

# Análisis y Comparación de Algoritmos de Localización en Redes Inalámbricas de Sensores

***Iván E. Faudo***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología  
Av. Del Charro 450 Nte. Col. Partido Romero, C.P. 32310, (656) 688-21-00 ext. 4781  
*ivandeell@hotmail.com*

***Juan Cota-Ruiz***

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología  
Av. Del Charro 450 Nte. Col. Partido Romero, C.P. 32310, (656) 688-21-00 ext. 4781  
*jcota@uacj.mx*

***Francisco Javier Enríquez Aguilera***

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología  
Av. Del Charro 450 Nte. Col. Partido Romero, C.P. 32310, (656) 688-21-00 ext. 4781

***David García Chaparro***

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología  
Av. Del Charro 450 Nte. Col. Partido Romero, C.P. 32310, (656) 688-21-00 ext. 4781

***Pablo Rivas Perea***

Department of Computer Science, Baylor University, One Bear Place #97356, Waco, TX 76798.

## Resumen

En este trabajo se presenta un análisis y comparación de diferentes algoritmos para la localización de sensores. Para la evaluación de los algoritmos, se simuló una red inalámbrica de sensores en MATLAB. Esta consiste de un área delimitada de 100m x 100m en donde se distribuyeron aleatoriamente 100 sensores con rango parcial para su localización. Las distancias estimadas entre sensores se hicieron bajo la técnica Received Signal Strength. Para la estimación inicial de la posición, cada sensor utilizó la

distancia estimada con cuatro anchors integrados en la red, así como también la posición conocida de estos. Posteriormente cada sensor utilizó la técnica Least Square para finalmente obtener la posición inicial. Una vez que cada sensor en la red estimó su posición inicial, se utilizó dicho conjunto de posiciones iniciales como punto de inicio para los diferentes algoritmos a ser analizados. El desempeño de cada algoritmo fue evaluado con base en la relación precisión versus número de iteraciones empleadas. Los resultados obtenidos muestran que los algoritmos iterativos optimizados son más eficientes en precisión y número de iteraciones. Entre los algoritmos de localización analizados se encuentran: LeastSquare, Min-Max, Spatially-Constrained Local Problems, Push-Pull Estimator y Levenberg-Marquardt.

**Palabras Claves:** Algoritmos de localización, ReceivedSignalStrength (RSS), Wireless sensor networks.

## 1. Introducción

Las redes de sensores inalámbricas (WSN's por sus siglas en inglés) consisten en un gran número de sensores los cuales han sido intencionalmente desplegados en un área determinada para desempeñar alguna aplicación específica. Los sensores se encuentran interconectados a través del medio inalámbrico compartiendo información [1].

La revista TechnologyReview del Instituto de Tecnología de Massachusetts anunció que las redes de sensores inalámbricas es una de las 10 tecnologías emergentes que cambiarán el mundo [2]. Se predice que en un futuro cercano, las WSN podrán observar casi todo, incluyendo monitoreo ambiental, tráfico, actividad sísmica, movimientos de tropas en los campos de batalla, tensiones en edificios y puentes, monitoreo de la salud, procesos industriales, seguimiento de objetos, detección de desastres naturales, casas inteligentes y aplicaciones militares por mencionar algunas [3]. En tales aplicaciones, la posición geográfica o correcta localización de los sensores juega un rol esencial ya que nos permite determinar donde y cuando ocurrió un evento. Una vez que los sensores han sido desplegados en un área determinada, la localización geográfica se vuelve una tarea

importante dentro de una WSN. La localización es un proceso que le permite al sensor determinar cuál es su ubicación geográfica [4].

