

Posicionamiento de Eventos mediante Técnicas de Procesamiento de Señales Acústicas

María Salomé Pérez

Ing. Vinicio Carrera, PhD.

Ing. Daniel Altamirano

Departamento de Eléctrica y Electrónica
Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE

Resumen—En el medio con el que interactuamos existe información valiosa que aún no ha sido procesada en aplicaciones útiles para la vida real que puedan llegar a significar sobrevivencia. Este es el caso de utilizar señales acústicas como información de localización en sistemas capaces de ubicar y detectar la presencia de seres vivos atrapados en situaciones de emergencia a partir de gritos, voces o hasta respiros emitidos ante el peligro. Justamente, la caracterización de señales acústicas como métricas en métodos de posicionamiento presenta varias consideraciones técnicas que las hacen sumamente atractivas, por lo que en búsqueda de definir un esquema orientado a la investigación de sistemas de posicionamiento acústico, el presente trabajo consiste en la implementación y evaluación un prototipo que permita localizar una fuente emisora de sonido puntual mediante técnicas de procesamiento de señales acústicas y métodos de estimación de ubicación dentro de un ambiente controlado de laboratorio. A pesar de los desafíos que implica el procesamiento de señales acústicas, el error promedio obtenido fue de 22.65 cm dentro de un área de implementación de 2×2 metros.

Palabras Claves—Localización acústica, posicionamiento, Lateración, *Fingerprinting*, arduino.

Abstract—In the environment we interact with valuable information has not yet been processed into useful applications for real life which would mean survival. This is the case of using acoustic signals as location information systems able to detect the presence of living beings trapped in emergencies from shouting voices, breaths or any type of sound issued in face of danger. Precisely, the characterization of acoustic signals as metrics in positioning methods presents several technical considerations that make them very attractive, so looking to define a research-oriented acoustic positioning system scheme, this paper presents the implementation and evaluation of a prototype that allows to locate a sound source using acoustic signals and location estimation methods in a controlled laboratory environment. Despite the challenges of processing acoustic signals, the average error that we obtained in our implementation was 22.65 cm within a deployment area of 2×2 meters.

Index Terms—Acoustic localization, positioning, Lateration, *Fingerprinting*, arduino.

I. INTRODUCCIÓN

Solo se escuchó una fuerte explosión y en cuestión de 2 segundos un día normal se convirtió en una situación de peligro. Un cilindro de gas explotó y provocó un incendio masivo en el edificio donde usted vive. Ahora está atrapado en medio de fuertes llamas y abundante humo que dificulta

respirar. Grita insistentemente pidiendo ayuda pero es inútil nadie responde. Han pasado unos pocos minutos cuando nota que un equipo de bomberos está en el área en búsqueda de vidas humanas. Para este momento, sus sentidos ya se han debilitado mucho y sus pedidos de auxilio solo se escuchan como tenues gemidos acompañados de agitadas respiraciones. Imagina usted en este punto que uno de sus respiros pueda salvar su vida? La respuesta es sí! Aunque parezca increíble esta es la información que efectivamente detectaron los sensores acústicos de los dispositivos que asistieron tecnológicamente las labores de rescate ejecutadas por los bomberos y socorristas. Usted fue localizado a través del procesamiento del sonido producido por su respiración y ahora está vivo para contarlo.

Esta situación ejemplifica una potencial aplicación a futuro de las técnicas de posicionamiento mediante procesamiento de señales acústicas. Justamente en casos como éste, la información de localización puede llegar a significar sobrevivencia y contribuir significativamente en sistemas conscientes de ubicación que han incorporado a lo largo del tiempo nuevas y avanzadas tecnologías. Estas técnicas han experimentado un continuo proceso de evolución en función de como las necesidades de la sociedad han cambiado y los avances que el desarrollo tecnológico experimenta continuamente [1].

En la actualidad, las investigaciones relacionadas al posicionamiento de objetos de interés a través de monitorización de parámetros a distancia están tomando interés en la utilización de señales acústicas como métricas que proporcionen información de localización. Las señales acústicas representan variables no muy explotadas en sistemas de localización con diferentes consideraciones técnicas que las hacen sumamente atractivas. Por ejemplo se puede destacar su naturaleza de baja potencia, presencia no intrusiva en cualquier entorno a monitorear y la flexibilidad que proporcionan para interpretar información coordinada en tiempo real de ocurrencia debido a su propagación en el orden de los milisegundos [2], [3].

Considerando lo expuesto, el presente trabajo está orientado a la implementación y evaluación de un sistema de posicionamiento acústico a través de un prototipo que permita localizar una fuente emisora de sonido puntual mediante técnicas de procesamiento de señales acústicas y métodos de estimación de ubicación dentro de un ambiente controlado de laboratorio. En nuestra implementación, las señales acústicas se adquieren a partir de un arreglo de sensores especificado por micrófonos de alta sensibilidad agrupados en una red inalámbrica de sensores, y el posicionamiento se efectúa mediante los métodos

María Salomé Pérez e-mail: msperez1@espe.edu.ec
Ing. Vinicio Carrera, PhD. e-mail: evcarrera@espe.edu.ec
Ing. Daniel Altamirano e-mail: cdaltamirano@espe.edu.ec

de Lateración y *Fingerprinting*. Finalmente el posicionamiento resultante se observa gráficamente en un plano coordenado de dos dimensiones.

