

# PRIMEROS RESULTADOS EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA UBICACIÓN DE BALIZAS PARA LOCALIZACIÓN UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Javier O. Roa, Antonio R. Jiménez, Fernando Seco, Carlos Prieto, Joao Ealo y Francisco Ramos  
{javiero, arjimenez, fseco, cprieto, jealo, frames}@iai.csic.es

Instituto de Automática Industrial - CSIC  
Ctra. Campo Real km. 0.2  
28500 La Poveda, Arganda del Rey (Madrid)

## Resumen

*La localización y guiado de dispositivos móviles en interiores, basada en técnicas de multilateración, donde la posición se calcula con base en la medición de un determinado número de distancias entre el punto de coordenadas desconocidas y marcas o balizas fijas ubicadas a su alrededor, es un área que cobra gran importancia en el estudio de entornos inteligentes. No obstante un aspecto fundamental que determina la obtención de resultados confiables con este tipo de sistemas de localización y sin utilizar demasiada infraestructura sensorial, es la correcta ubicación de un número mínimo de balizas. Este trabajo presenta una propuesta para optimizar parámetros como la ubicación y cantidad de balizas usadas en sistemas de localización de dispositivos móviles. El método propuesto se basa en la implementación de un método heurístico usado para realizar un pre-proceso y obtener las condiciones iniciales que posteriormente son entregadas a un algoritmo genético (AG) encargado de la optimización.*

**Palabras Clave:** Algoritmos genéticos, Optimización, ubicación de balizas, Localización, multilateración, Dilución de la precisión.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente es muy común encontrar dispositivos comerciales de localización que funcionan bajo el sistema de posicionamiento global (GPS). La masificación de estos dispositivos móviles se debe en parte a la miniaturización a gran escala y a la capacidad de procesamiento que podemos encontrar actualmente en los procesadores, esto sumado a la compleja plataforma tecnológica y a la constelación de satélites artificiales desarrollados para tal propósito hacen que el GPS sea actualmente la mejor solución para localización en exteriores. Sin

embargo, para localización en espacios interiores como casas, edificios, plantas industriales, etc., aún no se cuenta con un sistema definitivo que solucione todos los inconvenientes de precisión, robustez, escalabilidad, fácil instalación, capacidad de auto calibración, bajo consumo, tamaño de dispositivos, coste, privacidad, etc., que se presentan cuando se plantea un sistema de localización en interiores. Desde un enfoque similar al funcionamiento del GPS, se han desarrollado varios sistemas que buscan la localización en interiores basada en técnicas de multilateración donde la posición es calculada con base en la medición de las distancias que hay entre el dispositivo móvil y balizas ubicadas a su alrededor, como Active Bat, Cricket, Hexamine, 3D-Locus, etc., [2]. 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. En [9] se realizó un estudio de las técnicas y métodos de multilateración más nombrados en la literatura (Algebraico, Pseudo-inversa, Linealización por Taylor, entre otros), en él se muestra el comportamiento de los diferentes métodos ante condiciones geométricas desfavorables entre el dispositivo móvil y las balizas, que en el peor de los casos hacen que se presenten singularidades en el proceso de cálculo de la posición y como consecuencia no se encuentra solución en determinadas situaciones, o en otros casos dichas condiciones geométricas hacen que el factor conocido como dilución geométrica de la precisión (GDOP de las siglas en inglés Geometric Dilution Of Precision) aumente considerablemente y las estimaciones estén muy alejadas de la posición real del dispositivo.

Se podría pensar que situaciones como que las balizas estén alineadas o próximas a estarlo, que se encuentren en posiciones que generen distancias iguales al móvil, o que la posición real del móvil esté alejada del grupo de balizas que cubren esa zona, son fáciles de detectar a simple vista. Sin embargo, en la práctica, ante un área grande con una periferia

irregular, donde se requiere gran número de balizas para cubrir completamente la zona con determinadas condiciones de cobertura, el problema no es tan trivial. Por lo tanto, un aspecto muy importante en el diseño de un sistema de localización en interiores, más que el método o la técnica implementados en la solución, es conocer la correcta ubicación de las balizas en el entorno de trabajo y la cantidad mínima requerida que garantice la cobertura necesaria para poder realizar los cálculos de multilateración, obteniendo resultados confiables en todos los puntos del área de trabajo. En este caso decimos que el sistema es utilizable.

Se han publicado varios trabajos relacionados con la ubicación óptima de balizas, aplicados a diferentes necesidades. Deog Y. Oh en 1994 [7] publica un trabajo donde se aplica un algoritmo numérico para buscar la mejor posición y el mínimo número de sensores en un reactor nuclear, el proceso inicia con una distribución estimada según un análisis de sensibilidad. El mínimo número de balizas está determinado por la observabilidad del límite de error admisible. Bor T. Wang en 1994 [3] y Young K. Kang en 1996/98 [18-19] presentaron trabajos donde se busca la localización óptima de actuadores piezoeléctricos en una lámina vibratoria para reducir el sonido captado por unos micrófonos sensores. Aunque estos trabajos tienen aplicaciones muy alejadas del tema principal de este estudio, nos dan una idea de la metodología y parámetros usados para la optimización en la ubicación de balizas.

Por otra parte Nirupama Bulusu desde el año 2000 al 2002 [11-13] presentó una serie de publicaciones donde se proponen tres métodos para ubicar balizas adicionales, llamados Random, Max y Grid, buscando maximizar las ganancias obtenidas, además propone dos algoritmos de auto-configuración de balizas llamados Heap y Strobe, aplicados a diferentes casos de densidad de balizas. Como consecuencia del tipo de aplicación, la filosofía de estos métodos es el aumento en la densidad de balizas de forma sistemática hasta obtener niveles de error aceptables. Para nuestro caso puede representar una desventaja, desde el punto de vista del costo del sistema, el ubicar balizas con estos métodos pudiendo obtener los resultados deseados basándonos en la optimización de la distribución del mínimo número de balizas.

