salir del mínimo local.

Para evitar que las balizas regresen a su posición anterior en el siguiente ciclo de *Diversificación*, se implementó una memoria tabú [18], esta consiste en restringir los movimientos en sentido contrario a los ya realizados, es decir si la baliza  $k$  ubicada en la coordenada  $[X_{k1}, Y_{k1}]$ , se ha desplazado a la coordenada  $[X_{k2}, Y_{k2}]$ , el movimiento  $[X_{k2}, Y_{k2}]$  a  $[X_{k1}, Y_{k1}]$  queda restringido, posteriormente si la baliza se desplaza a la coordenada  $[X_{k3}, Y_{k3}]$ , entonces la baliza no podrá realizar los movimientos de la coordenada  $[X_{k3}, Y_{k3}]$  a  $[X_{k2}, Y_{k2}]$  y  $[X_{k2}, Y_{k2}]$  a  $[X_{k1}, Y_{k1}]$ , nótese que se han restringido movimientos y no coordenadas, por lo tanto si una posición es muy buena, la baliza podrá regresar nuevamente a esta posición, desde una posterior coordenada  $[X_{km}, Y_{km}]$ , pero antes habiéndose hecho una exploración en otras áreas.

Se podría pensar que una desventaja al no restringirse posiciones, es que se puede caer en ciclos repetitivos, sin embargo este tipo de proceso evita esta situación, debido a que el entorno de una baliza cambia rápidamente porque en un ciclo tabú, todas las balizas se han desplazado y difícilmente esas posiciones atrayentes se mantienen por mucho tiempo. Esto hace que no se requiera una memoria tabú grande. De acuerdo a las simulaciones realizadas, el tamaño de la memoria tabú puede estar entre 6 a 10 movimientos tabú por baliza. Así mismo la cantidad de ciclos de *Diversificación* no debe ser muy grande, pudiendo estar entre 10 a 15 ciclos. Las dimensiones de la matriz que representa la memoria tabú son  $m \times 4n$ , donde  $m$  es el número de movimientos tabú y  $4n$  corresponde a los pares de coordenadas del punto de inicio  $[X_{k(m-1)}, Y_{k(m-1)}]$  y punto final  $[X_{k(m)}, Y_{k(m)}]$  de un movimiento tabú, por el número de balizas en el proceso.

## VII. RESULTADOS

En esta sección se presentan dos pruebas realizadas con el fin de evaluar y comparar la optimización de ubicación de balizas en sistemas que usan TE y TH. La primera consistió en optimizar la ubicación de diferente número de balizas, desde 5 a 10 balizas, aplicando TE y TH, con el fin de observar que tipo de distribuciones se forman y detectar posibles patrones que caractericen cada técnica. Por lo tanto, se definió un área suficientemente grande ( $100m^2$ ), para que las balizas pudieran ubicarse sin tener limitaciones de espacio. Además, para evitar algún tipo de influencia en las soluciones, debida a la distribución inicial de balizas, en cada caso, todas las balizas se ubicaron en un área muy pequeña, estando casi una encima de otra al inicio de la optimización. Por lo tanto, en esta prueba no se usó el Pre-proceso para generar las configuraciones iniciales.

Con el fin de comparar las curvas de optimización generadas y evaluar cada técnica, la segunda prueba consistió en hacer un estudio de cobertura sobre dos áreas diferentes, aplicando TE y TH en cada una. Un área tiene  $19m^2$  en forma de "L" y la otra corresponde a un cuadrado de  $16m^2$ . En todas las pruebas se usaron los mismos parámetros iniciales, siendo:  $r = 2m$ ,  $Z_{bal} = 4m$ . y  $Z_{mov} = 2m$ .

En la figura 8 se muestran los resultados obtenidos en la primera prueba. En las seis configuraciones correspondientes a TE, podemos observar que las distribuciones tienden a formar grupos de tres balizas, casi equidistantes. Cuando la cantidad de balizas de la solución lo permite, se forman claramente estas tripletas, como en la distribución con nueve balizas (nosotros probamos con 12 balizas y la situación se repitió, formándose cuatro tripletas de balizas). Cuando hay una o dos balizas sobrantes, están se ubican en puntos equidistantes entre las tripletas, haciendo conexión entre ellas, como sucedió en las configuraciones de ocho y diez balizas. Sin embargo existen algunas configuraciones particulares, como los casos con cinco y seis balizas, en donde se crean distribuciones tipo estrella. En las seis configuraciones correspondientes a TH, el patrón en las distribuciones no es tan claro de apreciar, sin embargo podemos ver que se forman patrones cercanos a una "Y", con distribuciones más densas formando un solo grupo, esto debido a que en TH el cálculo es más sensible a las singularidades.

