

Localizador de Fuente Sonora basado en Red Inalámbrica de Sensores

Dainer Vásquez¹, Mayleen Escorcía² y Luis Torres³

Departamento de Ingenierías Eléctrica y Electrónica, Universidad del Norte

Km 5 Vía Pto. Colombia, Atlántico, Colombia

¹dmonroy, ²mayleene, ³ltorres@uninorte.edu.co

Abstract—This work describes the implementation of a wireless sensor network (WSN) to locate an acoustic source in two dimensions. The network is composed of three sensor nodes located at the corners of a right triangle; a fourth node in the vicinity of the array acts as a base station providing connection to a notebook; the acoustic source is assumed to be within the rectangular area defined by the three sensors. To detect the sound wave, an analogue circuit activated by sound intensity to cause a hardware interruption was designed and adapted to the nodes. The localization uses the method of the Time Difference of Arrivals (TDoA) of the sound wave to each node pair to build an equation system with three hyperbolic equations, and whose solution is the estimated location of the acoustic source. In this way, with the collected arrival times, an algorithm based on a numerical method is proposed to state and solve the equation system. The temporal error of the implemented WSN was below $10\mu\text{s}$, which allowed using TDoA. The localization errors found in experiments in open square environments were below 4%. Specifically, for a $10\text{m}\times 10\text{m}$ area, the worst case deviations are below 44cm for the 90% of the measurements. Finally, the WSN was implemented with IRIS nodes (2.4GHz), programmed with TinyOS, and the central localization application was done in Java.

Resumen—El presente trabajo describe la implementación de una red inalámbrica de sensores (WSN) para localizar una fuente sonora en dos dimensiones. La red está compuesta por tres nodos sensores ubicados en las esquinas de un triángulo rectángulo; un cuarto nodo en la proximidad del arreglo actúa como estación base proveyendo conexión a un computador portátil; se asume que la fuente sonora se encuentra en el área rectangular definida por los tres sensores. Para la detección de la onda acústica se diseñó y adaptó a los nodos un circuito analógico activado por intensidad sonora que causaba una interrupción por hardware al nodo. La localización utiliza la técnica de diferencia de tiempos de llegada (TDoA) de la onda sonora a cada pareja de nodos para construir un sistema de tres ecuaciones hiperbólicas, y cuya solución es la posición estimada de la fuente sonora. Se plantea un algoritmo que recopila los tiempos de llegada, plantea y resuelve el sistema mediante un método numérico. El error de sincronización temporal de la WSN implementada fue inferior a $10\mu\text{s}$, lo que permitió usar la técnica TDoA. Los errores de localización hallados en experimentos en entornos abiertos cuadrados están por debajo del 4%. Específicamente para un área de $10\text{m}\times 10\text{m}$, los errores de peor caso no sobrepasan los 44cm para el 90% de las mediciones. La WSN se implementó con nodos IRIS (2.4GHz) programados en TinyOS, y la aplicación central de localización se programó en Java.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes WSN son indispensables en aplicaciones tales como sistemas de monitoreo, defensa, vigilancia, robótica, automatización de procesos y asistencia en casos de desastres, debido a la capacidad de operar sin necesidad de

infraestructura y en entornos hostiles [1].

Una de las tareas que debe efectuar una red WSN en muchas de las aplicaciones en las que se utilizan, consiste en localizar una fuente sonora [2]. Para ello, es necesario desplegar varios sensores de tal forma que cada uno de ellos pueda captar dicha onda acústica y luego calcular la localización. Uno de los principales métodos empleados para esta tarea es el TDoA¹, el cual usa la diferencia de los tiempos de llegada de la onda acústica a cada pareja de nodos para localizar la fuente [3].

El uso de TDoA requiere la implementación de un hardware de captación para cada nodo sensor, y además una sincronización precisa de los relojes de cada nodo en la red.

Spiesberger en 2001 [4] encontró que empleando TDoA y usando solo tres sensores, pueden obtenerse soluciones ambiguas (dos soluciones válidas) para el problema de la localización de una fuente sonora en dos dimensiones (2D). En vista de esto, Spencer en 2010 [5] y Dong en 2014 [6] proporcionaron una solución analítica cerrada al problema de localización en 2D usando cuatro sensores. Sin embargo, si se limita el área de localización de la fuente sonora, los trabajos de Spiesberger [4] y Spencer [7] permiten obtener una solución única al problema de la localización en dos dimensiones empleando solo tres sensores y el método TDoA, siempre y cuando la red WSN sea estática y además se tenga la opción de escoger *a priori* las posiciones de los sensores.