Un trabajo que se acerca más a nuestro problema es presentado por Shraga Shoval y David Sinriech en una serie de publicaciones que van desde el año 1995 al 2001 [5, 6, 15-17]. En el se llega a un algoritmo heurístico que busca optimizar la posición de balizas en 2D y el mínimo número de ellas, para cubrir en una trayectoria determinada, los puntos críticos donde un robot móvil requiere exactitud y precisión

en su localización. Aunque este método busca optimizar parámetros que son de nuestro interés, tiene la desventaja que solo busca la cobertura de puntos específicos establecidos como importantes en la trayectoria del robot y su filosofía no está concebida para solucionar el problema en donde se requiera cobertura total de un área determinada.

Sharon L. Padula en 1999 [14] realizó un estudio de estrategias de optimización para la ubicación de sensores y actuadores, en él se hace referencia a varios trabajos agrupándolos por el método de solución, donde principalmente se encuentran los AG, la búsqueda aleatoria probabilística, la búsqueda tabulada, la programación no lineal, entre otros. Figueroa y Mahajan [8] realizaron un estudio para encontrar la correcta ubicación de balizas en el espacio de trabajo, ellos plantean una solución basada en un método analítico. Sin embargo el hecho que el problema planteado busque resolverse para toda un área determinada sin que importe la posición real del móvil, cumpliendo con ciertos límites de error y cobertura, hace que métodos de optimización analíticos no sean apropiados debido a la complejidad del problema. La tendencia para abordar este tipo de problemas no lineales son los AG [1, 4, 10, 17, 20], por lo tanto pensamos que un método basado en esta capacidad de los AG es una buena opción para abordar un primer acercamiento a la solución. En este trabajo en la sección 2 presentamos el objetivo principal con base en la optimización de una serie de parámetros que definiremos de interés. Después se hace el planteamiento del problema definiendo aquellos parámetros fijos que describen el problema concreto a resolver. Posteriormente en las secciones 4 y 5 se describe el funcionamiento de las dos partes principales que conforman el algoritmo propuesto. En la sección 6 se muestran algunos resultados preliminares del método y por ultimo en las secciones 7 y 8 presentamos las conclusiones del trabajo así como el planteamiento de posibles mejoras para un trabajo posterior.

## 2. OBJETIVOS

Con el algoritmo propuesto se pretende desarrollar una herramienta, que tiene el objetivo principal de entregar en la solución el listado de coordenadas  $\{\{X_i\}, \{Y_i\}, \{Z_i\}\}$  de balizas, con  $i=1\dots N$ , siendo  $N$  el número de balizas usadas en la solución. La ubicación de estas balizas es la respuesta a un proceso que busca optimizar los siguientes parámetros:

**Minimizar el número de balizas:** Para un área determinada obtener el número mínimo de balizas necesarias para tener el cien por ciento de cobertura, con un número especificado de balizas mínimas visibles en todos los puntos del área de trabajo.

**Maximizar la cobertura en el área de trabajo:** Hallar la configuración de balizas que dan la máxima cobertura cumpliendo con los demás parámetros.

**Maximizar el porcentaje de área con DOP admisible:** La dilución de la precisión en toda el área debe mantenerse bajo ciertos niveles, para garantizar la buena geometría y por tanto buenas condiciones para la estimación de la posición del móvil.

**Minimizar los puntos de singularidad:** La ubicación de las balizas no debe generar zonas de no solución, debidas a singularidades en el cálculo matemático, tal como balizas alineadas.

Por lo tanto, el algoritmo propuesto busca configuraciones de balizas cuya ubicación permita obtener resultados de posición confiables al realizar los cálculos de multilateración, libres de singularidades, con poca dilución de la precisión y manteniendo la cobertura deseada. Se basará en la implementación de un método heurístico encargado de hacer un pre-proceso para obtener las condiciones iniciales que posteriormente serán dadas al AG encargado de la optimización.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En entornos como naves industriales, edificios de oficinas o cualquier tipo de área donde se necesite implementar un sistema de localización de dispositivos móviles, que pueden ser instalados en robots para desplazarse de forma autónoma y realizar las tareas programadas o ser llevados por personas como pequeños aparatos de localización, es fundamental determinar primero las características del área y la cobertura deseada donde se implementará el sistema, con el fin de establecer los parámetros iniciales que definen el funcionamiento del algoritmo. Por lo tanto, en nuestro caso primero definimos el área por donde se desplazará el móvil y el área donde se podrán ubicar las balizas. Luego conociendo la altura del móvil y determinando la altura a la que se ubicarán las balizas, es posible conocer el radio de cobertura de cada baliza con base en las características del lóbulo de emisión. Entonces el problema consiste en encontrar la ubicación del menor número de balizas posibles, para tener cobertura en toda el área de trabajo con buenas condiciones geométricas para hacer los cálculos de multilateración, garantizando un sistema utilizable en toda el área de trabajo. A continuación se describen los parámetros que definen el problema.

#### 3.1. Áreas de trabajo y de ubicación de balizas

Se determinó especificar dos tipos de áreas en el proceso. En la figura 1 el área de color amarillo corresponde a la zona de trabajo por donde el móvil

se podrá desplazar, por lo tanto es el área donde importa optimizar los parámetros mencionados en la sección 2. El área cuadrículada corresponde al área, donde las balizas pueden ser ubicadas. Aunque estás dos áreas, dado el caso, pueden ser la misma, se dejó la posibilidad de diferenciarlas, con el fin de representar casos donde el móvil se desplaza por áreas limitadas con obstáculos o paredes pero su altura no alcanza a afectar el área de posible ubicación de balizas o casos donde el área de ubicación de balizas está limitada por falta de infraestructura que permita soportarlas, sin que esto afecte el área por donde puede desplazarse el móvil.



