

UN MÉTODO HEURÍSTICO MEJORADO BASADO EN ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OPTIMIZAR LA UBICACIÓN DE BALIZAS EN SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN

J.O. Roa¹, A.R. Jiménez¹, F. Seco¹, C. Prieto¹, J.L. Ealo^{1,2}, F. Ramos¹ y J. Guevara¹
{javieroa, arjimenez, fseco, cprieto, jealo, f Ramos, jguevara} @iai.csic.es
<http://www.iai.csic.es/lopsi/>

⁽¹⁾ Instituto de Automática Industrial - CSIC

Ctra. Campo Real Km 0.2; 28500 La Poveda. Madrid (España)

⁽²⁾ Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle - (Colombia)

Resumen

En el diseño de sistemas de localización, uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta, es determinar cuantos sensores son necesarios para cubrir un área y donde colocarlos, con el fin de tener la solución de cobertura con la cantidad mínima de balizas posible, cumpliendo con la precisión y exactitud deseada en las estimaciones de localización. En este trabajo presentamos un método mejorado para optimizar la ubicación y cantidad de balizas usadas en sistemas de localización. Su funcionamiento está basado en un pre-proceso heurístico y un algoritmo genético. Los resultados demuestran que con esta nueva metodología, podemos conseguir soluciones 1,2% mejores y seis veces más rápido que con la anterior metodología, contribuyendo directamente en la cobertura, precisión y exactitud alcanzada en los sistemas de localización de dispositivos móviles. Además de obtener una configuración optimizada, con la cantidad de balizas adecuada para cubrir el área específica de estudio.

Palabras clave: Método Heurístico, Algoritmos genéticos, Optimización, ubicación de balizas, Localización, Trilateración, Dilución de la precisión.

1. INTRODUCCIÓN

Detectar la presencia de una persona al llegar a un recinto, conocer su posición exacta, determinar que desea hacer esta persona de acuerdo a como interactúe con su entorno, con el fin de facilitarle las tareas haciendo que su entorno se adapte a sus necesidades, son algunos de los objetivos principales de la “Inteligencia Ambiental”, también conocida como “Computación Ubicua” [1]. La combinación de redes inalámbricas de área personal con las redes cableadas, interactuando con

sistemas de localización de dispositivos móviles y diversos tipos de sensores inteligentes conectados en red e integrados en los objetos de la vida cotidiana, dan lugar a la creación de entornos inteligentes que pueden dar mejor calidad de vida a las personas. Todo esto es muy prometedor, sin embargo, aun existen barreras tecnológicas por resolver. Desde este enfoque, uno de los aspectos más importantes por resolver es modelar dicho entorno localizando los diferentes actores, pudiendo ser personas ó cualquier dispositivo móvil [2].

De forma similar al funcionamiento del GPS, la tendencia para localización en interiores es utilizar técnicas de trilateración, donde la posición se calcula con base en la medición de un determinado número de distancias d_k , entre el punto móvil X_m con coordenadas desconocidas $[x_m, y_m, z_m]$ y marcas o balizas fijas (equivalente a los satélites en GPS), ubicadas a su alrededor en sitios preestablecidos X_k , con coordenadas conocidas $[x_k, y_k, z_k]$, donde $k = 1, 2, \dots, N$. De esta forma, se han desarrollado varios sistemas que buscan la localización en interiores basada en técnicas de trilateración, como Active Bat, Cricket, Hexamine, 3D-Locus, etc., [2, 3, 4, 5], sin embargo los inconvenientes de precisión y robustez presentes en este tipo de sistemas, se deben en gran parte a la incorrecta distribución de las balizas ubicadas alrededor del dispositivo móvil y a la falta de cobertura, situación nada fácil de solucionar cuando se tiene un área de trabajo algo más grande que una habitación ó con periferia de forma irregular, en donde se debe cumplir con ciertos requerimientos de precisión y cobertura.

En diversos trabajos se han estudiado algunas metodologías para resolver el problema de ubicar correctamente los sensores, [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. No obstante los objetivos en la mayoría de estos estudios están enfocados a aplicaciones diferentes a la planteada en este trabajo, y solo

algunos como [8] 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.

Por lo tanto, un tema de investigación actual, es la búsqueda de la mejor metodología que permita conocer la correcta ubicación de las balizas en el entorno de trabajo, así como la cantidad mínima requerida que garantice la cobertura necesaria para poder realizar los cálculos de trilateración, obteniendo resultados confiables en las estimaciones de posición en toda el área de trabajo.

Con base en un estudio realizado de técnicas y métodos de trilateración [14], se pudo observar como se comportan las diferentes metodologías ante diferentes configuraciones geométricas, detectando situaciones desfavorables entre el dispositivo móvil y las balizas. Estas situaciones hacen que el factor conocido como DOP (Dilution Of Precision) aumente considerablemente, dando como resultado errores en las estimaciones de posición del móvil. Este estudio fue fundamental para plantear las bases de un primer trabajo propuesto por los autores de este artículo [15]. El trabajo previo mostró la implementación de una metodología basada en un pre-proceso heurístico y un Algoritmo Genético (AG), con el fin de optimizar la ubicación de las balizas, esta propuesta fue un primer acercamiento a solucionar el problema de no saber en donde colocar las balizas en un área determinada, para obtener buenos resultados en los cálculos de localización aplicando trilateración. Sin embargo se detectó que el método podía quedar atrapado en mínimos locales con determinadas configuraciones de balizas, por lo tanto se realizaron ciertas modificaciones que le dan flexibilidad a la búsqueda, intentando explorar otras regiones del área, con el fin de salir de posibles mínimos locales.