Por tal motivo, la red WSN implementada que se describe en el presente trabajo, está compuesta por solo tres nodos sensores (la cantidad mínima necesaria) ubicados en las esquinas de un triángulo rectángulo. Además, se asume que la fuente sonora se encuentra en el área rectangular definida por los tres nodos sensores. De acuerdo con Xiong en 2012 [8], el arreglo triangular que en este caso forman los nodos sensores, minimiza los errores de localización, es decir, la distancia entre la posición real de la fuente sonora y la posición estimada por la red WSN. La tarea de localización se realiza empleando el método TDoA y un método numérico, manteniendo los errores relativos de peor caso por debajo de 4% con respecto al diámetro de la red.

Finalmente, es importante destacar que al igual que Chakraborty en 2014 [9], la red WSN solo requirió de sincronización temporal entre los nodos sensores que la componen, y no entre ellos y la fuente sonora. La red WSN solo emplea los tiempos de llegada de la onda acústica y las posiciones de los nodos sensores como parámetros

¹Time Differences of Arrival

fundamentales para efectuar la tarea de localización. A diferencia de otros trabajos como el de Saric en 2010 [10], no se tienen en cuenta otros parámetros tales como la potencia y el ángulo de llegada de la onda acústica al llegar a los nodos sensores. Todos los nodos empleados son de la plataforma IRIS fabricados por la empresa MEMSIC y fueron programados en el sistema operativo TinyOS.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para simplificar el diseño del sistema localizador de sonido, se asumió que la fuente sonora genera un sonido impulsivo, es decir, de duración breve, que supera abruptamente la potencia del ruido del entorno, y que se propaga esféricamente a partir del punto en el que se genera. Adicionalmente, se asumió que las condiciones del entorno en el que funciona el sistema son relativamente silenciosas, con poco viento y de variables climáticas constantes, de manera que la velocidad del sonido pueda ser asumida constante. Por otra parte, se asumió que las transmisiones inalámbricas de los nodos de la red WSN se propagan instantáneamente de un punto a otro en comparación con las diferencias de tiempos que se esperan encontrar al aplicar TDoA. Finalmente, se determinó que la localización se da en un sistema coordinado imaginario en dos dimensiones que incluye el área de localización de la fuente, la cual se estableció en forma de rectángulo y de dimensiones máximas de $10\text{m} \times 10\text{m}$.

III. SOLUCIÓN IMPLEMENTADA

A. Descripción general del sistema

El sistema implementado consta de una red WSN compuesta por nodos de la plataforma IRIS que son fabricados por la empresa MEMSIC. Los nodos IRIS constan básicamente de un radio transmisor, un procesador y un dispositivo de almacenamiento. Además, obtienen energía a través de dos baterías AA de 1.2–1.5V. Los nodos IRIS se programan en el sistema operativo TinyOS. La técnica TDoA requiere de un hardware de captación por cada nodo sensor del sistema, además de una aplicación de sincronización de alta precisión.

Para localizar satisfactoriamente una fuente sonora en dos dimensiones aplicando TDoA, se requiere de un mínimo de cuatro sensores [4], [5]. Sin embargo, si se limita el área de localización de la fuente sonora, es posible obtener una solución única al problema de la localización en 2D empleando TDoA y solo tres sensores con posiciones conocidas [4], [7]. Por tal motivo, la red implementada consta de tres nodos sensores ubicados en las coordenadas $(0, 0)$, $(0, 10)$ y $(10, 10)$ del sistema coordinado imaginario. Además, se asume que la fuente sonora se encuentra en el área rectangular definida por los tres nodos sensores. Un cuarto nodo en la proximidad del arreglo actúa como estación base, proveyendo conexión a un computador portátil a través de interfaz serie USB.

A diferencia de los nodos sensores, el nodo estación base no tiene hardware de captación. Además, aunque los nodos sensores deben permanecer fijos en sus respectivas posiciones, la estación base puede ser móvil siempre y cuando se encuentre dentro del rango de alcance de los nodos sensores. En la red WSN implementada no hay

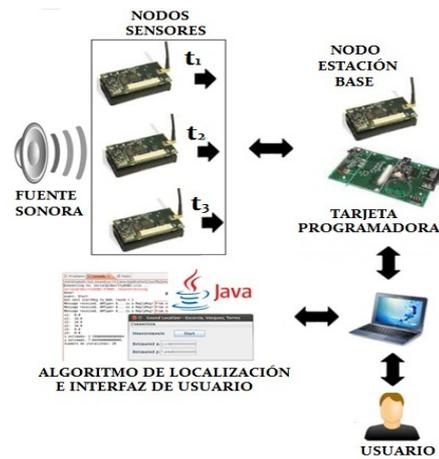


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema.

intercambio de información entre los nodos sensores, sino entre los nodos sensores y la estación base, por medio del estándar IEEE 802.15.4 para redes de baja potencia. También es importante destacar que la comunicación entre el nodo estación base y los nodos sensores es bidireccional. Por otra parte, en el ordenador de la estación base se ha implementado un algoritmo de localización y una interfaz de usuario en Java. El diagrama de bloques del sistema se puede observar en la Fig. 1.