Una primera aproximación para solucionar el problema de localización en los sensores es usar dispositivos GPS (Global Positioning System) en cada sensor. Los GPS tienen la capacidad de estimar la posición geográfica con tan solo unos centímetros de error [5]. Este método puede ser una buena opción en los sistemas de localización, gracias a la exactitud que puede proporcionar. Pero por otra parte, integrar un GPS en cada sensor deja de ser práctico debido a que incrementan el tamaño del sensor, el costo, consumo de energía y además de requerir una vista directa entre el sensor y los satélites [4]. En resumen, la opción del GPS para localización se vuelve una cuestión impráctica por las razones anteriormente descritas. Es por este motivo que se ha hecho énfasis en la búsqueda de nuevos métodos que permitan la localización de los sensores de una manera más eficiente y precisa.

Una manera más viable desde el punto de vista costo-energía consiste en equipar una fracción de los sensores desplegados con GPS (estos sensores son descritos como sensores de referencia o anchors) y el resto de los sensores (descritos como sensores desconocidos) deben estimar su posición geográfica utilizando información proveniente del medio inalámbrico.

Los sensores desconocidos comúnmente estiman su posición inicial usando la siguiente información:

- Las distancias con al menos tres anchors.
- La posición de los anchors seleccionados.
- Algoritmo de localización.

Dentro de las diferentes técnicas para la estimación de distancias se pueden encontrar: tiempos de llegada (ToA), tiempos diferencial de llegada (TDoA), ángulos de llegada (AoA) y potencia de la señal recibida (RSS) [6], [7], [8], [9].

El proceso de localización puede ser desempeñado ya sea en cada sensor desconocido (manera distribuida) o en un solo nodo sensor (manera centralizada). La elección puede ser determinada por factores como: limitación de recursos en los sensores, algoritmos de localización empleados ó condiciones de seguridad requeridas.

En años recientes se han reportado diversos algoritmos de localización. En [10] se muestra un escenario real sobre la implementación física de una WSN, en donde se hace una comparación entre diferentes algoritmos de localización para determinar la posición estimada de un sensor desconocido. En [11] se puede observar un experimento, en el cual se emplea un algoritmo denominado Min-Max. Este algoritmo estima la posición de un sensor desconocido con una precisión cercana al método de LeastSquare (LS), pero con la diferencia de que se reduce la complejidad de computación. Por otro lado, en [12], se presenta un algoritmo distribuido, basado en la fórmula de bilateración. Este algoritmo permite estimar las posiciones iniciales de los sensores desconocidos, donde cada sensor estima la distancia hacia los anchors. Posteriormente encuentra las intersecciones entre círculo-círculo (CCI). Finalmente, la estimación inicial se resuelve por formulaciones puramente geométricas.

En esta investigación se presenta un análisis de diferentes algoritmos de localización. El análisis evalúa la precisión de las posiciones estimadas así como también el número de iteraciones que requiere cada algoritmo para alcanzar el mínimo error en las posiciones estimadas.

Este trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presentan las diferentes técnicas para la estimación de las distancias. En la sección 3 se describe matemáticamente el problema de localización. En la sección 4 define un caso de estudio de una WSN, la cual contiene cerca de 100 sensores que son desplegados arbitrariamente, en un área de 100x100m. En la sección 5 se analizan los resultados obtenidos de los algoritmos de localización en base al caso de estudio propuesto. Finalmente se presentan las conclusiones en la sección 6.

## 2. Técnicas para la estimación de distancias y localización de sensores

La estimación de la distancia entre dos sensores puede ser obtenida básicamente por el intercambio de señales entre los sensores. Las diferentes técnicas de estimación de distancia se basan en cuatro principales tecnologías de comunicación inalámbrica: radiofrecuencia, infrarrojo, ultrasonido y señales acústicas [13]. Como se mencionó en la sección anterior las cuatro técnicas para la estimación de distancias son: ToA, TDoA, AoA y RSS. En la medición por ToA y TDoA, la estimación puede ser obtenida midiendo el tiempo de vuelo  $ToF$  entre un sensor  $S_i$  y un sensor  $S_j$ . Una vez conocido el  $ToF$  entre los sensores y la velocidad a la que viaja la señal  $V_p$  se puede estimar la distancia como lo muestra la siguiente ecuación:

$$d_{ij} = ToF * V_p \quad (1)$$

En esta primera aproximación no se toman en cuenta diversos factores ambientales como son el ruido, atenuación en las señales, señales de trayectoria múltiple, tiempos de retardo ( $T_D$ ) entre otros. Además estas técnicas de estimación de distancia requieren de hardware especial en los sensores incrementando su costo [6].