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

#### 3.2. Altura de balizas

Con el objetivo de acotar el problema, en este primer prototipo, en el algoritmo se limitó la coordenada  $Z$  a un valor fijo llamado  $Z_{bal}$ , para así concentrar el proceso en optimizar la posición de las balizas sólo en las coordenadas  $X$  e  $Y$ , sin embargo el planteamiento y la estructura del mismo se establece de forma tal que en un trabajo posterior el proceso de optimización se pueda extender sistemáticamente a las tres coordenadas. En la figura 2 se ilustra este parámetro.

#### 3.3. Altura del móvil

Este parámetro se establece como el valor máximo en la coordenada  $Z$  que puede alcanzar el móvil en toda el área de trabajo, puesto que las balizas tienen un determinado ángulo de apertura en el lóbulo de cobertura y en condiciones balizas arriba (techo) móvil abajo (suelo), se debe establecer un valor ( $Z_{mov}$ ) de corte en  $Z$  donde los lóbulos están presentes. En la figura 2 se ilustra este parámetro.

#### 3.4. Radio de cobertura

Éste es un parámetro que se establece de acuerdo a las características de emisión y recepción de los transductores seleccionados y a la altura de las balizas y del móvil. Siendo  $r$  el radio de la

circunferencia formada por el corte del lóbulo de las balizas con el plano  $XY$ , a la altura máxima que estará el móvil. Como este trabajo está orientado para ser aplicado en sistemas de localización que usan balizas de ultrasonido, se determinó obtener el radio de cobertura teniendo en cuenta un modelo que nos aproxime a la cobertura real de cada baliza contemplando la reducción de la potencia de la señal (Sound Pressure Level - SPL) recibida en el móvil en función de algunos factores importantes como la atenuación por distancia, atenuación por directividad del receptor y del transmisor, atenuación por adsorción del medio y por la frecuencia de emisión. El radio de cobertura está dado por la expresión:

$$r = (Z_{bal} - Z_{mov}) \times \tan(\theta) \quad (1)$$

Donde,  $r$ : Radio de cobertura.  
 $Z_{bal}$ : Altura de las balizas.  
 $Z_{mov}$ : Altura del móvil.  
 $\theta$ : Angulo de cobertura, en función del SPL mínimo requerido en el móvil, (ver apéndice A).

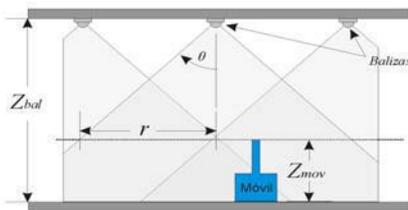


Figura 2: Parámetros que definen: Altura de las balizas, altura del móvil y radio de cobertura de los lóbulos de emisión.

## 4. PREPROCESADO

Como se mencionó en la sección 2, el algoritmo propuesto se basa en la unión de un pre-proceso heurístico y un AG. El pre-proceso determina las condiciones iniciales del AG y tiene dos etapas, la primera se encarga de seleccionar el tipo de distribución de balizas y su densidad, la segunda etapa se encarga de reducir cobertura redundante. A continuación se describen estas etapas.

### 4.1. Etapa 1 del pre-proceso

Esta parte del proceso consiste en seleccionar el tipo de distribución cuadrada y variar gradualmente la densidad de las balizas hasta obtener la cobertura deseada, luego cambiar al tipo de distribución triangular (los tipos de distribución se describen más adelante) y hacer el mismo proceso, con el fin de comparar y seleccionar el tipo de distribución y densidad de balizas que ofrecen la cobertura deseada con la menor cantidad de balizas posible. En la figura 4 se muestra el diagrama del proceso.

### 4.1.1. Distribución inicial de balizas

Algunos métodos determinan la distribución inicial de balizas de forma aleatoria [14], acá se han establecido dos tipos de distribución inicial, triangular (o panel de abeja) y cuadrada, con el fin de reducir la búsqueda del algoritmo y por tanto el tiempo de convergencia. En la figura 3 se muestran los dos tipos posibles de distribución inicial de balizas.

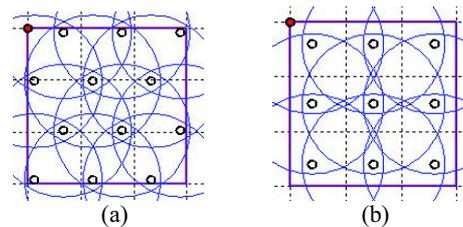


Figura 3: Tipos de distribución de balizas. a) Cuadrada, b) Triangular.

### 4.1.2. Densidad inicial de balizas

De acuerdo al tipo de distribución seleccionado, este parámetro define la distancia que hay entre balizas y por tanto la cantidad inicial de ellas, que para el área de trabajo cumple con los requerimientos de visibilidad definidos por el usuario (número de balizas visibles cada punto del área de trabajo).

## 4.2. Etapa 2 del pre-proceso

El objetivo principal de esta etapa consiste en reducir la cobertura redundante, sin que se pierda la cobertura deseada. El proceso consiste en ir eliminando 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. En la figura 5 se muestra este proceso.

## 5. ALGORITMO GENÉTICO

Un AG es un proceso iterativo que consiste en generar de forma aleatoria un grupo de posibles soluciones, llamados población, luego darles un valor de aptitud con una función de evaluación en base a criterios de aceptabilidad definidos en el estudio del problema, posteriormente seleccionarlos y cruzarlos de acuerdo a los operadores de selección y cruce definidos para el AG, de tal forma que se creen nuevas generaciones de individuos que puedan ser más aptos que los antiguos, hasta encontrar una solución aceptable en la optimización del problema. En esta sección se describe la estructura interna del AG. En la figura 6 se muestra este proceso.