En las figuras 9 y 11 se observan las curvas de optimización aplicando TE y TH sobre las dos áreas en la segunda prueba. En los dos casos podemos ver que la configuración inicial generada por el Pre-proceso en TH, tiene más balizas que en TE, esto se debe a que en TH se necesita una baliza más, con respecto a TE, para poder resolver el sistema de ecuaciones que dan solución a la posición del móvil. La diferencia de balizas depende del tamaño y la forma del área que se esté estudiando. En las dos áreas estudiadas, en TE y TH se llegó a

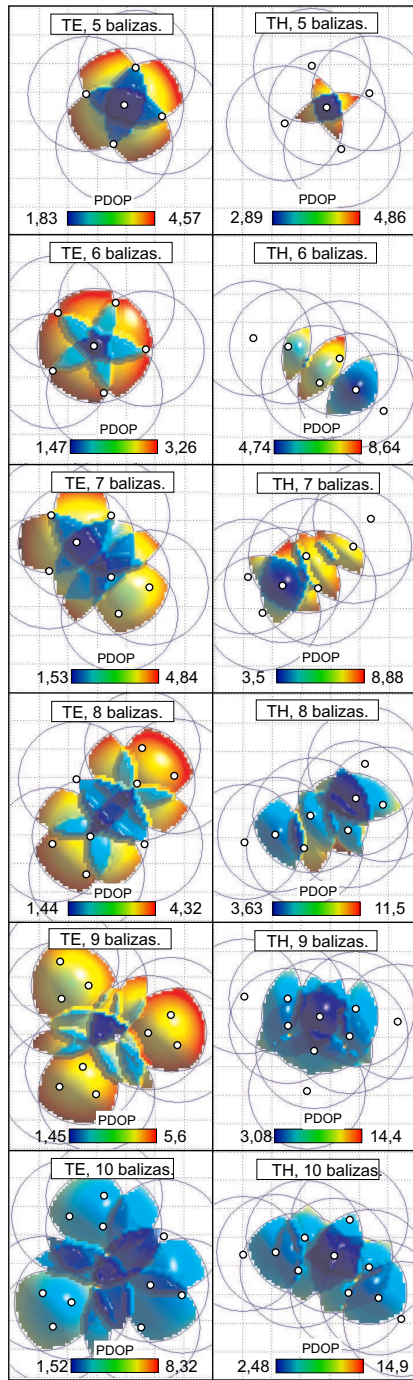


Fig. 8. Distribuciones optimizadas de balizas con TE y TH, usando diferente número de balizas, en un área libre de paredes.

la mejor configuración de acuerdo a la función de coste, teniendo casi el 100% de cobertura con el menor número de balizas posible. Cuando el proceso eliminó más balizas, los valores en la función de coste aumentaron debido a la pérdida de cobertura en el área. En la figura 10 y 12 se muestran las mejores configuraciones solución encontradas en el proceso, en el área de  $19m^2$  y  $16m^2$  respectivamente. Observamos que en las dos áreas se necesitaron 9 balizas en la mejor solución con TE y 13 balizas en la mejor solución de cobertura con TH. La relación

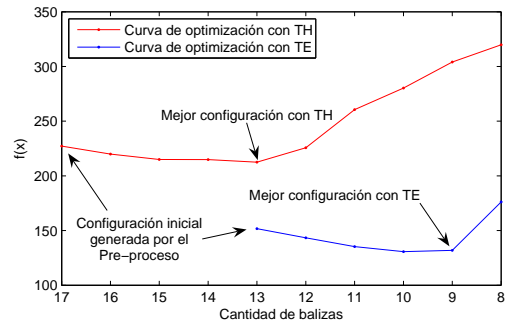


Fig. 9. Curvas de optimización en TE y TH para un área de  $19m^2$  en forma de L.