En la técnica de AoA, la medición del ángulo de llegada de la señal es obtenida mediante arreglos múltiples de antenas. Posteriormente se le aplica un procesamiento para extraer el ángulo. Sin embargo, cada antena del arreglo requiere calibración periódica y la resolución de los ángulos se puede ver limitada por el tamaño de la antena. Algoritmos de procesamiento y diversas implementaciones hacen que este método sea costoso y muy lento para la estimación de la distancia [8].

Por último, existe una técnica muy conocida denominada RSS, esta técnica se ha vuelto muy popular ya que no requiere de hardware especial y se encuentra de manera embebida en diferentes nodos sensores (*XBee*, *MicaMote*, *MicaZ*, *Rene node*, etc). Al igual que en las técnicas anteriores que buscan obtener la distancia  $d_{ij}$  entre un sensor  $S_i$  y un sensor  $S_j$ , esta técnica utiliza la potencia de la señal recibida del sensor  $S_i$  al  $S_j$  ( $P_{ij}$ ) para poder estimar la distancia. Como primera aproximación y considerando el

espacio libre se puede asumir un modelo en el cual la señal de potencia disminuye de una manera que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia  $1/d_{ij}^2$ .

Un entorno más real, puede asumir que la señal se puede ver afectada por un factor  $1/d_{ij}^{\eta\rho}$ , donde  $\eta\rho$  se le llama el factor de atenuación y es dependiente a factores geométricos y ambientales (tales como reflexión, difracción, atenuación y dispersión). Su valor práctico fluctúa entre 2 y 4 [14].

En este trabajo de investigación se asume el siguiente modelo matemático para la estimación de distancias basadas en RSS:

$$P^{ij} = P_0(d_0) - 10\eta\rho \log_{10} \left( \frac{d_{ij}}{d_0} \right) + \sigma_{SH} = \bar{P}^{ij} + X_\sigma \quad (2)$$

Donde  $P^{ij}$  es la potencia recibida en el sensor  $s_j$  proveniente del  $s_i$  (medido en dBm).  $P_0(d_0)$  Es una potencia de referencia a una distancia  $d_0$  del transmisor (típicamente  $d_0 = 1 m$ ).  $X_\sigma$  es una variable aleatoria con distribución Gaussiana. Esta presenta un valor esperado de cero y una desviación estándar  $\sigma_{SH}$  para casos de shadowing. Por consecuente, las mediciones de potencia siguen una distribución logarítmica Gaussiana como muestra a continuación:

$$P^{ij} \sim \mathcal{N}(\bar{P}^{ij}, \sigma_{SH}) \quad (3)$$

Donde  $\bar{P}^{ij}$  es el valor esperado de la potencia recibida en dBm. De las ecuaciones (2) y (3) se puede estimar la distancia  $d_{ij}$  como:

$$d_{ij} = d_0 10^{\frac{P_0(d_0) - P_{ij}}{10\eta\rho}} \quad (4)$$

Las distancias estimadas entre anchor-sensor  $R_{ik}$  y sensor-sensor  $r_{ij}$  son herramientas fundamentales en el proceso de localización. La localización es llevada a cabo mediante la utilización de algoritmos, los cuales emplean las distancias estimadas provenientes de los sensores. Estos algoritmos de localización permiten que cada sensor pueda ubicar su posición dentro de la red. La precisión de las posiciones estimadas obtenidas por los sensores puede variar en función del error de las distancias obtenidas y el tipo de algoritmo empleado. Dentro de los algoritmos de localización se pueden encontrar de dos

tipos: optimizados y no optimizados. Los algoritmos optimizados son utilizados principalmente para encontrar el mínimo error en las posiciones estimadas en el menor número de iteraciones posibles, de manera que se tenga una rápida velocidad de convergencia. Por otro lado, los algoritmos no optimizados por lo general se basan centralmente en formulas y por lo común no son iterativos ya que no maximizan o minimizan alguna función [15].