La técnica TDoA necesita que los relojes de cada sensor estén sincronizados, para que sus tiempos de recepción reportados puedan ser operados. Cuando el usuario da la orden de localizar la fuente sonora, el algoritmo libera un mensaje a través de la estación base, que es usado por los nodos sensores para sincronizarse tomando como tiempo base el momento de la recepción concurrente de dicho mensaje. Las condiciones presentadas en la Sec. II permiten afirmar que los errores en sincronización son despreciables para el uso de TDoA. Cuando la fuente sonora emite un sonido impulsivo, este se propaga con velocidad constante hasta llegar a los nodos sensores, los cuales registran el tiempo de llegada de la onda recibida y luego lo informan a la estación base junto con su número identificación (ID). Finalmente, la estación base recibe la información y la envía a un ordenador que mediante un algoritmo implementado en Java, halla la coordenada de la fuente sonora con base en los tiempos de llegada y las respectivas posiciones de los nodos sensores.

B. Estación base

La estación base actúa como *gateway* entre los nodos sensores y el computador. Su función es reenviar a la red los mensajes recibidos por el puerto serial y viceversa. TinyOS provee un código para este propósito llamado *BaseStation*, que junto con un conjunto de librerías hace posible comunicar aplicaciones escritas en Java con la estación base.

C. Nodos sensores

Para aplicar el método TDoA, cada uno de los nodos sensores requiere de una adaptación hardware que le permita captar la onda acústica emitida por la fuente que se desea ubicar. Este hardware de captación consta de un circuito de acondicionamiento para la señal sonora conectado a la tarjeta

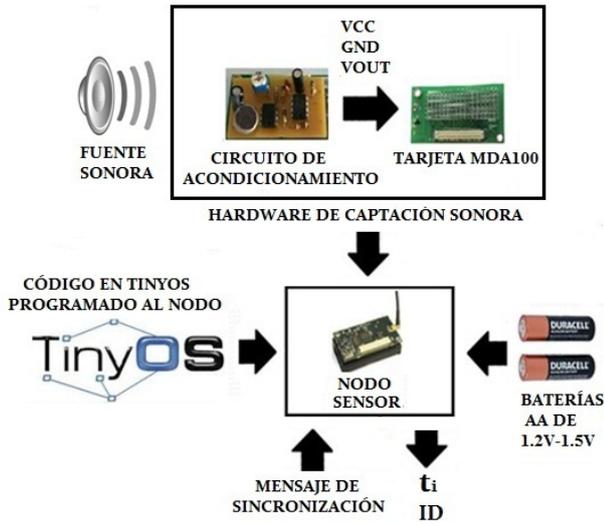


Fig. 2. Diagrama de bloques de los nodos sensores.

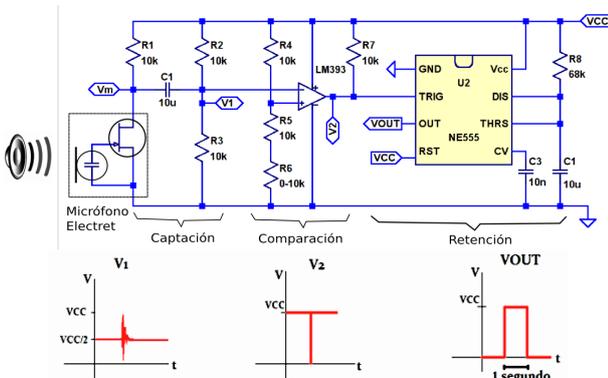


Fig. 3. Circuito de acondicionamiento para la señal sonora.

de adquisición de datos MDA100 provista por el fabricante MEMSIC, a manera de interfaz con el nodo. La energía de alimentación la provee el nodo por medio de sus dos baterías AA, es decir, 2.4V. En la Fig. 2 se detallan todos estos componentes.

El circuito de acondicionamiento para la señal sonora consta de tres etapas que son: captación, comparación y retención, como se muestra en la Fig. 3.