5.1. ENTRADAS DEL AG

La terminología usada en los procesos de optimización con AG, establece una analogía con los términos utilizados en el contexto biológico en el cual están basados [10]. A continuación se describen los utilizados en el algoritmo propuesto:

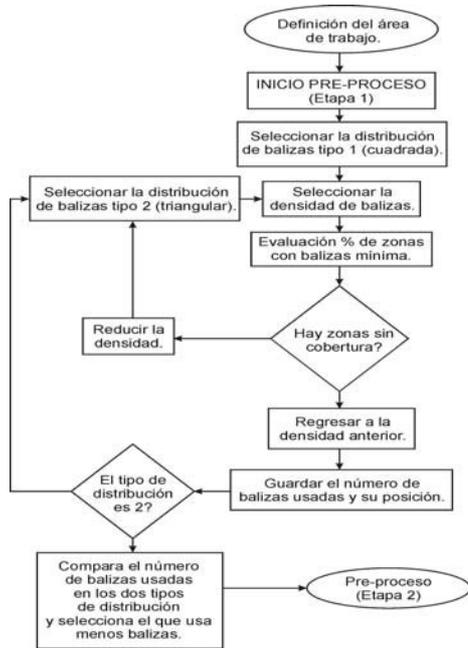


Figura 4. Diagrama de flujo del pre-proceso (etapa 1) Selección del tipo de distribución y la densidad.

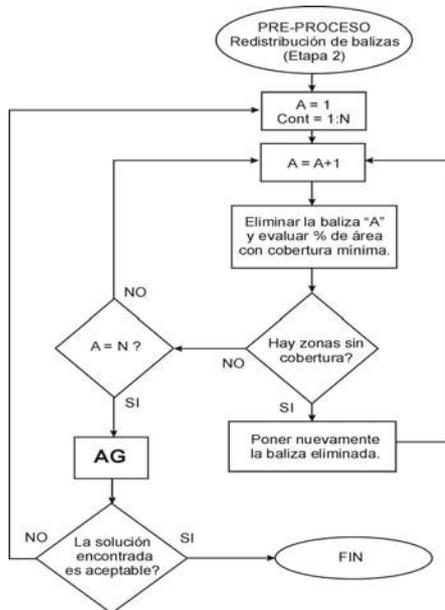


Figura 5. Diagrama de flujo del pre-proceso (etapa 2) Eliminación de redundancia.

5.1.1. Individuos

Cada individuo es una posible solución del problema. Comúnmente se representa por una cadena de bits, sin embargo, según el planteamiento del problema a resolver, también se puede representar por secuencias de números, tal como se ha determinado en nuestro caso. En la tabla 1 se muestra una posible conformación de un individuo.

Tabla 1: Posible conformación de un individuo.

Nº Ind.	Gen 1	Gen 2	Gen 3	Gen 4	Gen 5	Gen 6	Gen 7
1	23	2	13	1	8	15	21

En el ejemplo anterior se muestra un individuo conformado por ocho números, el primer número de la cadena indica el número del individuo, que es diferente para todos. La longitud de la cadena de números que le sigue puede variar de acuerdo al área de trabajo y a la cobertura deseada en la solución. Esto es debido a que cada casilla corresponde a una baliza de una determinada configuración (posible solución). A estas casillas en adelante las llamaremos genes, y el número en sí 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 siete genes, donde el primer gen ocupa la posición 23, el segundo gen en la posición 2 y así sucesivamente hasta el último.

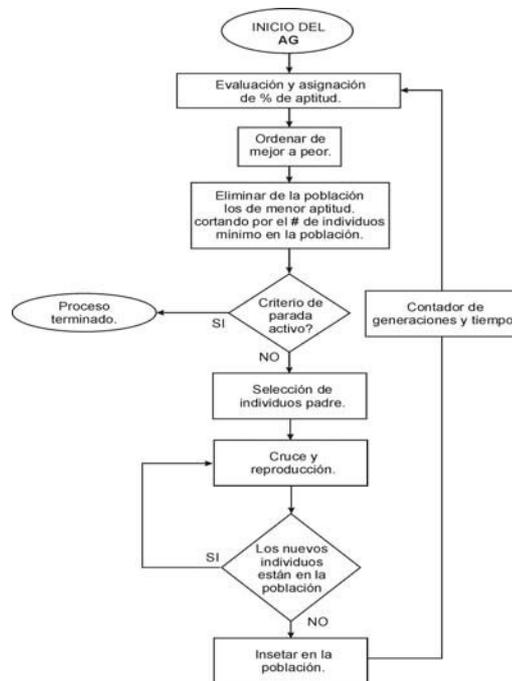


Figura 6. Diagrama de flujo del AG.

**5.1.2. Genes**

Como se mostró en la descripción del individuo, los genes son la cadena de números que representan al individuo. Cada gen posee un valor que representa su posición en el espacio de coordenadas *XY*. La cantidad de posiciones posibles para un gen es *n*. Este valor se determina de acuerdo a las dimensiones del área de trabajo y del radio de cobertura de las balizas. Para propósitos de implementación del algoritmo, el valor de *n* se dejó en 100 considerando que es un número aceptable por exceso y las coordenadas son generadas de forma aleatoria en un área de 1x1 metro con centro en la posición original de la baliza, sin embargo queda por estudiar la mejor selección de estos valores. En la figura 7 se muestran dos genes y las posibles posiciones que pueden tomar para representar un individuo.

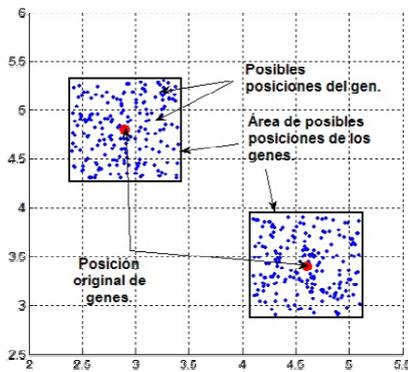


Figura 7. Área de posibles posiciones discretas de los genes del individuo.