En esta investigación se analiza el desempeño de cinco algoritmos utilizados para la localización de sensores. El primer algoritmo a analizar es el Levenberg-Marquardt (LM), este algoritmo se basa en el método de Newton o gradientes descendientes para resolver funciones no lineales de manera iterativa utilizando las técnicas de Least-Square [12].

El segundo algoritmo es el Push-Pull Estimation (PPE). Este es un método geométrico, el cual usa las diferencias entre las distancias medidas y las distancias euclidianas actuales modelando un sistema de fuerzas vectoriales, de tal manera que el error de las posiciones estimadas se ve reducido gradualmente [25]. El tercer método de localización es el Distributed Spatially-Constrained Local Problems (DSCL). También es un método geométrico-iterativo el cual crea un área discreta imaginaria y delimitada alrededor de la posición a estimar con el fin de reducir el error de las posiciones [16]. Por otro lado, el método Min-Max se basa en la idea de construir cuadrados alrededor del sensor a ubicar y la posición del sensor es el centro de la intersección de las cajas construidas alrededor del mismo [11]. Por último, el Least-Square (LS) es un método utilizado comúnmente para la solución de ecuaciones matriciales lineales. Este método utiliza la trilateración para estimar la posición del sensor [26].

## **2. Descripción del problema**

Como se describe en el trabajo de investigación [19], la descripción del problema de localización en WSN puede ser descrita de la siguiente manera.

Considere un conjunto de  $N$  sensores  $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ , los cuales son desplegados arbitrariamente sobre un área específica, cuyas posiciones geográficas se desconocen y

deberán ser estimadas. Asumiendo un escenario en dos dimensiones (2D), considere  $\mathbf{z}_i = [z_{x_i}, z_{y_i}]^T$  como la posición verdadera pero desconocida del sensor  $s_i$  y a su vez  $\mathbf{p}_i = [p_{x_i}, p_{y_i}]^T$  como su posición estimada. Por otra parte se asume que un número de  $M$  anchors  $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}$  son desplegados en la misma área y cuentan con tecnología GPS para su localización automática. La ubicación de un anchor  $a_k$  se representa por las coordenadas  $\mathbf{q}_k = [q_{x_k}, q_{y_k}]^T$ . Para cuestiones prácticas, comúnmente se tiene que  $M \ll N$  con  $M > 2$ .

En este trabajo de investigación se considera que cada sensor puede estimar la distancia con sensores que se encuentran dentro de su área de cobertura usando técnicas como: ToA, RSS o AoA. Por lo que la distancia estimada entre un sensor  $s_i$  y un sensor  $s_j$  puede ser denotada como:

$$r_{ij} = r_{ji} = d_{ij} + e_{ij} \quad (5)$$

Donde  $d_{ij} = \|\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_j\|$ ,  $\|\cdot\|$  es la distancia euclidiana y  $e_{ij}$  representa el error introducido por el ruido ambiental y la distorsión de propagación. De igual manera, la estimación de distancia entre un sensor  $s_i$  y un anchor  $a_k$  puede ser definida como:

$$R_{ik} = R_{ki} = d_{ik} + e_{ik} \quad (6)$$

Donde  $d_{ik} = \|\mathbf{z}_i - \mathbf{q}_k\|$ . También se asume que todos los sensores tienen un número limitado de sensores vecinos delimitados por el área de cobertura y en la vecindad de  $s_i$ . Así que

$$\mathcal{S}_i = \{j \mid \|\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_j\| < \gamma\} \quad (7)$$

Define el conjunto de distancias conocidas por el sensor  $s_i$  hacia sus nodos vecinos. De la misma manera

$$\mathbf{A}_i = \{k \mid \|\mathbf{z}_i - \mathbf{q}_k\| < \rho\} \quad (8)$$

Define el conjunto de distancias conocidas por el sensor  $s_i$  y sus anchors vecinos también limitados por un área de cobertura  $\rho$ .