Con el desarrollo del presente trabajo se espera definir un esquema orientado a la implementación, evaluación e investigación de sistemas capaces de localizar fuentes emisoras de sonido mediante el procesamiento de señales acústicas como observables en métodos de posicionamiento que permitan determinar la ubicación confiable y a tiempo de los acontecimientos suscitados en un determinado escenario.

Las secciones a continuación están organizadas de la siguiente manera. La sección II presenta un resumen de los principales conceptos y métodos de posicionamiento, la sección III expone el diseño e implementación de los componentes que integran el sistema de posicionamiento acústico, la sección IV presenta la metodología y los resultados de la evaluación de los métodos de posicionamiento implementados, y finalmente la sección V concluye este trabajo.

II. POSICIONAMIENTO

Se define como el proceso de encontrar las coordenadas en dos o tres dimensiones de un objetivo a través de 5 elementos principales: (i) uno o varios parámetros observados por métodos de medición, (ii) un método de posicionamiento para el cálculo de la posición, (iii) un sistema de referencia espacial, (iv) infraestructura, y (v) protocolos para coordinar el proceso de posicionamiento [4].

La principal función de cualquier posicionamiento es la medición de uno o varios observables que reflejan la relación espacial de un objetivo respecto de uno o varios puntos fijos de coordenadas conocidas como por ejemplo intensidad de señal recibida (RSS - *received signal strength*), tiempo de vuelo (TOF - *time of flight*), ángulo y dirección de arribo (AOA - *angle of arrival*, DOA - *direction of arrival*). Estas mediciones suelen ser clasificadas en métodos de radiolocalización donde los observables son directa o indirectamente medidos por señales de radiofrecuencia, y métodos de no radiolocalización en los cuales los observables se obtienen a partir de otras señales físicas de naturaleza acústica, óptica, entre otras [4].

Una vez que los observables requeridos se han determinado, la posición del objetivo se deriva luego de tomar en consideración los resultados de las mediciones y las coordenadas de ciertos puntos fijos respecto de un sistema específico de referencia espacial (WGS 84, UTM, cartesiano) o descriptivo (identificadores de celdas, número de habitación o piso). Esta determinación usualmente está basada en métodos que dependen fuertemente de los observables utilizados [5].

A continuación se presenta un extracto de los fundamentos expuestos en [6] y [5] sobre los métodos básicos de posicionamiento:

- **Lateración:** Aquí el observable es el rango o diferencia de rango entre el objetivo y un número al menos de tres estaciones base. Se establece un sistema de n ecuaciones no lineales que permiten calcular la posición del objetivo, donde n denota el número de estaciones base. Para el caso de $n = 3$, se conoce como trilateración. Si el posicionamiento está basado en la medición de

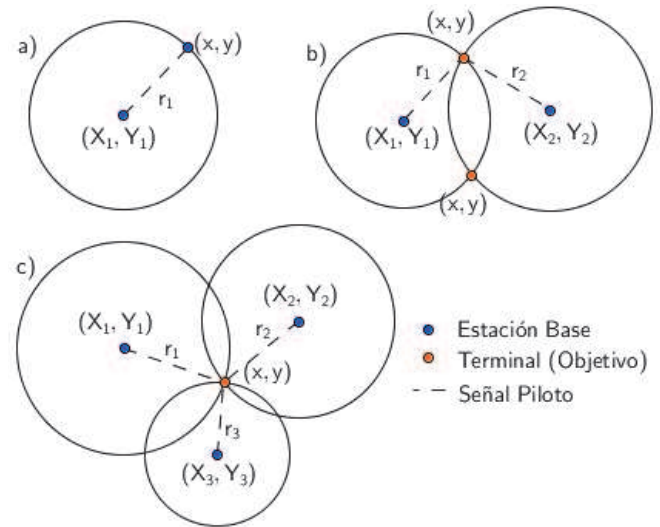


Figura 1. Lateración circular.

rangos, la posición del objetivo se calcula por lateración circular de especial interés para la presente investigación; mientras que si el método de medición toma en cuenta la diferencia de rangos, el posicionamiento se calcula por lateración hiperbólica. En ambos casos estas mediciones están siempre sujetas a error y por tanto los valores resultantes generalmente se denotan pseudorangos que difieren del verdadero rango de acuerdo a cierto error potencial.

- **Lateración circular:** Asume que los rangos r_i entre el objetivo y un número de estaciones base $i = 1, \dots, n$ son conocidos. Esto permite limitar la posición del objetivo a un círculo alrededor de cierta estación base, siendo el rango el radio del círculo como se puede apreciar en el caso a) de la figura 1. Si el rango con una estación base adicional se toma en cuenta en el caso b) de la figura 1, entonces la posición del objetivo se reduce a los dos puntos donde los círculos se intersectan. Finalmente, en el caso c) de la misma figura se evidencia que con el rango de una tercera estación se elimina la ambigüedad de las dos soluciones obtenidas a partir de la intersección de los dos círculos y se obtiene una única posición resultante para el objetivo.