Se cuenta con un micrófono tipo *electret* para captar la onda acústica que proviene de la fuente. Este micrófono transduce la señal acústica en eléctrica, y requiere de un circuito de polarización para operar adecuadamente. El micrófono electret es apropiado para esta aplicación debido a su reducido tamaño, bajo costo y buen funcionamiento ante sonidos en el rango de 50 a 15.000Hz. Bajo las condiciones ambientales descritas en la Sec. II, los ruidos del entorno tienen menor potencia que el de la fuente sonora, por lo cual el circuito de acondicionamiento puede usar una forma de comparación contra un umbral. La Fig. 3 muestra que la salida en V_{OUT} será un 0V para sonidos despreciables o un pulso en nivel alto y duración de 1s cuando se capte un sonido por encima del umbral. V_{OUT} ingresa al nodo a través de un pin de interrupción disponible en la MDA100.

Analizando individualmente las etapas del circuito de acondicionamiento, se observa que la etapa de captación

transforma la señal acústica de entrada en una señal eléctrica. La etapa de comparación activa su señal de salida cuando la etapa que le precede supera cierto umbral, el cual es un evento que corresponde a la captación de la onda que proviene de la fuente sonora. Finalmente, la etapa de retención mantiene activada durante un tiempo finito la salida de la etapa de comparación cuando esta se ha activado. La etapa de comparación consta del amplificador operacional LM393P configurado en modo comparador. La etapa de retención consta del integrado LMC555 configurado en el modo multivibrador monoestable. Los circuitos integrados LM393P y LMC555 pueden funcionar adecuadamente con cualquier tensión de alimentación superior a 2V.

Los nodos sensores fueron programados en TinyOS para efectuar dos funciones importantes. La primera de ellas es aceptar un levantamiento en la señal V_{OUT} como una interrupción hardware, atendiendo de forma inmediata el evento de la llegada de la onda acústica al sensor. Una vez activada la interrupción, el nodo registra el tiempo de llegada de la onda y posteriormente lo envía a la estación base junto con su respectivo ID. El tiempo que toma la interrupción en activarse es de aproximadamente $10\mu s$, lo cual constituye una fuente de error en la localización de la fuente sonora por parte del sistema. No obstante, el sistema es evaluado bajo esta condición. La segunda función del código programado al nodo consiste en inicializar el reloj del nodo al recibir un mensaje de sincronización de la estación base. De esta forma los nodos se sincronizan entre ellos antes de captar la onda acústica emitida por la fuente, lo cual permite aplicar el método TDoA.

Finalmente, la conexión entre el circuito de captación y el nodo sensor se hace a través de los pines F1, A1 y INT3 de la tarjeta MDA100, la cual va insertada en el nodo sensor (Véase Fig. 2). Los pines F1 y A1 van conectados a los terminales V_{CC} y GND del circuito de acondicionamiento respectivamente. Por su parte, el pin INT3 va conectado al terminal V_{OUT} del circuito. A través de INT3 el circuito activa la interrupción hardware en caso de captarse la onda acústica.

D. Algoritmo de localización implementado en Java

El algoritmo de localización emplea el método TDoA para hallar la posición de la fuente sonora. El método TDoA se basa en plantear un sistema de ecuaciones hiperbólicas con base en los tiempos de llegada de la onda acústica a los nodos sensores junto con sus respectivas posiciones. El sistema de ecuaciones es posteriormente resuelto mediante un método numérico aplicando la técnica de mínimos cuadrados.

Sea t_i el instante de tiempo en el que cada nodo sensor S_i de la red ha captado la onda sonora. La diferencia de distancias entre la fuente y los sensores S_1 y S_2 de la red puede calcularse de acuerdo a

$$d_{21} = d_2 - d_1 = (t_2 - t_1) v_s \quad (1)$$

donde d_1 es la distancia entre S_1 y la fuente sonora, d_2 es la distancia entre S_2 y la fuente, y v_s es la velocidad del sonido. Téngase en cuenta que los valores d_1 y d_2 no son conocidos por el sistema, ya que los tiempos t_1 y t_2 no corresponden a los tiempos que la onda sonora tomó

en recorrer dichas distancias respectivamente, sino que son los tiempos *locales* de recepción de la onda. Por otra parte, se ha asumido que la velocidad del sonido $v_s = 345\text{m/s}$, correspondiente a 30°C de temperatura y 50% de humedad relativa, que son las condiciones en las que se probó el sistema.

En lo siguiente se consideran dos sensores en particular, pero se extenderá este procedimiento a todas las parejas de sensores disponibles. Sean (x_1, y_1) y (x_2, y_2) las posiciones de los sensores S_1 y S_2 , respectivamente, y (x, y) la posición de la fuente acústica. La ecuación (1) puede reescribirse como se muestra en (2).

$$d_2 - d_1 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (2)$$

Por definición, (2) describe una hipérbola, de manera que puede expresarse de la forma canónica (3).