En este documento se presentan los resultados obtenidos con el método basado en AG's, presentado en [15], aplicando algunas estrategias que se han implementado para mejorar su funcionamiento. En la sección 2 presentamos el objetivo principal basado en la optimización de los parámetros que definen la función de coste. Posteriormente se hace el planteamiento del problema, definiendo aquellos parámetros fijos que describen el problema concreto a resolver. En la sección 4 se describe la estrategia de optimización, dividiéndolo en las tres partes principales que conforman el algoritmo propuesto. En la sección 5 se describen las nuevas mejoras implementadas e incorporadas en la metodología. En la sección 6 se presentan algunos resultados comparativos obtenidos entre la metodología anterior y la nueva. Por último en las

secciones 7 y 8 se presentan las conclusiones del trabajo y se plantean los trabajos futuros.

2. OBJETIVOS

El algoritmo propuesto tiene como objetivo principal entregar en la solución un listado de coordenadas $X_i = (x_i, y_i, z_i)$, correspondientes a las posiciones optimizadas de balizas, con $i = 1, 2, 3 \dots N$, siendo N el número total de balizas de la solución, que minimiza una función de coste. Por lo tanto, la evaluación de una solución obedece a la siguiente formulación (1):

$$\text{Evaluación} = f(\text{Precisión}, \text{Disponibilidad}, \text{Costo}) \quad (1)$$

Contemplando tres características que consideramos importantes en una buena solución:

Precisión: Está dada por el DOP, que es el término usado en GPS para describir el nivel de influencia que ejerce la geometría formada entre la configuración de satélites y el receptor móvil, sobre los cálculos de localización, afectando la precisión del sistema.

Disponibilidad: Corresponde al área en donde el sistema de localización puede entregar una estimación de la posición del dispositivo móvil. Situación que puede depender de la cantidad necesaria de balizas que deben estar visibles, para poder calcular la posición del móvil ó la muy mala ubicación de ellas entre si que puedan generar singularidades en los cálculos de localización.

Costo: Expresa el valor monetario que se tiene por metro cuadrado para una determinada solución. Con este factor se da equilibrio a la función de coste, buscando la mejor solución en cuanto a precisión y cobertura con un número de balizas razonable. Su valor está dado en *moneda/m²*.

Por lo tanto, mediante un proceso de minimización de la función de coste, el algoritmo propuesto busca la mejor configuración de balizas, que corresponde a tener buena precisión en las estimaciones de localización minimizando el DOP en el área, buena disponibilidad minimizando el área sin cobertura y con singularidades, y manteniendo el costo de la solución en valores razonables minimizando la cantidad de balizas de la solución.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema consiste en encontrar la ubicación del menor número de balizas posibles, para tener cobertura en toda el área de trabajo, con bue-

nas condiciones geométricas para hacer los cálculos de trilateración, garantizando un sistema utilizable en toda el área de trabajo. Para lograr esto primero se deben definir ciertos parámetros iniciales que establecen las condiciones de funcionamiento del algoritmo. Dado que en este aspecto el planteamiento del problema no ha cambiado con respecto a lo publicado en [15], en este caso solo se hace una breve descripción de dichos parámetros, refiriéndonos a la publicación citada para los detalles. A continuación se describen los parámetros que definen el problema.

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 2) y otra corresponde al área donde se desplazan las balizas buscando la mejor ubicación (plano $Z = Z_{bal}$ en la figura 2). En la figura 1 se aprecia una representación de los dos tipos de áreas. El color amarillo corresponde a la superficie en donde se harán los cálculos de localización del móvil y la rejilla es el área de búsqueda donde las balizas pueden ubicarse.

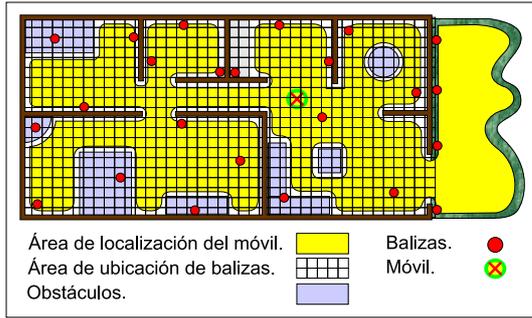


Figura 1: Ejemplo de área de navegación del móvil, y área de posible ubicación de balizas.

Radio de cobertura: Este parámetro depende de las características de emisión y recepción de los transductores seleccionados, 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 $Z = Z_{mov}$, a la altura máxima que estará el móvil (Z_{mov}). El radio de cobertura está dado por la expresión 2.

$$r = (Z_{bal} - Z_{mov}) \times \tan(\theta) \quad (2)$$

Donde,

r : Radio de cobertura, Z_{bal} : Altura de balizas, Z_{mov} : Altura del móvil y θ : Angulo de cobertura.