La estimación de los rangos entre el objetivo y las estaciones base se realiza a través de un modelo matemático que permita relacionar la variación de la intensidad de las señales empleadas para el posicionamiento a medida que la distancia incrementa. Tomando el caso de c) de la figura 1, las coordenadas del objetivo representado a través del punto naranja se obtienen de la intersección de las circunferencias con centro en (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) y (X_3, Y_3) . Las ecuaciones 1, 2 y 3 exponen la solución matricial para el sistema de ecuaciones en estudio.

$$\text{Objetivo} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (A^T \times A)^{-1} \times A^T \times b \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} X_1 - X_2 & Y_1 - Y_2 \\ X_1 - X_3 & Y_1 - Y_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$b = \frac{1}{2} \times \begin{bmatrix} X_1^2 - X_2^2 + Y_1^2 - Y_2^2 + r_2^2 - r_1^2 \\ X_1^2 - X_3^2 + Y_1^2 - Y_3^2 + r_3^2 - r_1^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

- **Angulación:** Se conoce también como ángulo de arribo (AOA - *angle of arrival*) o dirección de arribo (DoA - *direction of arrival*). Estima la posición de un objetivo a partir de las coordenadas conocidas de varias estaciones base y de observables definidos por los ángulos entre el objetivo y un número de estaciones base mediante arreglos de antenas usualmente implementados en estaciones base debido a razones de economía y complejidad, que en el caso de implementarse en un terminal no resultarían prácticas.

- **Dead Reckoning:** Es uno de los métodos de posicionamiento más antiguos. Sus orígenes vienen de la navegación marítima y también se conoce ser el método que Cristóbal Colón utilizó en sus viajes para descubrir el Nuevo Mundo. Gracias al desarrollo de una tecnología avanzada de sensores, ha ganado importancia en los últimos años y hoy en día es utilizado para la navegación de aviones, barcos y automóviles.

Dead reckoning significa que la posición actual de un objetivo puede deducirse o extrapolarse a partir de la última posición conocida, asumiendo conocida la dirección de movimiento e incluso la velocidad del objetivo o la distancia cubierta en cierto tiempo.

- **Reconocimiento de patrones:** Implica observar el sitio donde el posicionamiento se realizará y concluir a partir de estas observaciones. Existen dos clasificaciones: reconocimiento óptico y no óptico. En la versión óptica, las imágenes visuales de un sitio son generadas con cámaras y se comparan entre ellas. El análisis de la escena puede ser estático, donde la posición de un objetivo se deriva comparando una captura de una escena generada por un observador con un número de imágenes pre-observadas y simplificadas de la escena tomadas desde diferentes perspectivas, o a través de un análisis dinámico en el que la posición se deriva a partir de diferencias entre imágenes tomadas sucesivamente de la escena.

En el caso de reconocimiento no óptico, se toma en consideración otras señales físicas. Un método popular es detectar la posición a partir de las características de propagación de las señales de radio o de otra naturaleza que los terminales experimentan en cierta posición. Este método se conoce como *Fingerprinting*.

Fingerprinting localiza un objetivo a través de una comparación de varias características de una determinada señal respecto de una base de datos del mismo tipo o características que han sido recopiladas con anterioridad sobre cierta área o entorno de posicionamiento.

Su ejecución contempla dos fases: *off-line* y *on-line*. En la primera fase el sitio de interés es cubierto por una grilla o base de datos en la que para cada punto del entorno o ambiente a posicionar se recolecta la intensidad de señal recibida (RSS) desde múltiples estaciones base o nodos de una red, resultando un vector denominado *fingerprint* que contiene valores de RSS para cada punto. En la segunda fase, cada nodo o terminal forma un vector de muestra de los valores de RSS y lo envía a un servidor o estación base, que se encarga de determinar que vector o vectores *fingerprint* en la base de datos resultan ser los más coincidentes. De aquí, la posición del objetivo se estima en base a las coordenadas conocidas de los vectores *fingerprint* que resultaron ser los de mayor coincidencia.

Tiene una ventaja potencial sobre otras técnicas ya que el multitrayecto y el desvanecimiento de propagación están intrínsecamente incluidos en la información recolectada en la base de datos para un ambiente de implementación en particular [4]. Esto permite obtener altos niveles de precisión en el posicionamiento al emplear este método.

- **Métodos híbridos:** Básicamente, es posible implementar cualquier combinación de los métodos de posicionamiento presentados y considerar diferentes observables para determinar la posición de un determinado objetivo. La principal motivación para esta práctica es el incremento de la exactitud del posicionamiento.

La aplicabilidad de los diferentes métodos de posicionamiento depende de las características de los entornos en los que se desea posicionar, los recursos de hardware y software disponibles y el menor costo asociado. Finalmente, otro aspecto importante son los criterios empleados para evaluar la calidad de un determinado método de posicionamiento, como por ejemplo la exactitud, precisión, rendimiento, latencia, costos de puesta en marcha y operación.

III. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

La figura 2 presenta la visión general del sistema de posicionamiento acústico propuesto, donde la campana simboliza la ocurrencia de un evento o emisión de un sonido puntual desde una fuente sonora que requiere ser localizada. Respecto de las consideraciones de diseño del presente sistema, los principales aspectos involucrados son:

- La utilización de una red de sensores inalámbricos que a través de la alta integración de sus componentes electrónicos, escalabilidad y bajos costos económicos permite obtener un conocimiento eficiente de la información acerca de la ocurrencia de cierto evento [7], [8]. En nuestro prototipo, la red de sensores está formada por 6 nodos de red y un elemento central desplegados en un espacio de implementación de 2×2 metros. La densidad de población de la red de sensores se fijó en 6 debido a que ésta fue la cantidad de recursos de hardware disponibles, que puede elegirse también en dependencia del grado de precisión que se requiera en la localización o el funcionamiento tolerante a fallas [9], [10]. Se puede apreciar de igual forma en la figura 2 que cada nodo de red está integrado por tres componentes:

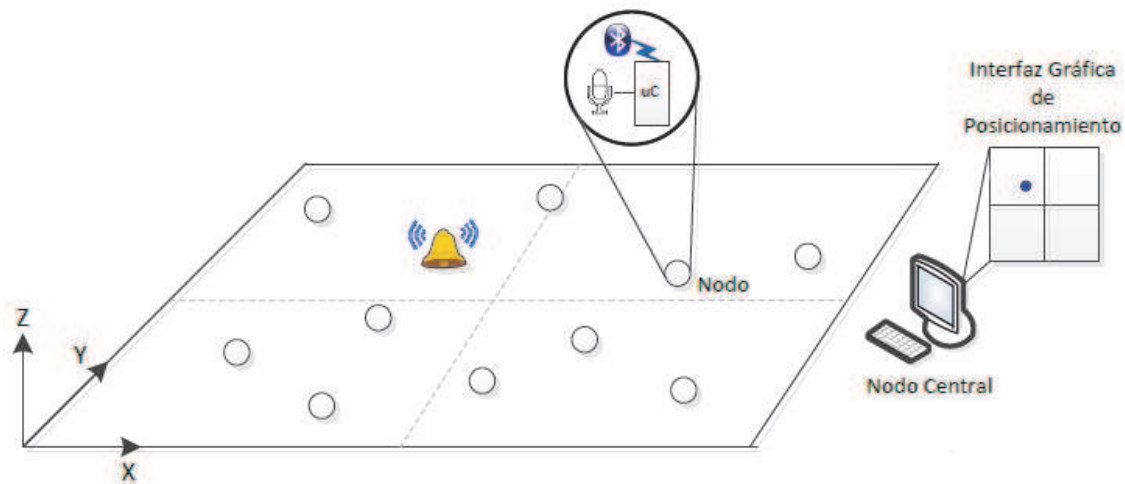


Figura 2. Esquema general del sistema.

- (i) un sensor de sonido asociado a un micrófono de sensibilidad adecuada para detectar cualquier emisión acústica en el medio de implementación, (ii) una plataforma microcontrolada que permita contar con los recursos computacionales necesarios para el pre-procesamiento de las señales acústicas adquiridas desde los sensores de sonido, y (iii) los módulos de comunicación inalámbrica necesarios para comunicar los nodos de red con el elemento central.
- El protocolo de comunicación inalámbrica de la red de sensores. En el caso de la presente implementación, se consideró Bluetooth v2.0 debido a la simplicidad de sus conexiones, costo económico, gran cantidad de dispositivos portables que actualmente incluyen esta tecnología y podrían conectarse a la red de sensores para expandir su funcionalidad, y a la ventaja de ser administrados mediante canales de comunicación específicos para la familia Bluetooth bajo protocolos que ofrecen garantías de entrega y confiabilidad en el intercambio de información tanto en sistemas operativos como Linux o Windows [11], [12].
- La topología de la red de sensores. Se implementó una topología de red centralizada, que a pesar de una de sus principales desventajas de generar tráfico considerable en redes de sensores muy pobladas, debido a los enlaces punto a punto entre cada nodo y el elemento central de la red, su simplicidad de implementación y la conveniencia de aprovechar los recursos computacionales disponibles en el elemento central para programar la mayor parte de inteligencia de la red en este punto y disminuir la complejidad de las funciones asignadas a los nodos de limitados recursos, hacen que esta topología sea adecuada para nuestro sistema.
- La geometría a través de la cual estarán dispuestos físicamente los nodos de la red. En este caso, la geometría permitirá evaluar la convergencia y exactitud del posicionamiento para diferentes posiciones y combinaciones de los nodos de red.
- La técnica de sincronización. Este es uno de los aspectos más críticos de la implementación, ya que a través de estas técnicas se garantiza la correlación en tiempo real de ocurrencia de cierto evento en todos los nodos de red, asegurando una correcta interpretación de la información proveniente del conjunto de sensores por parte del elemento central [13], [14].
- Los métodos de posicionamiento para procesar y evaluar la información relacionada a la detección de cierto evento. Para este caso se seleccionaron los métodos de Lateración y *Fingerprinting* debido al contraste que representan según lo expuesto en la sección de fundamento teórico. El primero consiste básicamente en un modelo matemático que permite caracterizar el comportamiento de las señales acústicas; mientras que el segundo implica un reconocimiento de patrones a partir de una base de datos que contiene mediciones de intensidad de señal, cuyos valores incluyen intrínsecamente los efectos del multitrayecto y el desvanecimiento que se tiene en la propagación de señales acústicas dentro de un ambiente determinado.
- Finalmente, una interfaz gráfica que permita visualizar a través de un plano de coordenadas cartesianas en dos dimensiones (x,y) el posicionamiento efectuado.

Abordando el funcionamiento del sistema de posicionamiento acústico implementado, éste puede explicarse a través de 3 módulos principales: (i) adquisición de señales acústicas, (ii) post-procesamiento de señales acústicas, y finalmente (iii) posicionamiento.