Entonces, el problema de localización consiste en la estimación de la posición  $\mathbf{p}_i$  para cada sensor  $s_i$ , de tal manera que la distancia euclidiana de dichas posiciones se minimicen con las correspondientes distancias estimadas para cada  $r_{ij}$  y  $R_{ik}$ . El problema de localización puede ser formulado matemáticamente como se muestra en la siguiente ecuación [17, 21],

$$\min_{\mathbf{L}} \sum_{i \in S} \left( \sum_{j \in S_i} \left| \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| - r_{ij} \right| + \sum_{k \in A_i} \left| \|\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_k\| - R_{ik} \right| \right) \quad (9)$$

Donde  $\mathbf{L} = \{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N\}$  representa el conjunto de posiciones a ser minimizadas. La ecuación (9) describe un problema no lineal y no convexo [22,23], el cual comúnmente es resuelto por medio de algoritmos optimizados o iterativos.

### 3. Análisis y simulación de una red inalámbrica de sensores a gran escala

Para comprobar la precisión y eficiencia de los diferentes algoritmos de localización que se analizarán en esta sección, se propuso un caso de estudio en el cual se diseñó una red con 100 sensores en MATLAB, los cuales tienen posiciones fijas durante el proceso de localización. Los sensores fueron desplegados aleatoriamente en un área delimitada de 100x100m en dos dimensiones como lo muestra la Fig.1.

La red propuesta contiene  $M=4$  anchors no-colineales y  $N=96$  sensores desconocidos. Los anchors fueron seleccionados estratégicamente (los cuales se conforman de los nodos 44, 49, 84 y 87) y están representados por “▲” y los sensores desconocidos por “●”. Los cuatro anchors seleccionados son no-colineales, esto se debe a que si todos los anchors se encuentran en la misma dirección, los algoritmos de localización tendrán un valor indeterminado y no podrán converger en una solución óptima. La colinealidad y no colinealidad puede visualizarse de manera más clara en la Fig. 2.

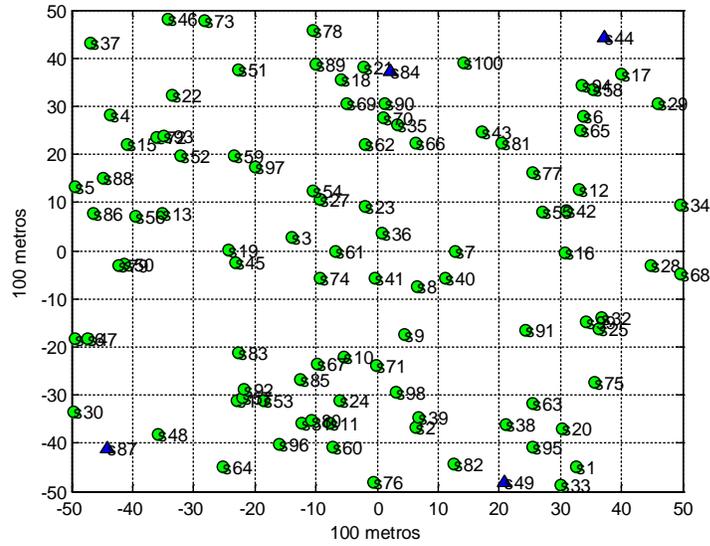


Fig. 1. Red inalámbrica de sensores constituida por 96 sensores desconocidos y cuatro anchors representados por el símbolos “●” y “▲” respectivamente.