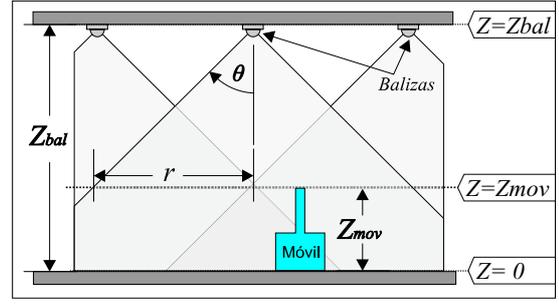


Figura 2: Planos que restringen la ubicación de balizas y altura del móvil, y el radio de cobertura de los lóbulos de emisión de cada baliza.

4. METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN

El funcionamiento del método propuesto puede ser dividido en tres bloques principales que resumen de forma general todo el proceso. En la figura 3 se observa un diagrama de flujo que muestra la secuencia de ejecución de los bloques en el proceso. A continuación se describe cada uno de ellos:

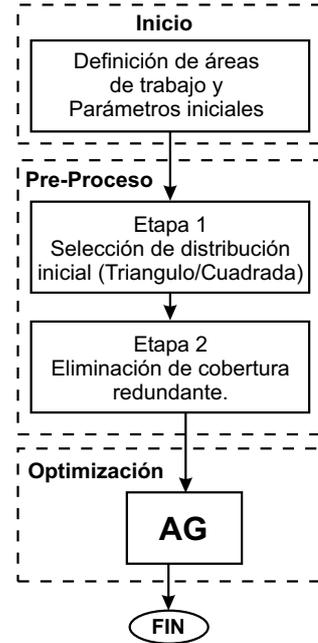


Figura 3: Diagrama de flujo general del proceso de optimización.

4.1. INICIO

En esta parte se establecen las condiciones iniciales del proceso, empezando con definir las coordenadas del área de trabajo y el área de ubicación de balizas, posteriormente se determinan los valores para Z_{bal} y Z_{mov} . Con estos parámetros y conociendo el valor de θ con base en los transductores seleccionados para emisión y recepción,

se calcula el radio de cobertura (r), que será constante en todas las balizas durante todo el proceso. Finalmente se establecen algunos parámetros de funcionamiento del AG, que se describirán más adelante en la sección Algoritmo Genético.

4.2. PRE-PROCESO

El pre-proceso es una parte importante del método, mediante un método heurístico genera una configuración inicial con una cantidad de balizas reducida, cumpliendo con la cobertura especificada, de esta forma se establecen las coordenadas de ubicación inicial de las balizas en el proceso de optimización basado en AG. El pre-proceso consiste de dos etapas, la primera se encarga de seleccionar un tipo de distribución de balizas y su densidad, la segunda etapa se encarga de reducir cobertura redundante. A continuación se describen estas etapas.

4.2.1. Etapa 1 del pre-proceso

Esta etapa selecciona la distribución de balizas entre una tipo cuadrada y otra triangular, buscando la separación entre balizas que con el tipo de distribución seleccionado, cumple con la cobertura deseada usando el mínimo número de balizas. En la figura 4 se muestra un ejemplo de los dos tipos de distribución para una misma área, en los dos casos se llegó a una separación entre balizas de $0,8 m.$, densidad justa que con el mínimo número de balizas se cumple con el 100% de cobertura, sin embargo con la distribución cuadrada se requieren 4 menos balizas que con la distribución triangular.

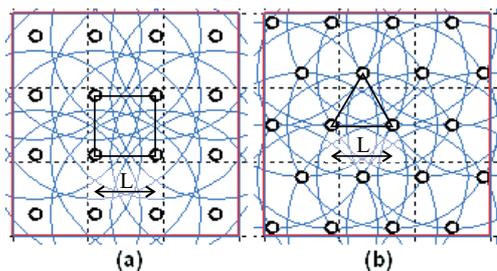


Figura 4: Tipos de distribución de balizas aplicadas en un área de $9 m^2$ con $L = 0,8 m.$ de separación entre balizas. a) La distribución cuadrada usa 16 balizas, b) La distribución triangular usa 20 balizas.

4.2.2. Etapa 2 del pre-proceso

Esta etapa parte de la distribución generada por la etapa 1. Su objetivo es eliminar las balizas que están generando cobertura redundante, sin que se pierda la cobertura deseada. El proceso consiste en ir eliminando sistemáticamente todas las balizas

de forma secuencial, una a la vez, evaluando la cobertura en cada ciclo y en el caso que al eliminar una baliza se pierda la cobertura mínima deseada, reinsertarla en su posición original. Si nos basamos en el ejemplo de la figura 4, la etapa 2 del pre-proceso toma la distribución (a) generada en la etapa 1 (por ser la que menos balizas utiliza) y elimina las balizas que están generando sobre cobertura. En la Figura 5 se muestra la distribución que genera la etapa 2 al finalizar el pre-proceso, para posteriormente ser optimizado.

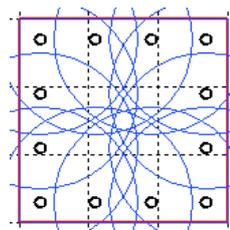


Figura 5: Distribución con 12 balizas generada al finalizar la etapa 2 del pre-proceso.

4.3. OPTIMIZACIÓN CON ALGORITMO GENÉTICO

Los AG son un método de optimización iterativo que basa su funcionamiento en la búsqueda de nuevas soluciones realizando combinaciones de características de otras soluciones, en terminología de AG's cada una de estas soluciones es un Individuo y el proceso de crear nuevos individuos en cada iteración es una generación. Por lo tanto, en cada generación se crean nuevos individuos, que pueden resultar ser mejores que los originales, de acuerdo a su evaluación en una función de coste, de esta forma haciendo que las soluciones converjan a la mejor posible [16].