III-A. Módulo de adquisición de señales acústicas

Constituye la funcionalidad de los nodos de red. Está encargado de digitalizar la señal analógica de sonido adquirida desde los micrófonos a través de la plataforma microcontrolada Arduino Nano v3.0 para el caso de la presente implementación. Se encarga también de mantener la cuenta de tiempo local en cada nodo encerrándola ante la recepción de los mensajes de reseteo de contadores enviados desde el elemento

central. Luego de recolectar un cierto número de muestras de sonido se realiza el pre-procesamiento a través del cálculo de la potencia del ruido ambiente mediante la ecuación 4, donde $x[n]$ representa una muestra de sonido digitalizada y N el número total de muestras. Una vez calculada la potencia del ruido ambiente, ésta se transmite junto al valor actual de la etiqueta de tiempo local de cada nodo hacia el elemento central.

$$Potencia \text{ (adimensional)} = \frac{1}{N} \times \sum_{n=0}^{N-1} |x_n^2| \quad (4)$$

III-B. Módulo de post-procesamiento de señales acústicas

Constituye la funcionalidad del elemento central de la red y el componente de mayor inteligencia en el sistema. En nuestro caso, se implementó en un computador con procesador Intel core I7 y sistema operativo Fedora 17 bajo C de Linux. Su desempeño incluye la ejecución de las siguientes tareas:

- Administración de la conexión y desconexión de los nodos de red a través de canales de comunicación Bluetooth establecidos entre cada nodo y el elemento central de la red para ejecutar operaciones de entrada (lectura) o salida (escritura) de datos.
- Lectura y almacenamiento de los datos de potencia de ruido ambiente y etiqueta de tiempo local enviados desde cada nodo, a través de operaciones de entrada de datos en los canales de comunicación Bluetooth.
- Implementación de la técnica de sincronización en la red de sensores a través del envío de mensajes de reseteo de contadores a todos los nodos de la red cada 5 segundos mediante operaciones de salida de datos sobre los canales de comunicación establecidos.
- Producción del vector sincronizado de potencia como parte del post-procesamiento de señales acústicas. Su funcionalidad consiste en generar vectores cuyos elementos (valores de potencia) estén relacionados exactamente en tiempo, es decir, que éstos correspondan a etiquetas de tiempo idénticas o dentro de una tolerancia establecida, tal que se pueda calificar a los valores de potencia seleccionados como sincronizados.
- Finalmente, se encarga de establecer comunicación con el módulo de posicionamiento para el envío del vector sincronizado de potencia.

III-C. Módulo de posicionamiento

Este módulo constituye el componente final del sistema y está programado en Java 1.7.0_19. Su funcionalidad incluye la recepción del vector sincronizado de potencia desde el módulo de post-procesamiento y su tratamiento en los métodos de posicionamiento a evaluar: Lateración y *Fingerprinting*. Finalmente, el posicionamiento resultante se visualiza en un plano de coordenadas cartesianas en dos dimensiones (x,y) a través de una interfaz gráfica.

La detección de la ocurrencia de un evento a partir de los vectores sincronizados de potencia que se reciben en este módulo es un procedimiento fundamental. Éste se efectúa

monitoreando el valor de la sumatoria del cuadrado de los elementos del vector sincronizado de potencia con el fin de discriminar la ocurrencia de un evento acústico a partir de un valor umbral. Este método es muy útil para detectar pequeños y más aún grandes cambios en el vector, ya que el elevar al cuadrado amplifica las diferencias significativamente, simplificando la discriminación de un valor umbral sobre el cual es posible predecir la ocurrencia de un evento.

Luego de conocer que efectivamente se ha suscitado un evento, se seleccionan los valores máximos de potencia registrados por cada sensor, formando un nuevo vector de valores máximos de potencia de ruido ambiente el cual es procesado en los dos métodos de posicionamiento evaluados en esta implementación.

En el caso de Lateración, el modelo matemático empleado para relacionar distancia e intensidad de potencia del ruido ambiente medida por los sensores de cada nodo se expone en la ecuación 5, la cual se obtuvo a través de un ajuste de curvas de tipo exponencial a partir de una dispersión de más de 1000 mediciones con ayuda de la herramienta *Curve Fitting* en la plataforma de Matlab R2012b. Con las distancias obtenidas empleando esta ecuación, las coordenadas del posicionamiento de cierto evento (e_x, e_y) se estiman a través de la solución matricial expuesta en la sección de marco teórico a través de las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$Distancia(cm) = \frac{\ln(Potencia \text{ del ruido}/8176)}{-0,01676} \quad (5)$$

Respecto de la implementación del método de *Fingerprinting* se crearon dos bases de datos de 36 y 117 puntos referenciales. El vector característico de potencia obtenido para cada punto referencial resultó de la media de 15 mediciones realizadas registrando el valor de potencia del ruido ambiente medido por cada uno de los 6 sensores de la red.

Finalmente, para determinar los puntos de referencia más cercanos ante la recepción de un vector de potencia a posicionar, se implementó una variante del algoritmo del vecino más cercano (k -NN), que calcula la diferencia del vector de potencia a posicionar con cada uno de los vectores generados para los diferentes puntos de referencia en la base de datos seleccionada. Así, los k -vecinos más cercanos son los puntos de referencia que corresponden a los vectores de potencia con los que se obtuvieron las k menores diferencias del conjunto. Las coordenadas del evento a posicionar se determinan calculando la media de todas las abscisas y ordenadas correspondientes a la posición de los k -puntos referenciales determinados como los k -vecinos más cercanos.