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (3)$$

Si se consideran los parámetros básicos de una hipérbola general como:

- a mitad de la diferencia de distancias entre cualquier punto de la hipérbola y los focos (*i.e.* $\frac{d_{S_1} - d_{S_2}}{2}$).
- c mitad de la distancia entre los focos.
- (h, k) coordenadas del centro de la hipérbola.
- θ ángulo de rotación de la hipérbola con relación al eje de las abscisas.

entonces los coeficientes de (3) pueden expresarse en términos de los parámetros básicos de una hipérbola así:

$$\begin{aligned} A &= c^2 \cos^2 \theta - a^2, & B &= c^2 \sin 2\theta \\ C &= c^2 - 2a^2 - A, & D &= -2hA - kB \\ E &= -2kC - hB, & F &= h^2 + k^2C + khB - a^2b^2 \end{aligned} \quad (4)$$

donde $b = \sqrt{c^2 - a^2}$.

Los parámetros básicos de la hipérbola son conocidos a partir de la información de los tiempos de llegada y la posición de los nodos sensores, y corresponden a lo siguiente:

$$\begin{aligned} a &= \frac{t_2 - t_1}{2} v_s, & c &= \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{2} \\ h &= \frac{x_2 + x_1}{2}, & k &= \frac{y_2 + y_1}{2}, & \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Con base en los valores de t_i se puede saber cuál nodo sensor escuchó primero la onda acústica, a saber, el que tenga el t_i más pequeño. Con esto, se puede saber el signo del parámetro a . Note que esta información no se deduce de la ecuación (3), pues todos los coeficientes de esta dependen de $a^2 = \left(\frac{d_{21}}{2}\right)^2$.

El efecto de omitir esta información, es que la hipérbola resultante posee dos hojas, donde una de ellas puede descartarse. Para tal fin, se tiene en cuenta la condición de restricción (6a) si $t_1 < t_2$. En caso contrario, se tendría en su lugar la restricción (6b).

$$\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} < \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \quad (6a)$$

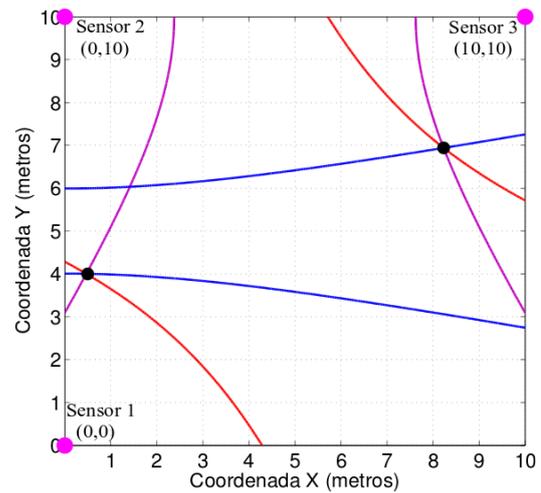


Fig. 4. Hipérbolas planteadas por el sistema.

$$\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} > \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \quad (6b)$$

Finalmente, se deduce que por cada par de nodos sensores se puede plantear una ecuación hiperbólica similar a (3) y una ecuación de restricción similar a (6a) o (6b). El número de parejas que se forman con n nodos sensores es $N_{par} = \frac{1}{2}n(n-1)$. En este caso particular, se tienen tres nodos sensores, y en consecuencia, tres parejas, de manera que el problema de localización de la fuente sonora se reduce a resolver el sistema de ecuaciones no lineales mostrado en (7), donde los subíndices representan las tres parejas de nodos.

$$\begin{aligned} A_1x^2 + B_1xy + C_1y^2 + D_1x + E_1y + F_1 &= 0 \\ A_2x^2 + B_2xy + C_2y^2 + D_2x + E_2y + F_2 &= 0 \\ A_3x^2 + B_3xy + C_3y^2 + D_3x + E_3y + F_3 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Por cada ecuación en (7), hay una condición de restricción similar a (6a) o (6b). Dado que el sistema se probó en una superficie de $10\text{m} \times 10\text{m}$, otras condiciones adicionales de restricción que deben incluirse son:

$$0 < x < 10 \quad (8a)$$

$$0 < y < 10 \quad (8b)$$

Gráficamente, el problema de localización se reduce a encontrar el punto de intersección de tres hipérbolas, tal como se muestra en la Fig. 4.

En la Fig. 4 se observa que por cada hipérbola se debe descartar una de las hojas de acuerdo a (6a) o (6b), para eliminar la posibilidad de obtener una solución no deseada. Asimismo, las restricciones (8a) y (8b) eliminan las soluciones que satisfagan (7) pero se encuentren por fuera del área de $10\text{m} \times 10\text{m}$.