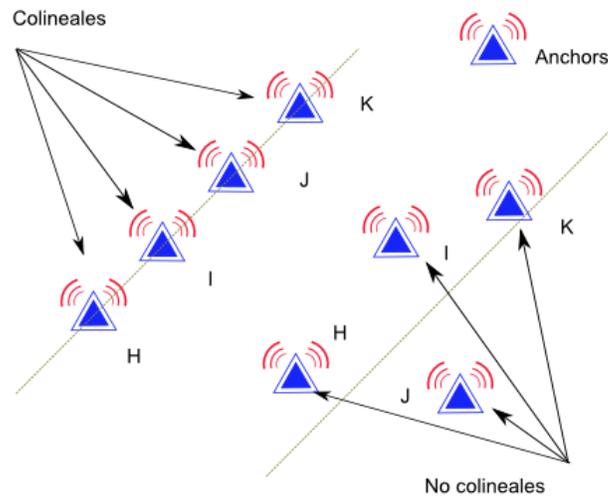


Fig. 2. Representación de la colinealidad y no-colinealidad entre anchors.

Otra característica que mantienen los anchors, es la conectividad directa (single-hop) que sostienen con cada uno de los sensores desconocidos. Donde la información entre anchor-sensor no requiere de intermediarios para poder intercambiar información entre sí mismos. Para los sensores desconocidos, la conectividad que mantienen entre ellos es de forma parcial. Esto quiere decir que el área de cobertura se ve limitado en cada sensor como lo define la ecuación (8), de manera que no se tiene un alcance completo con todos los sensores de la red, proponiéndose para ello un radio de  $R=30\text{m}$  circular (o isotrópico) para cada uno de ellos.

Con las posiciones verdaderas  $\mathbf{z}_i = [z_{x_i}, z_{y_i}]^T$ , se obtienen las distancias euclidianas (distancias verdaderas) entre todos los nodos de la red. Sin embargo, estas distancias entre sensor-sensor y anchor-sensor en escenarios más realísticos se ven afectadas por ruido ambiental, tal y como se muestra en las ecuaciones (5) y (6) respectivamente. Para la simulación de las distancias en MATLAB, se utilizó el modelo de RSS, el cual agrega ruido gaussiano para poder simular un entorno cercano a condiciones más prácticas como puede apreciarse en las ecuaciones (2), (3) y (4). Se seleccionaron parámetros prácticos para  $\eta_\rho$  y  $X_\sigma$  de 2.6 y 6 respectivamente. Así mismo se escogió un valor  $P_0(d_0)=-40\text{dBm}$  para estimar las distancias entre sensor-anchor y un valor  $P_0(d_0)=-22.2\text{dBm}$  para estimación de distancias entre sensor-sensor. Estos valores fueron obtenidos asumiendo que los anchors tienen tecnología XBee-PRO (Potencia de transmisión =60mW) y los sensores desconocidos tienen tecnología XBee (Potencia de transmisión =1mW) [22]. De esta manera  $P_0(d_0)$  fue obtenida por la fórmula de Friis como lo muestra la siguiente ecuación [23], [24]

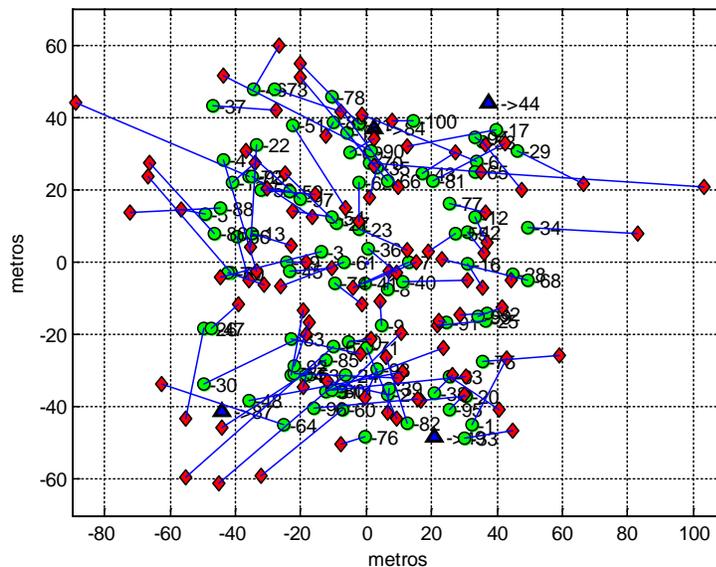
$$P_0(d_0) = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{L(4\pi d_0)^2} \quad (10)$$