IV. RESULTADOS

IV-A. Metodología de evaluación

Para evaluar el sistema de posicionamiento acústico se empleó un generador de tono con la finalidad de reproducir sonidos equivalentes en las diferentes pruebas efectuadas. La frecuencia del generador de tono se fijó en $3.6 \text{ kHz} \pm 500 \text{ Hz}$ debido a la facilidad de adquirir comercialmente *buzzers* necesarios para producir el sonido en la frecuencia

Tabla I
LATERACIÓN CON DIFERENTES COMBINACIONES DE NODOS.

No. combinación	Error de posicionamiento (cm)
Combinaciones en grupos de 3 nodos	
3.6	124.38
3.12	136.22
3.3	195.27
Combinaciones en grupos de 4 nodos	
4.11	118.18
4.7	120.36
4.2	162.22
Combinaciones en grupos de 5 nodos	
5.1	113.79
Combinaciones en grupos de 6 nodos	
6.1	180.35

determinada y a la consideración de este valor dentro de la banda que maximiza la respuesta en frecuencia de los sensores analógicos de sonido utilizados en nuestra implementación (3.57 kHz - 5.26 kHz).

IV-B. Evaluación del sistema de posicionamiento

Para evaluar el sistema de posicionamiento se seleccionaron 20 puntos dentro del espacio de implementación del prototipo de 2×2 metros, en cada uno de los cuales se tomaron 10 mediciones en diferentes pruebas con el objetivo de recolectar datos del posicionamiento resultante con los métodos de Lateración y *Fingerprinting*, cuya evaluación se detalla a continuación.

■ Lateración

El posicionamiento mediante este método se evaluó a través de todas las combinaciones posibles del conjunto de los 6 nodos de la red de sensores en grupos de 3, 4, 5 y 6 nodos respectivamente, con el objetivo de determinar las agrupaciones que permiten posicionar la ocurrencia de cierto evento con el menor error asociado. En nuestra implementación, la ocurrencia de cierto evento se interpreta como la emisión de un determinado sonido cuya fuente requiere ser localizada.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla I a través del error promedio de posicionamiento correspondiente únicamente a las combinaciones que registraron un error menor a 200 cm, debido a que ésta es la máxima longitud del lado del cuadrado de implementación del prototipo. Los valores de error promedio en la tabla I están ordenados de menor a mayor y fueron determinados a través de la distancia Euclidiana entre el posicionamiento efectuado y la posición real de la fuente de sonido a localizar.

Analizando los resultados obtenidos con el método de Lateración es posible destacar tres combinaciones óptimas para el desempeño de este método, las cuales se presentan en la tabla I como filas en color azul: (i) la combinación 3.6 como representante de los grupos de 3 nodos, (ii) la combinación 4.11 para grupos de 4 nodos, y (iii) la combinación 5.1 para agrupaciones de 5 nodos. De estas 3 combinaciones óptimas, las que menor error de posicionamiento asociado aportan son las combinaciones 4.11 y 5.1 con un valor de error prácticamente equivalente, que permite concluir que para el presente sistema el número óptimo de nodos para posicionar

Tabla II
EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE *Fingerprinting*.

No. vecinos más cercanos (k)	Error de posicionamiento (cm)
<i>Fingerprinting</i> con 36 puntos referenciales	
1	58.38
2	30.10
3	64.00
4	60.89
5	61.15
6	66.82
<i>Fingerprinting</i> con 117 puntos referenciales	
1	32.25
2	30.22
3	26.49
4	22.65
5	23.96
6	24.65

con el menor error asociado mediante el método de Lateración es 4 o 5.

Note que para el caso de agrupaciones de 6 nodos, solo existe una combinación posible cuyo error promedio de posicionamiento registrado fue bastante elevado (180.35 cm), razón por la cual no se consideró esta agrupación dentro de la selección de combinaciones óptimas.

Otra observación de interés es el conjunto de nodos con los que se obtiene el menor error de posicionamiento considerando las combinaciones óptimas determinadas para los grupos de 3, 4 y 5 nodos. Así, en el caso de la combinación óptima representante de los grupos de 3 nodos, los involucrados fueron los nodos 1, 3 y 5. Respecto de los grupos de 4 nodos, la mejor combinación relaciona los nodos 2, 3, 4, 5.

En consecuencia se establece que el conjunto formado por los nodos del 1 al 5 bajo diferentes combinaciones y agrupaciones conduce a mínimos errores de posicionamiento, a la vez que se identifica que el nodo 6 es el elemento que aporta con menor sensibilidad a las mediciones en la red de sensores, posiblemente a causa de una menor sensibilidad del sensor analógico de sonido o debido a una desviación de frecuencia en el reloj de la plataforma microcontrolada Arduino asociada al nodo 6.

■ *Fingerprinting*

Para la evaluación del método de *Fingerprinting* se analizaron dos casos: el primero aplicando el método con una base de datos de 36 puntos referenciales y el segundo con una base de datos de 117 puntos referenciales. Para estos dos casos se evaluó el número de vecinos más cercanos (k) que aporta con el menor error de posicionamiento.