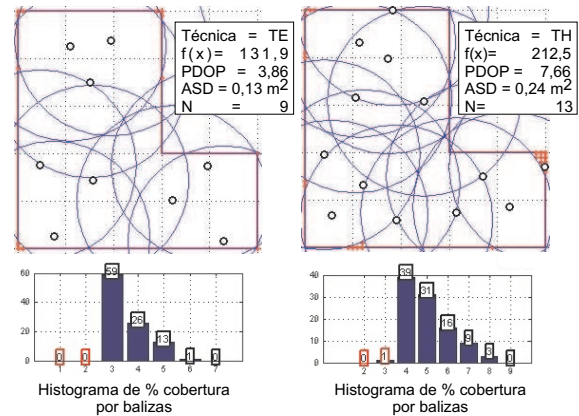


Fig. 10. Distribuciones optimizadas de balizas, correspondientes a los valores mínimos en las curvas de la figura 9.

13/9 indica que se necesita al menos un 40% más de balizas para cubrir áreas similares en TH que en TE. Lo cual está de acuerdo con el mínimo número de balizas necesarias para trilaterar, 4 en TH y 3 en TE que también es cercano al 40%. Además podemos observar que los valores de PDOP en TH son mayores que en TE, esto indica que las estimaciones de posición del móvil serán más precisas en las distribuciones con TE.

Aunque la configuración base típica en TE es la triplete equilátera, que puede usarse como pieza elemental para cubrir grandes áreas, no es evidente cual es la mejor forma de orientar estas tripleteas entre si. Además el efecto que tiene las paredes ó límites del recinto a cubrir, hace que el óptimo no siempre sea un arreglo de tripleteas (incluso si  $N$  es múltiplo de 3). Véase el caso de la figura 12, donde las tripleteas equiláteras ya no son la mejor solución.

## VIII. CONCLUSIONES

En los experimentos realizados hemos usado la metodología DLS como herramienta para encontrar configuraciones optimizadas de balizas en sistemas de localización que usan TE y TH. Con base en los resultados obtenidos hicimos una comparación entre distribuciones aplicando las dos técnicas. Observamos que con TE se pueden obtener mejores configuraciones de cobertura, ayudando a mejorar la precisión en las estimaciones de localización, con menor

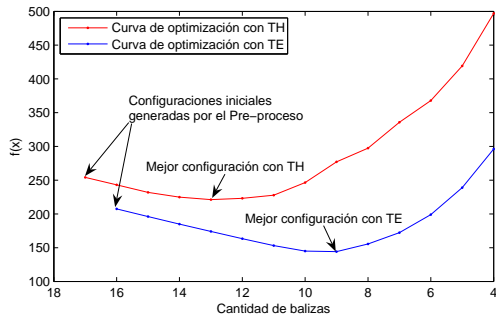


Fig. 11. Curvas de optimización en TE y TH para un área cuadrada de  $4 \times 4$  m.

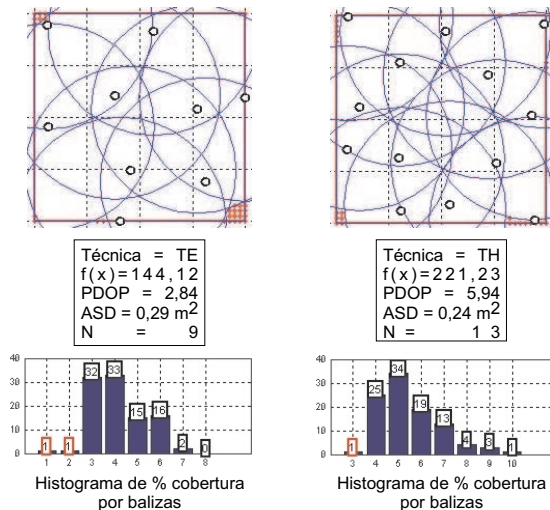


Fig. 12. Distribuciones optimizadas de balizas, correspondientes a los valores mínimos en las curvas de la figura 11.

cantidad de balizas que en TH. Sin embargo el hecho que en TE se requiera un sistema de sincronización externo, puede hacer que el sistema con TH, que necesita más balizas, llegue a ser igual de costoso que el sistema con TE, generando una situación de compromiso, entre el costo y la precisión deseada en el sistema, que no es fácil de solucionar. Por lo tanto, este tipo de estudios previos ayudan a tomar una determinación, a la hora de seleccionar la técnica de trilateración a ser implementada, en el diseño de sistemas de localización de dispositivos móviles, gracias a que las configuraciones de balizas encontradas están optimizadas en factores como el costo y la precisión, haciendo que la decisión de tomar una u otra técnica sea más fácil, dependiendo solo de las prestaciones que requiere el sistema.