La optimización de la ubicación de balizas está basada en un AG, aplicado a una nueva metodología fundamentada en el trabajo presentado en [15]. En esta sección solo se presenta una breve descripción de las características del AG que no han tenido cambios con respecto al trabajo citado, como son: las entradas del AG, operadores, criterios de parada y salida del AG. Posteriormente, en la sección 5 presentamos las mejoras que fueron implementadas en la metodología de optimización.

Entradas del AG

Las entradas corresponden a algunos parámetros que usa el AG para su funcionamiento. Dependiendo de su selección determinan que tan rápida puede ser la convergencia del algoritmo ó la calidad de la solución final. En este trabajo se han definido como entradas los siguientes parámetros:

- *Individuos y Genes*: Cada individuo es una posible solución del problema. Como ejemplo, en la tabla 1 se representa un individuo formado por siete números, el primer número de la cadena indica el número de identificación del individuo. Cada casilla del individuo corresponde a una baliza de la solución. A estas casillas en adelante las llamaremos genes, por lo tanto la cantidad de genes que tenga un individuo corresponderá a la cantidad de balizas usadas en determinada solución, y el número dentro de la casilla representa la posición de la baliza de las n posibles posiciones de esa baliza. Luego, para este ejemplo podemos decir que el individuo número uno está conformado por seis genes, donde el primer gen ocupa la posición 23, el segundo gen está en la posición 2 y así sucesivamente hasta el último.

Cuadro 1: Posible conformación de un individuo.

N^o	<i>Gen</i>	<i>Gen</i>	<i>Gen</i>	<i>Gen</i>	<i>Gen</i>	<i>Gen</i>
<i>Ind.</i>	1	2	3	4	5	6
1	23	2	13	1	8	15

- *Población inicial*: Corresponde al grupo de individuos que se generan de forma aleatoria al inicio del proceso de optimización. Aunque el tamaño de la población se mantiene constante, los individuos se van renovando, saliendo los menos aptos y entrando los más aptos de acuerdo al valor de evaluación calculado por la función de coste. La conformación de la población se puede representar mediante la siguiente matriz.

$$\begin{bmatrix} 1 & Rd_{1,1} & Rd_{1,2} & \dots & Rd_{1,n} \\ 2 & Rd_{2,1} & Rd_{2,2} & \dots & Rd_{2,n} \\ 3 & Rd_{3,1} & Rd_{3,2} & \dots & Rd_{3,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m & Rd_{m,1} & Rd_{m,2} & \dots & Rd_{m,n} \end{bmatrix} (m \times n+1)$$

Donde:

m : Es el número de individuos de la población.

n : Es el número de genes de cada individuo.

Rd : Son valores aleatorios entre 1 y el número de posiciones posibles para un gen.

Operadores del AG

Luego de crearse la población inicial y de evaluar cada uno de los individuos que la conforman, se procede a aplicar los operadores de selección y cruce. El primero, como su nombre lo indica selecciona dos individuos de la población, de acuerdo al criterio de selección que use dicho operador. Luego se aplican los operadores de cruce sobre los individuos seleccionados, estos operadores buscan mezclar algunas características de estos individuos para generar nuevos individuos, que posteriormente al ser evaluados, califiquen como aptos

entrando a la población, con la posibilidad de ser mejores que los más aptos de la población existente haciendo que esta mejore en cada ciclo. A continuación se listan los operadores implementados en el algoritmo.

- *Operador de selección*: Tipo Ruleta [15, 16].

- *Operadores de cruce*: Disperso, Un punto de corte, Dos puntos de corte, Trenzado, Mezclado, Cambio de un gen [15, 16].

Criterios de parada

El proceso de optimización se realiza de forma cíclica indefinidamente hasta que un criterio de parada se cumple y por consiguiente se detiene la búsqueda. En el algoritmo propuesto en [15], el proceso se detiene por:

- *Generaciones*: El AG llega a la cantidad de generaciones determina por el usuario.

- *Tiempo*: Cuando el proceso de optimización cumple un tiempo máximo de ejecución especificado.

- *Evaluación*: Cuando se encuentra un individuo con un valor de evaluación igual o mejor a un valor determinado.

- *Generaciones sin mejorar*: Cuando se cumple una cantidad de generaciones específica sin encontrar mejor solución.

Salida

La salida del algoritmo es un individuo, donde cada uno de sus genes contiene las coordenadas (x_i, y_i) de cada baliza i de la solución. La ubicación de todas las balizas en el área de ubicación de balizas, de acuerdo a las coordenadas de los genes del individuo solución, es la mejor configuración de balizas encontrada por el algoritmo, de acuerdo a los criterios de evaluación establecidos en la función de coste.