Se asume que  $L = G_T = G_R = 1$  y la frecuencia de operación de los XBee es de  $f = 2.4 \text{ GHz}$  por lo que  $\lambda = c/f=0.125\text{m}$ . Finalmente se simularon las distancias entre sensor-sensor  $r_{ij}$  y sensor-anchor  $R_{ik}$ .

Enseguida se procedió a obtener las posiciones iniciales de los sensores desconocidos utilizando las distancias entre sensor-antor  $R_{ik}$ , para esto se utilizó la fórmula del LeastSquare (LS) [26]. Como se aprecia en la Fig. 3 las posiciones estimadas (marcadas con el símbolo "♦") difieren en gran medida de las posiciones verdaderas (marcadas con el símbolo "●"). Para determinar el error general de las posiciones estimadas se utilizó la métrica del Root Mean Square Error (RMSE) como lo describe la ecuación siguiente:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|p_i^\ell - z_i\|^2} \quad (11)$$

Donde  $p_i^\ell$  representa la estimación de la posición del sensor  $s_i$  (con  $\ell = 0$  indicando la iteración cero o posición inicial). El RMSE obtenido de las posiciones iniciales con el método LS fue de 24.59m.



**Fig. 3. Red inalámbrica de sensores en la cual se han estimado las posiciones iniciales de 96 sensores por medio del método del LS en donde las posiciones estimadas se**

representan por el símbolo "♦", posiciones verdaderas por el símbolo "●" y los anchors como "▲".

Una vez obtenidas las posiciones iniciales de cada uno de los sensores se define una etapa de refinamiento para mejorar las posiciones estimadas. En esta etapa, se eligieron los siguientes algoritmos de localización para su análisis y comparación: *LS*, *Min-Max* [11], *Push-Pull Estimator (PPE)* [25], *Distributed Spatially-Constrained Local Problems (DSCL)* [16] y *Levenberg-Marquardt (LM)* [12]. Cada algoritmo iniciara un proceso iterativo el cual actualizará la posición de cada sensor  $s_i$  en cada iteración y esta se detendrá hasta cumplir 100 iteraciones ( $\ell = 100$ ). Para cada iteración se obtiene el RMSE y se analiza el comportamiento de cada algoritmo. En la Fig. 4 se muestra el RMSE de cada iteración para cada uno de los algoritmos analizados.