Consecuentemente, la tabla II presenta el error promedio de posicionamiento obtenido en la evaluación de *Fingerprinting* con una base de datos de 36 y 117 puntos referenciales al variar el número de vecinos más cercanos de 1 a 6 (número máximo de nodos en la red). Al igual que en el caso de Lateración, el error se determinó a través de la distancia Euclidiana entre el posicionamiento efectuado y la posición real de la fuente de sonido a localizar.

Los resultados expuestos en la tabla II muestran que para el caso de emplear una base de datos de 36 puntos referenciales, el número óptimo de vecinos más cercanos es 2 con un error

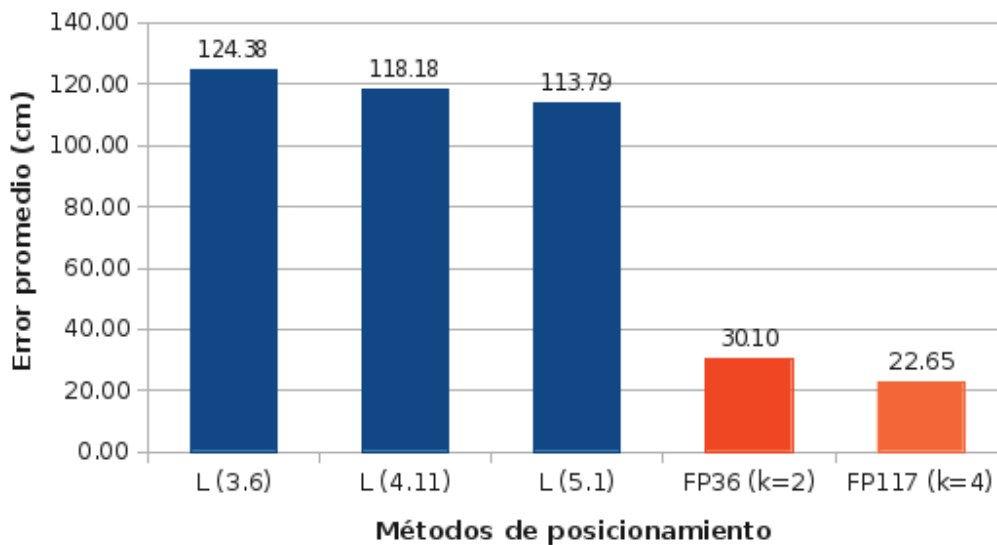


Figura 3. Error promedio de posicionamiento.

de posicionamiento de 30.10 cm, y para el caso de la base de datos de 117 puntos, el número óptimo de vecinos más cercanos es 4 con un error de posicionamiento de 22.65 cm, ambos dentro de un espacio de 2×2 metros.

Con el objetivo de resumir los resultados obtenidos para el caso de Lateración y *Fingerprinting*, la figura 3 presenta gráficamente una síntesis del error promedio obtenido al evaluar los métodos de posicionamiento con las combinaciones establecidas como óptimas para el caso de Lateración y el número adecuado de vecinos más cercanos para *Fingerprinting* con bases de datos de 36 y 117 puntos referenciales. En la leyenda de la figura 3, la letra *L* representa el método de Lateración y el número entre paréntesis la combinación con la cual se evalúa el método. Por su parte las etiquetas $FP36(k=2)$ y $FP117(k=4)$ representan la evaluación del método de *Fingerprinting* con una base de datos de 36 y 117 puntos referenciales empleando 2 y 4 vecinos más cercanos en cada caso.

Continuando con el análisis de los resultados sintetizados en la figura 3, se puede notar claramente que el método de Lateración presenta un error promedio en el posicionamiento resultante sumamente elevado respecto del valor del error obtenido con el método de *Fingerprinting*, por lo que su aplicación no resulta conveniente en sistemas de posicionamiento acústico.

Por otro lado, el bajo error promedio de posicionamiento obtenido con *Fingerprinting* considerando una base de datos de 117 puntos referenciales, equivalente a 22.65 cm de error en un espacio de implementación de 2×2 metros, permite concluir que éste es el método más adecuado para posicionar la ocurrencia de eventos a través del procesamiento de señales acústicas. La aplicación de este mismo método considerando una base de datos de 36 puntos referenciales también aporta con un bajo error de posicionamiento equivalente a 30.10 cm en el mismo espacio de implementación.

V. CONCLUSIONES

Una de las contribuciones más significativas del presente trabajo es el método empleado para caracterizar las señales acústicas y procesarlas posteriormente en los métodos de posicionamiento evaluados. Éste consiste en seleccionar el valor máximo de potencia registrado por cada nodo ante la ocurrencia de un evento y formar un vector justamente con todos los valores de potencia máximos identificados. El elegir los valores máximos de las muestras de potencia de ruido ambiente generadas ante la ocurrencia de un evento es una característica que en todas las observaciones realizadas se mantiene constante y permite posicionar acertadamente las fuentes de sonido que generaron estos eventos.

Respecto del análisis de desempeño del sistema de posicionamiento acústico, los resultados presentados muestran que el posicionamiento con menor error asociado se obtiene mediante el método de *Fingerprinting*. Los resultados obtenidos para el caso de Lateración muestran que este método no es adecuado para sintetizar a través de un modelo matemático los cambios y el comportamiento aleatorio de las señales acústicas bajo observación.