**5.1.3. Población inicial**

Al iniciar el proceso se genera un determinado número de individuos, la conformación de este grupo de posibles soluciones se conoce como población inicial. Posteriormente, al generarse nuevos individuos que de acuerdo a sus características se pueden clasificar como no aptos o aptos, son eliminados o agregados a dicha población. Para este caso se determinó mantener las dimensiones de la población constante, con el fin de no aumentar el coste computacional del proceso con individuos que muy posiblemente no tengan una aportación considerable en la solución. La conformación de la población se puede representar mediante la siguiente matriz.

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

Donde:

*m*: Es el número de individuos de la población. El número de individuos *m* de la población se determina de forma empírica de acuerdo a las dimensiones y la complejidad del área que se desea cubrir.

*n*: Es el número de genes de cada individuo. El número de genes estará determinado por la cantidad de balizas que deben ser visibles en cada punto del área de trabajo y del radio de cobertura de las balizas.

*Rd*: Son valores aleatorios entre 1 y el número de posiciones posibles para un gen (que en nuestro caso es de 100), que representan la posición del gen en el espacio *XY*.

**5.2. FUNCIÓN DE EVALUACIÓN**

Este es el paso más crítico del desarrollo del AG, establecer un valor de evaluación para cada individuo, se hace a través de una función de evaluación que se aplica a todos los individuos. Este proceso permite encontrar el individuo más capacitado o apto para ser seleccionado y cruzarse, y por lo tanto lleva a la solución del algoritmo. Si una función de evaluación es mal asignada, es poco probable llegar a una buena solución [20]. De acuerdo al estudio realizado en [2], se han seleccionado algunos parámetros, para ser usados como características del individuo, que servirán para evaluarlos y de acuerdo al valor que le asigne la función de evaluación determinar si son aptos o no para entrar y competir en la población. Estos parámetros son:

- A*: Porcentaje de área de trabajo sin la cobertura especificada.
- Ps*: Cantidad de puntos singulares en el área.
- DopM*: Porcentaje de área con DOPs mayores al deseado.
- CRd*: Porcentaje de área con cobertura redundante.
- DopMx*: Valor de DOP máximo encontrado en el área de trabajo cubierta.

De acuerdo a los anteriores parámetros, la función evaluación que se propone en este caso es:

$$F_{(EVAL)} = \frac{(A)^8 + (Ps)^3 + (DopM)^2 + (CRd) + (DopMx)^2}{1 \times 10^6} \quad (3)$$

Los exponentes de cada valor se seleccionaron de forma empírica, teniendo en cuenta el nivel de castigo que se le quiso dar a un individuo que aumente en determinado parámetro. Así el individuo que al ser evaluado tenga la función de evaluación con menor valor será el mejor de la población.

### 5.3. OPERADORES DEL AG

Con una población, a la cual se ha aplicado la función de evaluación, se procede a aplicar algunos de los diferentes operadores de AG, para este estudio se determinó usar el operador de selección de individuos tipo ruleta y los operadores de cruce tipo disperso, un punto de corte y dos puntos de corte.

#### 5.3.1. Operador de Selección

El primer proceso que se aplica es el de selección, este permite seleccionar los individuos padres reproductores, la probabilidad de ser seleccionados es proporcional a su aptitud o adaptación. Cada individuo posee un valor de evaluación propio, que no tiene que ser diferente al de los demás. En esta aplicación los individuos padres que se van a cruzar son seleccionados mediante el método de la ruleta. Este método consiste en darle un valor porcentual inversamente proporcional a su valor en la función de evaluación, así el individuo con menor valor de evaluación en la población tendrá la mayor tajada en la torta de porcentajes, y por tanto mayores posibilidades de ser seleccionado.

En la aplicación implementada se dejó abierta la posibilidad de seleccionar el número de individuos padres, por lo tanto de forma cíclica el algoritmo genera un valor aleatorio de 1 a 100, selecciona el individuo que el rango de su parte porcentual contiene el valor generado, hasta tener la cantidad de individuos padres deseados.

#### 5.3.2. Operadores de Cruce

Este mecanismo se usa para cruzar a los individuos padres candidatos para formar nuevos individuos, que en caso tal de superar a los existentes en la población, entran a formar parte de esta, desplazando a los menos aptos, formando una nueva generación. Busca extraer características de un individuo bueno e insertarlas en otro individuo que aunque no sea tan bueno debido a algunos malos genes, posiblemente mejore sustancialmente con los nuevos genes insertados.

En la implementación del algoritmo se estableció como regla de inserción, no insertar individuos hijos que ya existan en la población, principalmente porque se puede presentar el caso de llegar a tener iguales a todos los individuos de la población y no permitan la convergencia del algoritmo, además de no tener información redundante, que de ser mala no aportará a la solución y de ser buena basta con un solo individuo, pues con el método de selección propuesto sus genes tendrán más posibilidades de combinarse.

- **Cruce disperso**

Este tipo de cruce consiste en generar un vector binario aleatorio de igual dimensión a la cantidad de genes de un individuo. Luego seleccionar los elementos del padre 1 correspondientes a los unos del vector y los elementos del padre 2 correspondientes a los ceros del vector y formar un individuo hijo manteniendo el orden en las posiciones. Usando la lógica inversa se obtiene el segundo individuo hijo. En la figura 8a se muestra el proceso descrito.

- **Cruce por un corte**

En este caso se selecciona un número al azar entre 1 y la cantidad de genes de los individuos, se dividen los vectores de genes de los dos individuos padres, tal que de cada uno se obtengan dos partes, siendo la primera parte los genes desde el 1 hasta el gen de corte inclusive y la segunda parte los genes desde el gen de corte mas uno al ultimo, posteriormente la parte 1 del padre 1 se enlaza con la parte 2 del padre 2 y la parte 1 del padre 2 se enlaza con la parte 2 del padre 1, generando así los dos individuos hijos. En la figura 8b se observa el proceso descrito.