El sistema de ecuaciones planteado en (7) y *sujeto* a sus respectivas ecuaciones de restricción posee una solución única que puede hallarse de forma numérica. Por tal motivo, se plantea un método iterativo para hallar la solución. Aplicando la técnica de mínimos cuadrados, puede decirse que resolver el sistema de ecuaciones planteado en (7) equivale a resolver el problema de minimización convexa presentado en (9).

$$\underset{(x,y)}{\text{minimizar}} f(x,y) \quad (9a)$$

donde

$$f(x,y) = \sum_{i=1}^{N_{par}} f_i(x,y)^2 \quad (9b)$$

$$f_i(x,y) = A_i x^2 + B_i xy + C_i y^2 + D_i x + E_i y + F_i \quad (9c)$$

y bajo las restricciones (a) o (b) de (6) y (8), según corresponda.

El método de optimización empleado para resolver (9) fue implementado directamente en Java para evitar usar una herramienta de optimización adicional en el sistema. El algoritmo comienza con una solución (posición) arbitraria y se va acercando a la posición real de la fuente sonora iterativamente, a medida que disminuye el valor de $f(x,y)$ en (9b). El punto de partida de la solución (x,y) son las coordenadas del sensor que primero escuchó la onda sonora. Luego se establece una variable δ cuyo valor es la mitad de la distancia entre los dos nodos sensores más cercanos a la fuente sonora. Finalmente, se ejecutan las siguientes instrucciones en orden secuencial:

- 1) Hallar $f(x_a, y_a)$, donde (x_a, y_a) asume cuatro valores diferentes, a saber, $(x + \delta, y)$, $(x - \delta, y)$, $(x, y + \delta)$, y $(x, y - \delta)$.
- 2) Descartar las coordenadas (x_a, y_a) tal que $f(x_a, y_a)$ sea mayor al valor actual de $f(x, y)$, o (x_a, y_a) no cumpla con las condiciones de restricción.
- 3) En caso de que todas las coordenadas (x_a, y_a) hayan sido descartadas, reducir el valor de δ en un factor de 10 y repetir las instrucciones anteriores. En caso contrario, hacer el paso siguiente.
- 4) Escoger la coordenada (x_a, y_a) que no haya sido descartada y cuyo valor $f(x_a, y_a)$ sea el menor entre todos los hallados.
- 5) Modificar la posición actual del algoritmo. La coordenada (x, y) ahora será igual a la coordenada (x_a, y_a) hallada en el paso anterior.
- 6) Repetir nuevamente todos los pasos anteriores en caso que $\delta > 0.0005$.

Como se pudo notar, el tamaño del paso inicialmente es grande, pero va reduciéndose cada cierto número variable de iteraciones. De esta forma, la rapidez con la que se llega a la solución va disminuyendo con el número de iteraciones, a la vez que va obteniéndose una mayor precisión en la ubicación de la fuente sonora.

En los pasos que ejecuta el algoritmo, se evidencia que este explora cuatro direcciones (arriba, abajo, derecha, izquierda) antes de cambiar de ubicación. Se escogieron esas direcciones dado que garantizan que el método efectivamente converge hacia la solución deseada. Un mayor número de direcciones exploradas, hubiese significado un número menor de desplazamientos hasta llegar a la solución, sin embargo, también hubiese implicado un mayor número de evaluaciones antes de cada desplazamiento.

IV. RESULTADOS

Luego de implementar el sistema diseñado, se realizaron múltiples pruebas para examinar en detalle su

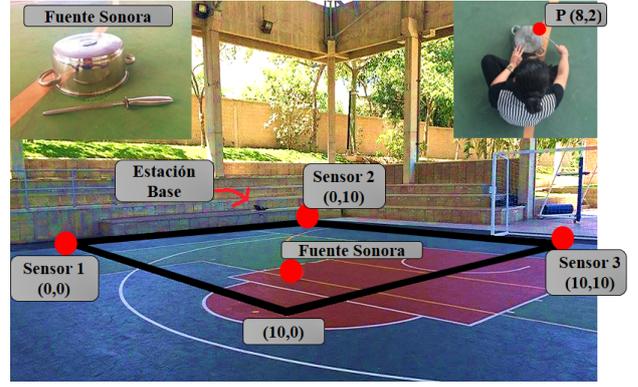


Fig. 5. Prueba del sistema.

funcionamiento. En la Fig. 5 se observa que el sistema se probó en un campo de microfútbol que estaba parcialmente al aire libre. En el terreno de juego se midió una superficie de $10m \times 10m$ y luego se ubicaron los nodos sensores en las posiciones $(0,0)$, $(0,10)$ y $(10,10)$ del sistema coordenado imaginario. A continuación, se ubicó la fuente sonora en diferentes posiciones con coordenadas (x,y) conocidas, se puso en funcionamiento el sistema y en cada caso se halló la distancia entre la posición real de la fuente y la posición estimada por el sistema.