El método de *Fingerprinting* resulta ideal para este caso, ya que los vectores característicos de potencia de ruido ambiente registrados en cada punto de referencia toman en cuenta e incluyen en su valor la amplificación o atenuación de la intensidad de sonido debido a todas las variantes, múltiples reflexiones, ecos y dispersiones que experimenta la propagación de las señales acústicas. La aplicación de este método con una base de datos de 117 puntos referenciales proporciona el menor error promedio de posicionamiento obtenido, equivalente a 22.65 cm en un área de implementación de 2×2 metros.

Finalmente, a pesar del buen desempeño de *Fingerprinting*, es necesario tener en cuenta que el hecho que este método de posicionamiento requiera una fase de entrenamiento (*off-line*) para generar una determinada base de datos referencial implica que al cambiar la posición de los nodos de la red

de sensores se requiera un nuevo entrenamiento. El costo que implica este entrenamiento en *Fingerprinting* es justamente una de las grandes desventajas.

REFERENCIAS

- [1] D. Muñoz, F. Bouchereau, C. Vargas, and R. Enríquez Caldera, *Position Location Techniques and Applications*. Burlington, USA: Elsevier Academic Press, 2009.
- [2] G. Taylor and G. Blewitt, *Intelligent Positioning. GIS-GPS Unification*. England: John Wiley and Sons, Ltd., 2006.
- [3] Y. Huang, J. Benesty, and J. Chen, *Acoustic MIMO Signal Processing*, ser. Signals and Communication Technology. Berlin Heidelberg, Germany: Springer, 2006.
- [4] A. Bensky, *Wireless Positioning Technologies and Applications*. London: Artech House, 2008.
- [5] A. Kupper, *Location-Based Services: Fundamentals and Operation*. Munich, Germany: John Wiley and Sons, Ltd., 2005.
- [6] J. Figueiras and S. Frattasi, *Mobile Positioning and Tracking. From Conventional to Cooperative Techniques*. United Kingdom: John Wiley and Sons, Ltd., 2010.
- [7] S. Ahson and M. Ilyas, *Location-Based Services Handbook: Applications, Technologies, and Security*. Florida: Taylor and Francis CRC Press, 2011.
- [8] F. Zhao and L. Guibas, *Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach*. England: Elsevier and Morgan Kaufmann Publishers, 2010.
- [9] K. Kumatani, J. McDonough, and B. Raj, "Microphone array processing for distant speech recognition: Loud and clear fundamental technologies in modern speech recognition," in *Proc. IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 1, Nov. 2012.
- [10] T. Yoshioka, A. Sehr, and M. Delcroix, "Making machines understand us in reverberant rooms: Loud and clear fundamental technologies in modern speech recognition," in *Proc. IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 1, Nov. 2012.
- [11] D. Kammer, G. McNutt, B. Senese, and J. Bray, *Bluetooth - Application Developer's Guide: The Short Range Interconnect Solution*. MA, USA: Syngress Publishing, Inc., 2002.
- [12] A. Huang and L. Rudolph, *Bluetooth - Essentials for Programmers*. New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [13] T. Chen, L. Jingtai, and Z. Bin, "Time synchronization in acoustic localization system based on wireless sensor network," in *Proc. IEEE 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, vol. 1, 2010, pp. 35–40.
- [14] C. Dennis, J. Emil, and M. Aleksandar, "Time synchronization in wireless sensor networks," in *Proc. IEEE 37th Southeastern Symposium on System Theory*, vol. 3, 2005, pp. 135–138.



Enrique V. Carrera (M'99) recibió su título de Ingeniero en Electrónica en el año 1992 por parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Recibió también en 1996 el grado de Máster en Ingeniería Eléctrica por parte de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro, Brazil. En 1999, recibió el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería en Sistemas por parte de la Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brazil. Se unió al Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Rutgers, Estados Unidos, como asociado postdoctoral desde el año 2000 hasta el año 2004. Actualmente es Profesor Asociado en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Ecuador. Sus intereses de investigación incluyen sistemas distribuidos, computación ubicua e inteligencia artificial.



Daniel Altamirano nació en Quito, en julio de 1985. Recibió su título de Ingeniero en Electrónica por parte de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE), Ecuador en el año 2008. Recibió también el grado de Máster en la Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP), Brasil en el 2012. Actualmente es Profesor Asociado en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Ecuador. Sus áreas de investigación incluyen comunicaciones inalámbricas, transmisión digital y códigos de corrección de error.



María Salomé Pérez nació en Quito, Ecuador en 1990. Recibió el título de Bachiller General en Ciencias en el año 2008 por parte del Colegio Federico Engels, Ecuador. Culminó los estudios de certificación Cisco-CCNA v4.0 en el año 2011. En el 2013 realizó una estancia de investigación en el Departamento de Comunicaciones Inalámbricas y Movilidad del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey - México, en el proyecto titulado *Position Location* en Ambientes Inalámbricos. Actualmente es egresada de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Ecuador. Sus intereses de investigación incluyen inteligencia artificial, técnicas y algoritmos de posicionamiento, procesamiento de señales acústicas, redes de sensores inalámbricos y reconocimiento biométrico.

niería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Ecuador. Sus intereses de investigación incluyen inteligencia artificial, técnicas y algoritmos de posicionamiento, procesamiento de señales acústicas, redes de sensores inalámbricos y reconocimiento biométrico.