- **Cruce por dos cortes**

Consiste en seleccionar dos números al azar entre 1 y la cantidad de genes de los individuos, extraer de los vectores de genes de los dos individuos padres, los genes correspondientes desde el punto de corte uno al punto de corte 2, luego insertar los genes extraídos del padre 1 en el padre 2 y los genes del padre 2 en el padre 1. En la figura 8c se muestra este proceso.

### 5.4. CRITERIO DE PARADA

En AG la búsqueda de la solución se puede prolongar indefinidamente, ya sea porque se llegó a una solución muy aceptable y las mejoras que se pueden dar posteriormente son despreciables o porque se llegó a un individuo inmejorable y sin embargo el proceso busca mejorarlo. Por lo tanto es necesario establecer los criterios de parada que determinan la convergencia del algoritmo. En este trabajo se han determinado cinco criterios de parada, que son:

**Por generación:** Si se llega a un número máximo de generaciones determinado por el usuario.

**Por tiempo:** Si el algoritmo cumple un tiempo máximo de proceso determinado por el usuario.

**Por valor de evaluación:** Si se encuentra un individuo con un valor en su función de evaluación igual o menor al valor determinado por el usuario.

**Por número de generaciones sin mejorar:** Si un individuo se mantiene como el mejor por una cantidad determinada de generaciones.

**Por tiempo sin mejorar:** Si un individuo se mantiene como el mejor por una cantidad de tiempo determinada.

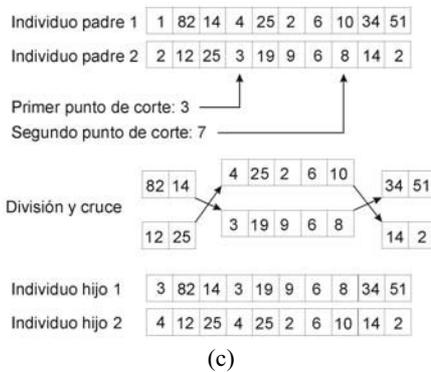
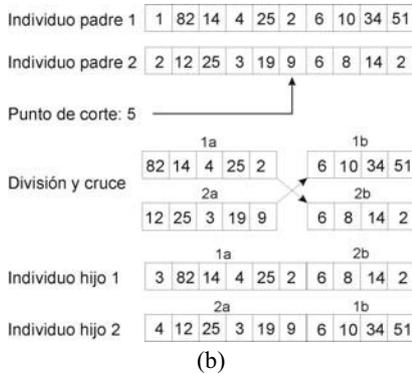


Figura 8. Ejemplos de tipos de cruce entre individuos padre. a) Disperso, b) Un corte, c) Dos cortes.

**5.5. SALIDA DEL AG**

Cuando el proceso termina por alguno de los criterios de parada mencionados, la salida del algoritmo es solo un individuo, donde cada uno de sus genes contiene la posición XY de una baliza en el espacio de coordenadas. La ubicación de todas las balizas de acuerdo a la posición de su gen, presentará la mejor configuración de balizas encontrada por el algoritmo, de acuerdo a los criterios de evaluación establecidos.

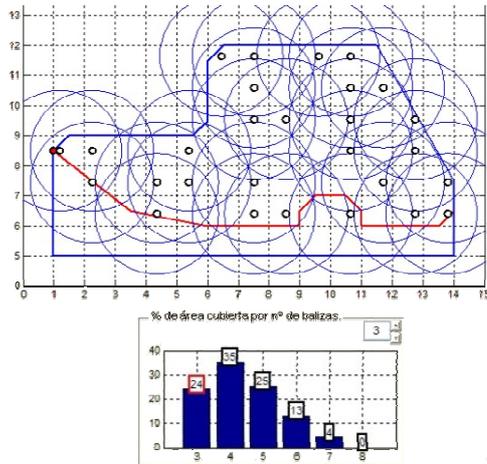
**6. RESULTADOS**

En esta sección se muestran dos pruebas donde se evidencian dos tipos de mejoras que se pueden obtener con el método propuesto. En las dos pruebas se definieron los siguientes parámetros: visibilidad mínima de tres balizas ya que es el mínimo número necesario para trilaterar, cobertura mínima = 99%,  $Z_{bal} = 4m.$ ,  $Z_{mov} = 2m.$ ,  $r = 2m.$

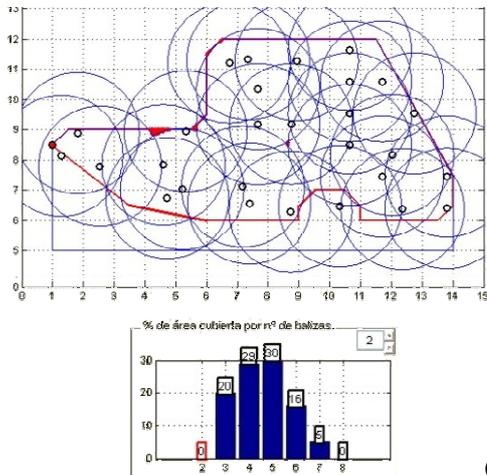
En la primera prueba se definió un área de trabajo con forma irregular. En la figura 9a se observa el resultado obtenido después de aplicar el pre-proceso, en este caso fueron necesarias 28 balizas para tener el 100% de cobertura, en el histograma se observa que se tiene aprox. el 76% de cobertura redundante. Posteriormente se aplicó el AG y en el histograma de la figura 9b se puede ver que el porcentaje de cobertura redundante aumento aprox. un 4%, aunque este valor parece poco significativo, si observamos las columnas correspondientes a los porcentajes de área con visibilidad de 5, 6 y 7 balizas, vemos que han aumentado en un total de 9% aprox., como consecuencia de este aumento en la redundancia, se consigue por una parte que en esas áreas se puedan realizar los cálculos de multilateración con más precisión y robustez y por otra parte se puede optar por ejecutar nuevamente el algoritmo, de tal modo que aprovechando esta redundancia se puedan eliminar balizas manteniendo la cobertura deseada. También vemos que después de aplicar el AG existe aprox. un 0.4% de área donde solo hay dos balizas visibles (primera columna), esta falta de cobertura se presentó debido a que el parámetro inicial de cobertura mínima se definió en 99%.