La fuente sonora usada para probar el sistema consistió en un objeto metálico que se golpeaba fuertemente. El golpe producía un sonido breve en el tiempo y de alta potencia, de tal forma que podía diferenciarse claramente del ruido del entorno.

Para realizar las pruebas, se escogieron cinco puntos representativos del sistema coordenado: $(2,2)$, $(2,8)$, $(8,2)$, $(8,8)$ y $(5,5)$. Estos puntos constituyen una muestra representativa de puntos en relación a la posible ubicación de la fuente sonora. Por cada una de las cinco posiciones mencionadas se realizaron 30 pruebas, y para cada prueba se halló el error en la localización. El error se encontró calculando la distancia entre la posición real de la fuente y la posición estimada.

En la Fig. 6 se observan los resultados en un plano de $10m \times 10m$ donde aparecen graficadas las cinco posiciones de prueba que se escogieron para verificar el funcionamiento del sistema. Igualmente, se grafican en color verde las 30 estimaciones realizadas por el sistema para cada punto de prueba. Por cada uno de estos puntos, se grafican círculos que incluyen el 90% de las posiciones estimadas. Junto a cada círculo aparece su radio en metros. Luego de observar la gráfica, se puede afirmar que al menos en el 90% de los casos, el sistema implementado comete un error máximo de 44cm. Si se define el error relativo como este valor sobre el diámetro de la red de sensores, que corresponde a $\sqrt{2} \cdot 10m = 14.1m$, se tiene un error relativo máximo de $\frac{0.44}{14.1} = 3.11\%$

Las nubes de puntos verdes que aparecen en la Fig. 6, indican que el sistema implementado comete un error variable al localizar la fuente sonora. El error puede deberse a la presencia de viento en el entorno, ya que el viento modifica continuamente el valor de la velocidad del sonido. También se observa que la magnitud del error en la localización depende de la posición de la fuente con relación a los nodos sensores. Particularmente, se observa que para el

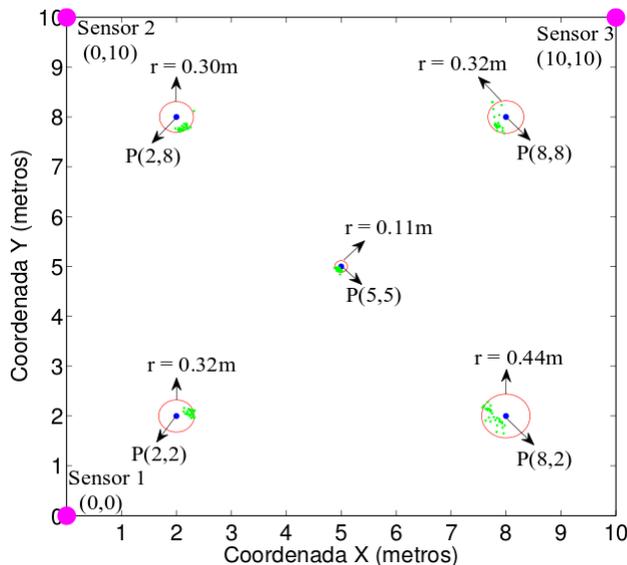


Fig. 6. Resultados obtenidos.

punto (5,5) los errores de localización son más bajos en comparación con los errores obtenidos cerca de las esquinas. También se observa que los errores son mayores cerca de la esquina del plano donde no hay sensor. Como última observación importante, se puede destacar que para cada punto de prueba, la nube de puntos no está centrada alrededor de la posición real de la fuente sonora. Lo anterior indica que el error podría disminuir si el sistema fuese compensado.

La media y la desviación estándar del error en la localización de la fuente sonora para todas las 150 pruebas realizadas son $\mu = 23.24$ cm y $\sigma = 9.5$ cm, con un error relativo del 1.64% en las coordenadas de localización para el entorno escogido. Si se plantea una prueba de hipótesis con los resultados anteriores, nivel de significancia $\alpha = 1\%$ (confianza de 99%), y un umbral de 26 cm:

$$H_0 : \mu \geq 26 \text{ cm}, \quad \text{vs.} \quad H_1 : \mu < 26 \text{ cm}$$

es decir, " H_0 : el error medio radial de localización es 26 cm o más", resulta en un p -value = 0.019%, lo cual indica que hay evidencia suficiente (p -value $< \alpha$) para rechazar H_0 y optar por la alternativa: el error medio $\mu < 26$ cm.