Por otra parte las distribuciones optimizadas de balizas mostraron que con TE se tiene un patrón base en forma de triángulo equilátero. Y con TH las distribuciones parecen tener un patrón en forma de "Y". Estos patrones pueden ser empleados para realizar un despliegue de balizas, de manera rápida y automática en áreas grandes, para luego hacer un proceso de optimización que realice un ajuste fino en la ubicación de las balizas. Evitando así un proceso de optimización con excesivo costo computacional.

El proceso de optimización aplicado en este trabajo, realiza desplazamientos de balizas en 2D en el área de ubicación de balizas. Con base en estudios previos [7], creemos que se pueden obtener mejores resultados de optimización si la ubicación de las balizas se hace fuera del plano  $Z_{bal}$ . Por lo tanto como trabajo futuro se plantea estudiar la optimización de la ubicación de balizas en 3D. Ayudando a obtener mejores estimaciones de posición en los sistema de localización basados en trilateración.

## REFERENCIAS

- [1] M. Weiser. The computer for the twenty-first century. *Scientific American*, pages 94–104, 1991.
- [2] A.R. Jiménez, F. Seco, C. Prieto, and J. Roa. Tecnologías sensoriales de localización para entornos inteligentes. *I Congreso español de informática - Simposio de Computación Ubicua e Inteligencia Ambiental, UCAMI2005 (Granada)*, pages 75–86, 2005.
- [3] A.R. Jiménez and F. Seco. Precise localisation of archaeological findings with a new ultrasonic 3d positioning sensor. *Sensors and Actuators A*, pages 123–124, 2005.
- [4] E.D. Kaplan. *Understanding GPS Principles and Applications*, volume 1 of *Mobile Communication Series*. Artech House Publishers, 1996.
- [5] Soo-Yeong Yi and Byoung-Wook Choi. Autonomous navigation of indoor mobile robots using a global ultrasonic system. *Robotica*, 22:369–374, 2004.
- [6] M. Walworth and A. Mahajan. 3d position sensing using the difference of the time-of-flight from a wave source to various receivers. *ICAR'97*, pages 611–616, 1997.
- [7] J. Roa and A.R. Jiménez. Localización 3d mediante balizas activas: Teoría y código en matlab. *Internal Report. SAM group, IAI-CSIC, Spain*, pages 1–50, 2004.
- [8] B.T. Wang, R.A. Burdisso, and C.R. Fuller. Optimal placement of piezoelectric actuators for active structural acoustic control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5:67–77, 1994.
- [9] D. Sinriech and S. Shoval. Landmark configuration for absolute positioning of autonomous vehicles. *IIE Transactions*, 32:613–624, 2000.
- [10] F. Figueroa and A. Mahajan. A robust method to determine the coordinates of a wave source for 3d position sensing. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 116:505–511, 1994.
- [11] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin, and T. Tran. Self-configuring localization systems: Design and experimental evaluation. *ACM Transactions on Embedded Computer Systems*, Vol. TBD, No. TBD, TBD 20TBD, Pages 131., TBD 20TBD:1–31, 2002.
- [12] S. Shoval and D. Sinriech. Analysis of landmark configuration for absolute positioning of autonomous vehicles. *Journal of manufacturing Systems.*, 20,1:44 – 54, 2001.
- [13] N. Al-Dhahir R. Yarlagadda, I. Ali and J. Hershey. Gps gdop metric. *IEEE Proc.-Radar Sonar Navigation*, 147:259–264, 2000.
- [14] J. J. Jr Spilker. Gps signal structure and performance characteristics. *Navigation*, 1:29–54, 1980.
- [15] J.O. Roa, A.R. Jiménez, F. Seco, C. Prieto, J. Ealo, and F. Ramos. Primeros resultados en la optimización de la ubicación de balizas para localización utilizando algoritmos genéticos. *XXVI Jornadas de Automática*, pages 75–86, 2005.
- [16] M. Laguna, J. O. Roa, A. R. Jimenez, and F. Seco. Diversified local search for the optimal layout of beacons in an indoor position system. *Working paper, Leeds School of Business University of Colorado at Boulder*, 2006.
- [17] J.O. Roa, A.R. Jiménez, F. Seco, C. Prieto, J. Ealo F. Ramos, and J. Guevara. Un método heurístico mejorado basado en algoritmos genéticos para optimizar la ubicación de balizas en sistemas de localización. *XXVII Jornadas de Automática*, pages 120–129, 2006.
- [18] F.W. Glover and M. Laguna. *Tabu Search*, volume I. Kluwer Academic Publishers, 1998.