En la segunda prueba se definió un área de trabajo cuadrada de 4x4 metros, En la figura 10a se muestra el resultado obtenido luego de aplicarse el pre-procesado. Vemos que en cada uno de los lados del área hay zonas donde no es posible hacer una estimación en la posición del móvil, debido a que la ubicación de las balizas genera singularidades en el cálculo. En la figura 10b se muestra el resultado obtenido luego de aplicarse el AG. En este caso se han eliminado las zonas singulares, lo cual es una gran mejoría, además nuevamente la cobertura redundante aumentó obteniéndose las ventajas mencionadas en la prueba anterior.

Los resultados presentados en esta publicación obedecen a pruebas preliminares del método, por lo tanto se pueden obtener mejorías, puesto que la función de evaluación mostrada en la ecuación (3) está en proceso de afinamiento. No obstante las pruebas realizadas muestran que el método propuesto es una herramienta que puede ser de gran ayuda en la búsqueda de la correcta ubicación y cantidad de balizas necesarias para abarcar un área determinada.



(a)



(b)

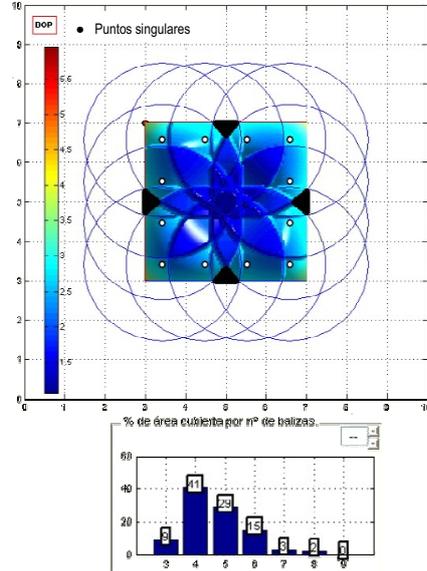
Figura 9. Prueba 1: Resultados del porcentaje de área con número de balizas disponibles para multilaterar (histograma). a) Resultado del pre-proceso, b) Resultado después de aplicar el AG.

### 7. CONCLUSIONES

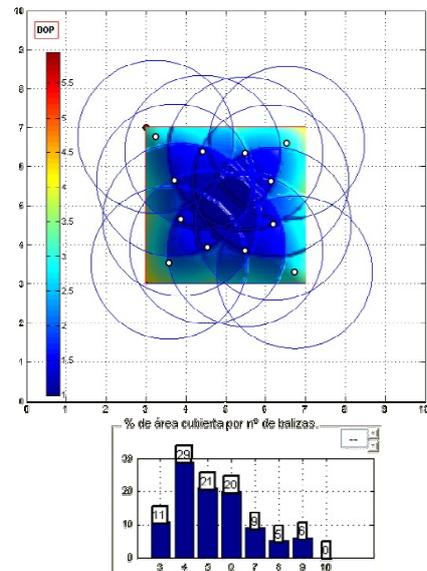
En este trabajo se ha presentado un método como propuesta para aplicarse en la optimización del posicionamiento correcto de balizas y la cantidad mínima necesaria, para obtener la cobertura deseada en un área de trabajo determinada.

Para el problema planteado la optimización del AG puede ser enfocada a mejorar determinado parámetro de la función de evaluación, esto hace que se convierta en una función de compromiso entre varias características de una solución, que deben ser balanceadas para encontrar el equilibrio que nos proporcione la solución más conveniente. Por lo tanto los resultados mostrados son pruebas preliminares del método, que aunque las soluciones no fueron mínimos globales, situación difícil de encontrar ya que pueden existir muchas soluciones

validas muy similares, permiten evidenciar que el método propuesto es una herramienta útil en la tarea de encontrar la configuración de balizas que puede resolver la cobertura deseada en un área determinada.



(a)



(b)

Figura 10. Prueba 2: Resultados del porcentaje de área con número de balizas disponibles para multilaterar (histograma) y valores de DOP (colores). a) Resultado del pre-proceso, b) Resultado después de aplicar el AG.

### 8. TRABAJOS FUTUROS

Actualmente se esta profundizando en el estudio de la función de evaluación que permita la mayor optimización con un coste computacional que no se vea afectado por el número de generaciones que se

necesiten en el proceso. Por otra parte es necesario determinar cuales son los valores más adecuados para el número de individuos de la población inicial, el número de posibles posiciones de cada gen y el tamaño del área alrededor del gen donde se generen dichas posiciones, que conduzcan al mejor comportamiento del algoritmo.

Como trabajo posterior es importante estudiar otras metodologías de optimización, con el fin de contrastar los resultados y de ser posible proponer nuevos métodos basados en la fusión de las diferentes estrategias estudiadas y variantes o modificaciones del algoritmo propuesto.

Además, como en este trabajo se planteó la búsqueda de la ubicación de las balizas solo en el plano *XY*, con el fin de acotar el problema, un trabajo posterior consistirá en expandir el proceso a una búsqueda en tres dimensiones, gracias a que la estructura planteada en el proceso permite realizarlo sistemáticamente.

#### Referencias

[1] A. Mahajan, P.K. Ray. A genetic algorithm based approach to calculate the optimal configuration of ultrasonic sensors in a 3d position estimation system. *Robotics and Autonomous Systems*, 41:165–177, 2002.