Las pruebas se extendieron a un entorno similar de $5\text{m} \times 5\text{m}$ y con 30 pruebas por punto, con resultados de errores relativos similares a los del caso de $10\text{m} \times 10\text{m}$. En particular se obtuvo un error relativo de 1.57% (11.10 cm), y un error relativo máximo de 3.7% para un radio de 26 cm que abarca el 90% de los casos. La prueba de hipótesis para $\alpha = 1\%$ concluye con un p -value=0.064%, que el error medio no excede 13 cm, es decir, 1.84% de error relativo.

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se implementó una red WSN estática que permite hallar con tres nodos sensores la posición en 2D de una fuente acústica, bajo las restricciones de superficie limitada y posiciones de los sensores conocidas. No limitar la superficie a una zona conocida y obtener una solución analítica cerrada al problema requiere el uso de un cuarto sensor como se muestra en los trabajos de Spencer y Dong. Se observó que un error de sincronización de

máximo $10\mu\text{s}$ permite emplear satisfactoriamente la técnica TDoA para ubicar una fuente sonora en dos dimensiones.

Con relación a los errores de localización obtenidos, se puede inferir que están estrechamente relacionados con las características del entorno en el que funciona el sistema. Los errores también dependen de la posición de la fuente sonora respecto a los nodos sensores, de manera que debe investigarse cuál es la posición más adecuada en la que deben posicionarse los nodos sensores para que el error de localización se distribuya de manera más uniforme en el plano de $10\text{m} \times 10\text{m}$.

Se puede destacar que si bien el error máximo en la localización de la fuente ha sido relativamente grande (44cm), los resultados obtenidos han sido satisfactorios, ya que no se tuvieron en cuenta otros parámetros característicos de la onda acústica emitida por la fuente tales como el ángulo de llegada o la potencia recibida en los nodos sensores. Tampoco se tuvo en cuenta la disminución progresiva de la SNR a medida que la onda recorre mayores distancias para llegar a los nodos, ni los cambios en la velocidad del sonido causados por variaciones en la velocidad del viento, la humedad o la temperatura. Por tal motivo, como trabajo futuro se sugiere diseñar una estrategia de solución donde la velocidad del sonido sea un parámetro medido o calculado por la red, de manera que no sea necesario conocerla *a priori* y los errores de localización se vean mínimamente afectados por su variabilidad.

REFERENCIAS

- [1] M. Bal, "Industrial applications of collaborative wireless sensor networks: A survey," in *Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on*, Istanbul, Turkey, June 2014, pp. 1463–1468.
- [2] R. Kachhoria, P. Gupta, S. Varma, and M. Radhakrishna, "Sound source localization in large area wireless sensor networks – a heuristic approach," in *India Conference (INDICON), 2014 Annual IEEE*, Dec 2014, pp. 1–4.
- [3] K. Yang, G. Wang, and Z. Q. Luo, "Efficient convex relaxation methods for robust target localization by a sensor network using time differences of arrivals," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, no. 7, pp. 2775–2784, July 2009.
- [4] L. Spiesberger, "Hyperbolic location errors due to insufficient numbers of receivers," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 109, pp. 3076–3079, 2001.
- [5] S. J. Spencer, "Closed-form analytical solutions of the time difference of arrival location problem for minimal element monitoring arrays," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, no. 5, pp. 2943–2954, 2010.
- [6] L. Dong, X. Li, and G. Xie, "An analytical solution for acoustic emission source location for known p wave velocity system," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, no. Article ID 290686, pp. 1–6, 2014.
- [7] S. J. Spencer, "The two-dimensional source location problem for time differences of arrival at minimal element monitoring arrays," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 121, no. 6, pp. 3479–3594, 2007.
- [8] G. Xiong, X. Li, X. Wu, and Y. Ou, "A closed-form approach to acoustic source localization," in *Information and Automation (ICIA), 2012 International Conference on*, June 2012, pp. 739–744.
- [9] J. Chakraborty, G. Ottoy, M. Gelaude, J. P. Goemaere, and L. D. Strycker, "Acoustic localization of unknown sources with wireless sensor nodes," in *Computer and Information Technology (ICCIT), 2014 17th International Conference on*, Dec 2014, pp. 488–493.
- [10] Z. M. Saric, D. D. Kukulj, and N. D. Teslic, "Acoustic source localization in wireless sensor networks," *Circuit Systems and Signal Processing*, vol. 29, pp. 837–856, Oct. 2010.