5. MEJORAS IMPLEMENTADAS EN LA METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN

De acuerdo a pruebas realizadas con el método presentado en [15], se pudo observar que la estrategia de búsqueda implementada tiene la desventaja que la solución final puede fácilmente ser un mínimo local, donde el método quedó atrapado y no fue capaz de salir. Esto se debe a que los límites del área de búsqueda destinada para cada baliza, se establecen al inicio del proceso y se mantienen fijos durante toda la optimización, teniendo como consecuencia que solo se puede llegar a la mejor

solución que está dentro de las áreas destinadas a las balizas. Por ello, si el óptimo se encuentra fuera de esas áreas, el método nunca podrá llegar a esta solución. Por lo tanto, se hicieron algunas modificaciones en la estrategia de búsqueda, para darle a las balizas más capacidad de desplazamiento y exploración en el área de búsqueda. Los cambios realizados son los siguientes:

5.1. NUEVOS CICLOS DE BÚSQUEDA (ERAS)

El objetivo de crear las Eras es escapar de mínimos locales producidos por tener las áreas de búsqueda fijas. Por lo tanto, se crearon áreas de búsqueda móviles. El primer paso fue reducir las dimensiones del área de búsqueda para cada baliza, con el fin encontrar rápidamente mínimos locales en áreas pequeñas. Posteriormente, se determinó desplazar esas pequeñas áreas en cada Era, haciendo coincidir su centro con la posición de las correspondientes balizas de la mejor solución encontrada en el Era anterior. En la figura 6(a) se muestra una representación del comportamiento de la búsqueda antes de los cambios, usando áreas grandes y fijas. En la figura 6(b) se muestra el comportamiento de la búsqueda después de implementar las Eras como nueva estrategia, usando áreas pequeñas y móviles. Los puntos grandes en color rojo corresponden a las posiciones óptimas que deben tomar las balizas, los puntos pequeños en rojo son las posiciones de las balizas al inicio de la optimización, las líneas en color verde son las trayectorias seguidas durante el proceso.

Se puede observar que en la figura 6(a) las balizas solo alcanzan un óptimo local, por tener áreas fijas, en contraste con la figura 6(b) en donde las balizas presentan desplazamientos formando trayectorias hasta llegar a las posiciones óptimas, gracias a que el área de búsqueda se desplaza en cada Era.

Haciendo una analogía con la evolución que experimentan los seres vivos, en el nuevo método propuesto, un cambio de Era se produce cuando se han cumplido un determinado número de generaciones en el AG, en este proceso toda la población es eliminada y solo el mejor individuo sobrevive. Luego con base en esta solución que es la mejor de la Era anterior, se genera una nueva población que nuevamente es introducida al AG para ser optimizada, teniendo en cuenta que las posiciones de los genes de estos nuevos individuos, corresponden a áreas de búsqueda desplazadas con respecto a las áreas de la Era anterior. En la figura 7 se muestra mediante un diagrama de flujo, el proceso realizado en el cambio de Era.

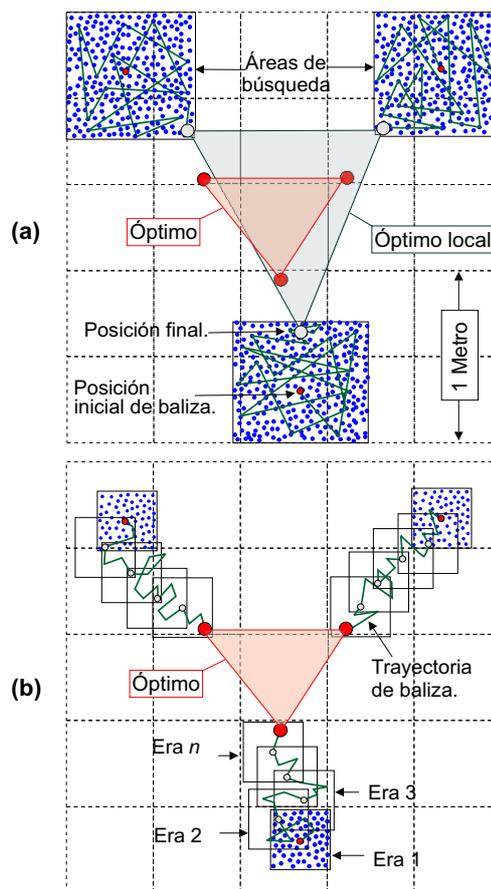


Figura 6: Comportamiento de la optimización. a) Sin Eras, con áreas grandes y fijas. b) Con Eras, con áreas pequeñas y móviles.

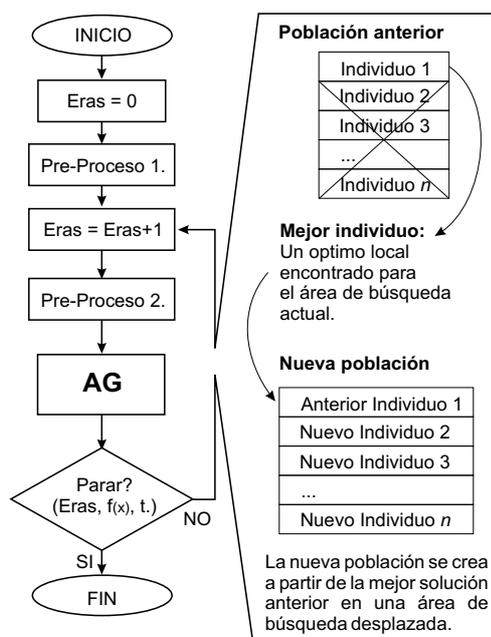


Figura 7: Proceso realizado en la población para el cambio de Era.