[2] A.R. Jiménez, F. Seco, C. Prieto, J. Roa. Tecnologías sensoriales de localización para entornos inteligentes, I Congreso español de informática - Simposio de Computación Ubicua e Inteligencia Ambiental, UCAMi2005 (Granada), -, pp.: 12, 2005

[3] B.T. Wang, R.A. Burdizzo, C.R. Fuller, Optimal Placement of Piezoelectric Actuators for Active Structural Acoustic Control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, 67-77 – January 1994.

[4] D.K. Liu, Y.L. Yang, Q.S. Li, Optimum positioning of actuators in tall buildings using genetic algorithm, *Computers and Structures* 81, 2823-2827, 2003.

[5] D. Sinriech, S. Shoval. Landmark configuration for absolute positioning of autonomous vehicles error analysis, model and solutions. *The world's Knowledge*. 563-574, 1999.

[6] D. Sinriech, S. Shoval. Landmark configuration for absolute positioning of autonomous vehicles. *IIE Transactions*. 32, 613-624, 2000.

[7] D.Y. Oh, H.C. No, Determination of the minimal number and optimal sensor location in a nuclear

system with fixed incore detectors. *Nuclear Engineering and Design* 152, 197-212, 1994.

[8] F. Figueroa, 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.

[9] J. Roa, A.R. Jiménez. Localización 3d mediante balizas activas: Teoría y código en matlab. Internal Report SAM group, IAI-CSIC, Spain, null:1–80, 2004.

[10] M. Gen, R. Cheng, *Genetic Algorithms & Engineering Optimization*, A Wiley Interscience publication, 2000.

[11] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin. GPS-less Low Cost Outdoor Localization For Very Small Devices. University of Southern California / Information Sciences Institute, 1-7, 2000.

[12] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin. Adaptive Beacon Placement. *Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing Systems*, Phoenix, Arizona, April 2001.

[13] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin. Self-Configuring Localization Systems: Design and Experimental Evaluation. *ACM Transactions on Embedded Computer Systems*, Vol. TBD, No. TBD, TBD 20TBD, Pages 1–31. 2002.

[14] S.L. Padula, R.K. Kincaid. Optimization strategies for sensor and actuator placement. *NASA/TM-1999-209126*, null:1–12, 1999.

[15] S. Shoval, I. Zeitoun, E. Lenz. Layout of beacons for triangulation of AGV's in industrial environments. *The world's Knowledge*. 485-487, 1995.

[16] S. Shoval, I. Zeitoun, E. Lenz. Implementation of a Kalman Filter in Positioning for Autonomous Vehicles, and its Sensitivity to the Process Parameters. *The International Journal of Manufacturing Technology*. 13: 738-746, 1997.

[17] S. Shoval, D. Sinriech. Analysis of landmark configuration for absolute positioning of autonomous vehicles. *Journal of manufacturing Systems*; 2001; 20; 1; ABI/INFORM Global pg. 44, page 11, 2001.

[18] Y.K. Kang, H.C. Park, W. Hwang, K.S. Han, Optimum Placement of Piezoelectric Sensor/Actuator for Vibration Control of Laminated Beams, *AIAA Journal*, Vol. 34, No 9, September 1996.

[19] Y.K. Kang, H.C. Park, B. Agrawal, Optimization of Piezoceramic Sensor/Actuator Placement for Vibration Control of Laminated Plates, AIAA Journal, Vol. 36, No 9, 1998.

[20] Z. Michalewicz, D.B. Fogel, How to Solve it: Modern Heuristics, Springer, 2002.

## Apéndice A

### Obtención del ángulo de cobertura $\theta$ .

El ángulo  $\theta$  permite calcular el valor del radio de cobertura  $r$ , el valor de este ángulo se obtiene en función del  $SPL$  requerido en el receptor, por lo tanto  $\theta$  esta relacionado directamente con las características de direccionalidad del lóbulo de emisión y recepción de los transductores seleccionados, la distancia entre ellos, la frecuencia de transmisión y las condiciones del medio de propagación. De acuerdo con esto y debido a que los lóbulos de cada tipo de transductor son diferentes, conocer el valor de  $\theta$  para determinado  $SPL$ , se hace mediante la obtención del  $SPL$  en el receptor para un rango de valores discretos de 0.15 entre 0 y 80 grados (puesto que el valor de  $r$  tiende a infinito al acercarse  $\theta$  a 90 grados), posteriormente se toma como el ángulo de cobertura el valor de  $\theta$  correspondiente al  $SPL$  calculado que esta más próximo al deseado.

El  $SPL$  en el receptor se calcula mediante la expresión:

$$SPL_{RX} = 20 \times \log_{10} \left( \frac{V_{ent}}{V_{ref}} \right) + SPL_{ref} + At_{total}$$

siendo,

$V_{ent}$  : Voltaje de excitación del emisor.

$V_{ref}$  : Voltaje de referencia para el  $SPL_{ref}$ , según las características técnicas entregadas por el fabricante.

$SPL_{ref}$  :  $SPL$  de referencia, de acuerdo a la hoja de características dada por el fabricante.

$At_{total}$  : Atenuación total entre el emisor y el receptor.

Donde,  $At_{total} = At_{dist} + At_{abs} + At_{ang}$

$$At_{dist} = 20 \times \log_{10} \left( \frac{d_{ref}}{d} \right)$$

$$At_{abs} = -\alpha \times (d - d_{ref})$$

$$\alpha = 1.6^{-10} \times f^2$$

siendo,

$At_{dist}$  : Atenuación debida a la distancia entre emisor y receptor.

$At_{abs}$  : Atenuación por la absorción del medio.

$At_{ang}$  : Atenuación debida a la direccionalidad del emisor y el receptor, de acuerdo a las características de sus lóbulos.

$\alpha$  : Atenuación del aire.

$f$  : Frecuencia de excitación del transmisor.