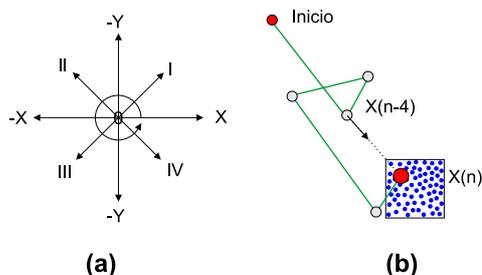


Figura 8: Desplazamiento de áreas de búsqueda en cada Era. a) Ocho direcciones definidas para desplazar el área. b) Luego de cuatro movimientos, la dirección de la nueva área de búsqueda es la dirección del vector resultante entre la quinta posición anterior y la última posición.

5.2. ÁREAS DE BÚSQUEDA DIRIGIDAS Y VARIABLES

El objetivo principal es darle al proceso velocidad en la búsqueda. Consiste en desplazar cada una de las pequeñas áreas, en la dirección que tiende a moverse la correspondiente balizas, en cada mejora. Esto se hizo definiendo ocho direcciones de desplazamiento del área, entonces haciendo la suma de los vectores de desplazamiento de cada baliza, se determina en que dirección debe ser desplazada el área de búsqueda en la siguiente Era. En la figura 8(a) y (b) se observan las direcciones de desplazamiento definidas para un área de búsqueda y como se determina en que dirección desplazar dicha área en la siguiente Era, respectivamente.

Además, la dimensión de las áreas de búsqueda varían según se detecten o no desplazamientos en las balizas, es decir si se detecta que una baliza no presenta desplazamientos después de sucesivas mejoras en la solución, se reduce su área de búsqueda a la tercera parte y en el caso que en dicha área se detecten nuevamente desplazamientos, retomara su tamaño original.

5.3. DIRECCIONES DE BÚSQUEDA RESTRINGIDAS

El objetivo de esta modificación fue el de evitar computo innecesario y obtener velocidad en el proceso de optimización. Consiste en almacenar en una memoria temporal una cantidad determinada de configuraciones de direcciones de búsqueda, que han presentado en la función de coste un valor peor al mejor encontrado. Con el fin de restringir el proceso de evaluación, en el caso de presentarse una configuración de búsqueda, cuyas direcciones estén incluidas en un rango específico de grados en las direcciones de una mala configuración almacenada en memoria. Evitando así evaluar con-

figuraciones de movimientos que están en malas direcciones. Es importante aclarar que solo se restringe la evaluación de una configuración, si todas sus direcciones están dentro de los conos de restricción, por lo tanto si una sola dirección de búsqueda de una configuración, está fuera de los conos de una configuración grabada en la memoria de restricciones, la configuración será evaluada. En la figura 9 se muestra una representación de estas restricciones para tres balizas, los conos de sombra gris corresponden a las zonas en donde cualquier configuración de tres direcciones de búsqueda que esté en esos rango, no será evaluada.

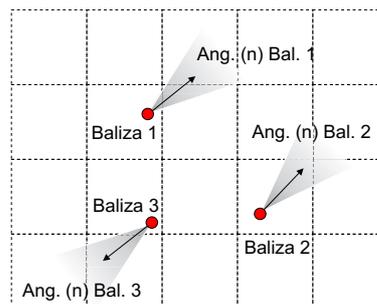


Figura 9: Representación grafica de tres direcciones de balizas en una configuración restringida, por estar dentro de los rangos de una mala configuración conocida.

5.4. FUNCIÓN DE COSTE

Como se mencionó en la sección 2, la función de coste permite evaluar los individuos de la población durante el proceso de optimización. Esta obedece a tres factores que consideramos importantes de acuerdo al estudio realizado en [14], 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:

$$f(x) = \underbrace{\overline{DOP} \times K1}_{\text{Imprecisión}} + \underbrace{\frac{(ASD) \times K2}{\text{Área}}}_{\text{NoDisponibilidad}} + \underbrace{\frac{N \times K3}{\text{Área}}}_{\text{Costo}} \quad (3)$$

Siendo:

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

\overline{DOP} : Es la media de los valores de DOP, calculado en todos los puntos de una cuadrícula con una separación entre puntos de 10 cm., cubriendo el área de trabajo en donde se desea hacer los cálculos de localización.

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 presencia de señal de la cantidad de balizas necesaria para hacer los cálculos de localización del móvil ó simplemente la cantidad de balizas definida por el usuario. 2. Cuando se producen singularidades en el cálculo matemático ó $DOP > 10$, por la mala configuración de las balizas que cubren dicha área.

N : Es el número de balizas que cubren el área evaluada.

$K1$, $K2$: Permiten ponderar la función de coste dándole mayor ó menor peso al primer y segundo termino de la expresión. Sus valores crecen de acuerdo al nivel de importancia que se le quiera dar a la precisión y a la cobertura en determinada área bajo estudio. Además, en relación al costo de una solución, permiten ajustar la curva de optimización en el estudio de un área con diferente número de balizas. 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 $modena/baliza$. Actualmente $K3 = 200$.

6. RESULTADOS

En esta sección presentamos los resultados de optimización de dos pruebas realizadas, demostrando que con el nuevo método propuesto se obtienen mejores resultados que con el método anterior. Se pretende mostrar posibles casos en donde la distribución inicial de balizas a la entrada del proceso de optimización, hace que las soluciones obtenidas con la metodología anterior sean mínimos locales, que pueden ser mejorados aplicando la metodología propuesta.

Los siguientes parámetros iniciales fueron iguales para las dos pruebas: $Z_{bal} = 4m$, $Z_{mov} = 2m$, y $r = 2m$. Así mismo, en cada prueba se definieron iguales las coordenadas de las áreas de trabajo y de ubicación de balizas.

En la primera prueba se quiso cubrir un área simétrica, en este caso se usó un cuadrado con un área de $16m^2$. Después del pre-proceso se obtuvo una distribución con 12 balizas. La segunda prueba consistió en cubrir un área no simétrica, en forma de "L" con $Area = 24m^2$. El pre-proceso generó una solución con 15 balizas. Estas configuraciones iniciales de balizas corresponden a los puntos rojos que se observan en la figura 10 y 11, respectivamente, siendo los puntos de partida del proceso de optimización.

La distribución inicial que entregó el pre-proceso en cada prueba fue optimizada, primero apli-

cando el método sin mejoras y luego la nueva metodología propuesta. En la tabla 2 se muestran los valores de la media del DOP, el área sin disponibilidad (ASD) y el valor en la función de coste, para las diferentes distribuciones de balizas obtenidas en cada prueba. En la columna 2 están los datos de la distribución inicial de balizas generada en el pre-proceso, en la columna 3 están los datos de la solución entregada por el método de optimización sin mejoras y en la 4 los datos de la solución entregada por el método con las mejoras implementadas.

Cuadro 2: Resultados de las pruebas.

	Pre-proceso	Método anterior	Nuevo método
Prueba 1			
\overline{DOP}	2.8994	2.3847	2.1267
$ASD (m^2)$	0.3600	0	0
$f(x)$	182.4744	166.6196	164.0388
Prueba 2			
\overline{DOP}	3.0996	2.3824	2.2260
$ASD (m^2)$	1.2500	0	0
$f(x)$	175.3608	143.4972	141.7344

En la figura 10 se pueden ver las distribuciones obtenidas en la prueba 1. Vemos que en el primer caso (figura 10a), las balizas llegaron a una buena configuración, llegando a buenas posiciones encontradas dentro de los límites del área de búsqueda de cada baliza. Sin embargo, la configuración obtenida con la nueva metodología (figura 10b), en donde las áreas de búsqueda fueron móviles, presenta mejor valor en la función de coste, debido a que se obtuvo una distribución con mejor \overline{DOP} , observándose una distribución simétrica con una diagonal del cuadrado. En la prueba 2, donde se evaluó un área no simétrica, también se lograron mejores resultados con la metodología propuesta. En la figura 11 se pueden ver las distribuciones obtenidas en esta prueba.

En las figuras 10 y 11 se han resaltado en color rojo las áreas de búsqueda de algunas balizas de interés. En las figuras 10a y 11a, que corresponden a usar el método sin mejoras, el área de búsqueda en cada baliza fue de $1m^2$, y en las figuras 10b y 11b, que corresponden a usar el método con mejoras, el área de búsqueda en cada baliza fue de $0,16m^2$. Podemos observar que con el nuevo método dichas balizas de interés, marcadas con color azul, presentaron desplazamientos (líneas de color verde) que alcanzaron a salir del área de $1m^2$, colocándose en posiciones que con el método sin mejoras no fue posible encontrar, debido a que sus áreas de búsqueda fueron fijas.

Otra ventaja del método propuesto es la reducción

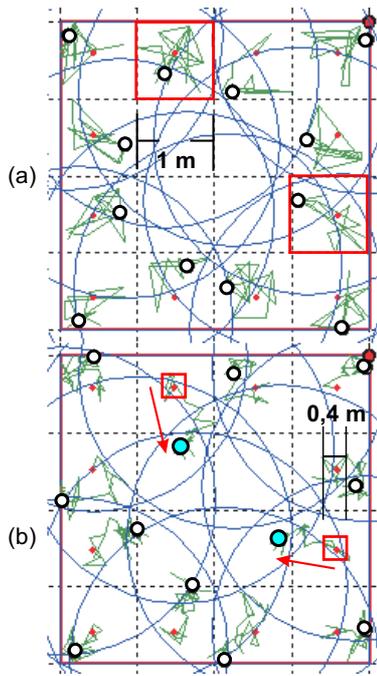


Figura 10: Resultados obtenidos en la prueba de optimización 1, antes y después de implementar la nueva metodología. a) Sin Eras, sin dirección de áreas y sin restricciones de búsqueda. b) Con Eras, con dirección de áreas y con restricciones de búsqueda.

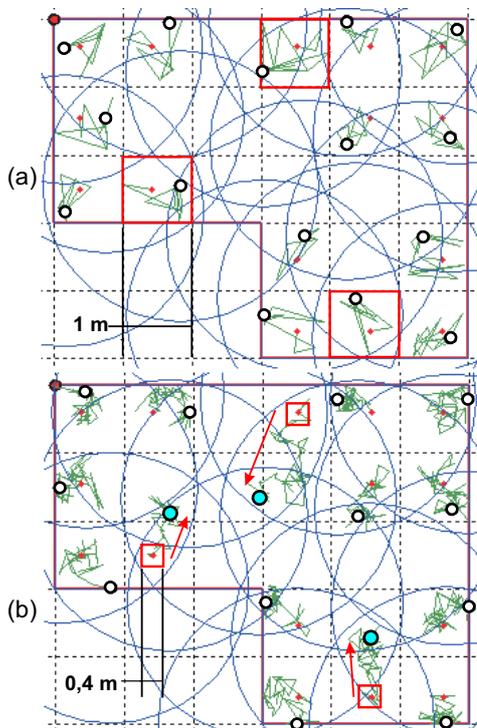


Figura 11: Resultados obtenidos en la prueba de optimización 2. a) Sin Eras, sin dirección de áreas y sin restricciones de búsqueda. b) Con Eras, con dirección de áreas y con restricciones de búsqueda.

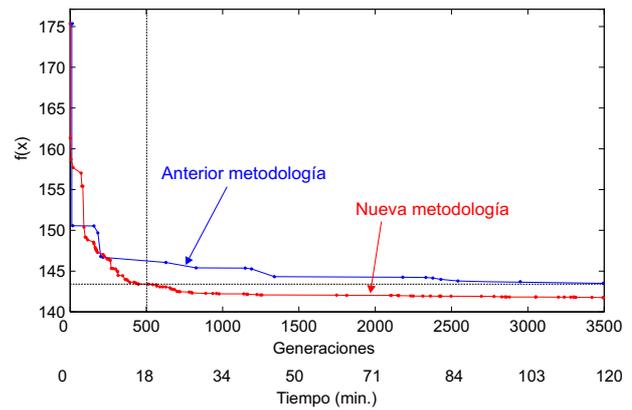


Figura 12: Comportamiento de la optimización en la prueba 2.

del costo computacional con respecto al método anterior. Con las mejoras realizadas se llega a valores en $f(x)$, que con el método sin mejoras se requiere de mucho más tiempo de proceso. En la figura 12 se muestra el comportamiento de la optimización en la prueba 2, en la línea de color rojo podemos ver que a los 18 minutos de proceso usando la nueva metodología, se llegó a un valor en $f(x)$ que con el anterior método requirió 120 minutos de proceso (línea de color azul).

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una nueva metodología heurística basada en un AG para optimizar la ubicación de balizas usadas en sistemas de localización de dispositivos móviles.

Se ha demostrado que un AG aplicado de forma iterativa sobre áreas pequeñas y móviles en el espacio de soluciones, para la optimización de la ubicación de balizas, permite obtener mejores resultados que aplicándolo de forma intensiva sobre áreas grandes y fijas.

Usando la información de la trayectoria que van recorriendo las balizas durante el proceso de optimización, con el fin de estimar una tendencia en la dirección de desplazamiento de las mismas, es posible reducir el tiempo de proceso del algoritmo. Esto se consigue, dando más prioridad a la búsqueda en las direcciones estimadas.

Conociendo malas configuraciones de direcciones de desplazamiento, evaluadas durante el proceso de optimización, es posible aplicar restricciones temporales a dichas configuraciones de direcciones de búsqueda, con el fin de evitar procesos que no aporten a la mejora de la solución.

8. TRABAJOS FUTUROS

Como trabajo posterior es importante estudiar otras metodologías de optimización, con el fin de hacer una evaluación comparativa entre métodos, tanto del comportamiento de la optimización durante los procesos como de las soluciones encontradas. Se plantea el estudio de otros métodos de optimización basados en diferentes conceptos de búsqueda, tal como Recocido simulado ó Búsqueda Tabú.

Observando las pruebas realizadas, vemos que las soluciones encontradas tienden a formar distribuciones simétricas. Se quiere analizar dichas simetrías, con el fin de determinar si aplicando un patrón deducido de estas soluciones, como distribución inicial, se pueden obtener buenos resultados sin necesidad de realizar procesos de optimización ó mejoren la etapa del pre-proceso.

Aunque en este trabajo los cálculos de optimización se aplican en un modelo de 3D, el desplazamiento de las balizas durante la búsqueda se hace solo en el plano Z_{bal} , por lo tanto se plantea como trabajo futuro la optimización en la ubicación de balizas haciendo movimientos en 3D, principalmente porque creemos que se obtendrán configuraciones que mejorarán las 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 and F. Seco. Precise localisation of archaeological findings with a new ultrasonic 3d positioning sensor. *Sensors and Actuators A*, pages 123–124, 2005.
- [3] 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.
- [4] J. Hightower and G. Borriello. Location systems for ubiquitous computing. *IEEE Computer*, 34 (8):57–66, 2001.
- [5] M. Hazas and A. Ward. A high performance privacy-oriented location system. *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCom2003)*, March:216–223, 2003.
- [6] 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.
- [7] David Sinriech and Shraga Shoval. Landmark configuration for absolute positioning of autonomous vehicles error analysis, model and solutions. *The world's Knowledge*, pages 563 – 574, 1999.
- [8] D. Sinriech and S. Shoval. Landmark configuration for absolute positioning of autonomous vehicles. *IIE Transactions*, 32:613–624, 2000.
- [9] D.Y. Oh and H.C. No. Determination of the minimal number and optimal sensor location in a nuclear system with fixed incore detectors. *Nuclear Engineering and Desing*, 152:197–212, 1994.
- [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 1–31.*, 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] Y.K. Kang, H.C. Park, and B. Agrawal. Optimization of piezoceramic sensor/actuator placement for vibration control of laminated plates. *AIAA Journal*, 36-9, 1998.
- [14] 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.
- [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. Gen and R. Cheng. *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, volume null of null. Wiley-Interscience New York (N.V.), 2000.