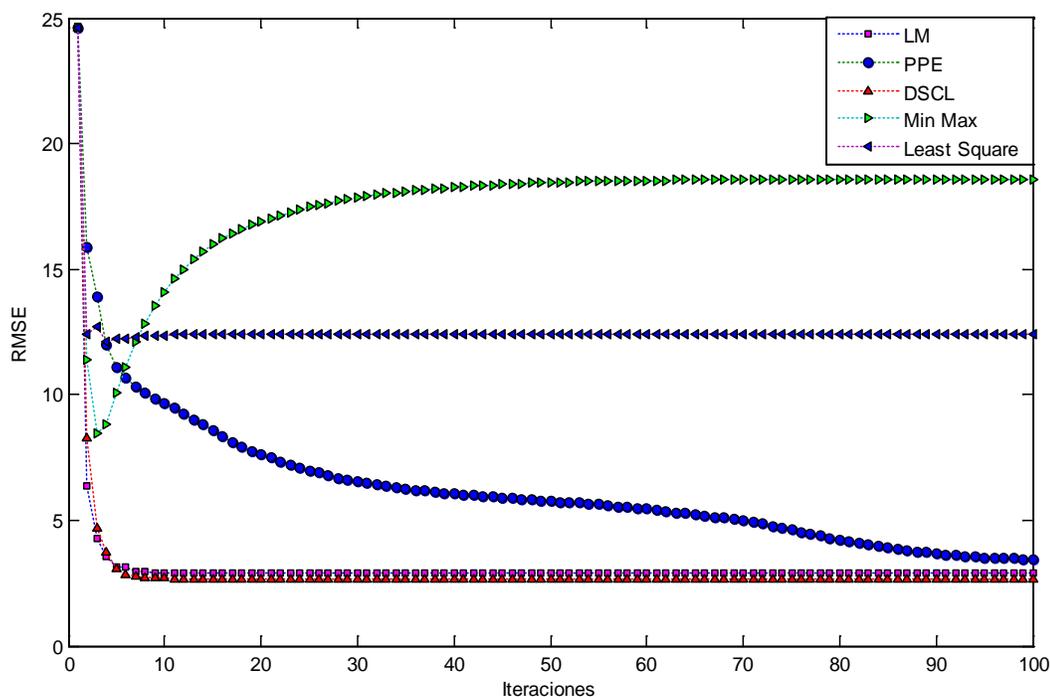


Fig. 4. Comparación de los desempeños obtenidos con la métrica RMSE para los algoritmos LM, PPE, DSCL, Min-Max y LS. Todos los algoritmos parten de la misma posición inicial con un RMSE=24.59m.

### 3. Análisis y discusión de resultados

Claramente se puede apreciar en la Fig. 4 el comportamiento de cada uno de los algoritmos utilizados en función del RMSE y el número de iteraciones propuestas. El método Min-Max presenta grandes desventajas en cuestión de las posiciones estimadas ya que al paso de tres iteraciones alcanza un error mínimo de 8.47m, pero conforme aumentan las iteraciones el error de la estimación se comienza a incrementar de manera exponencial llegando a un valor final de 18.59m. Para el caso del algoritmo LS, se presentó una reducción respecto a las posiciones iniciales estimadas, el cual ronda cerca del 50% con un RMSE=12.42m, mostrando una mejoría en comparación a los resultados obtenidos por el método Min-Max. Mas sin embargo, para cuestiones prácticas este error continúa siendo muy grande.

El algoritmo PPE conforme aumenta el número de iteraciones demuestra muy buenos resultados en cuestión de las posiciones estimadas, alcanzando un RMSE=3.43m después de 100 iteraciones. Pero como se puede apreciar en la Fig. 4 el error en las posiciones estimadas disminuye progresivamente implicando una lenta velocidad de convergencia hacia el mínimo RMSE.

Una importante mejoría en las posiciones estimadas y velocidad de convergencia se presentan en los algoritmos LM y DSCL. Como se puede apreciar en la Fig. 3 estos algoritmos requieren alrededor de 10 iteraciones para alcanzar el mínimo RMSE de 2.88m y 2.68m respectivamente. Ligeramente el algoritmo DSCL presenta mejores resultados por tan solo unos centímetros de error. En la tabla 1 se presenta un resumen del RMSE final y del número de iteraciones que requirió cada algoritmo analizado para alcanzar dicho RMSE final.

Algoritmo	LM	PPE	DSCL	Min-Max	LS
-----------	----	-----	------	---------	----

<b>RMSE</b>	2.88m	3.43m	2.68m	18.59m	12.42m
<b>Iteraciones</b>	10	100	10	100	12

**Tabla 1. Mínimo número de iteraciones requeridas por cada algoritmo para alcanzar el mínimo error en las posiciones estimadas.**

#### **4. Conclusiones**

En este trabajo de investigación se han evaluado y comparado algoritmos de localización optimizados y no optimizados. Como se pudo apreciar en la sección de análisis y resultados, los algoritmos LM, PPE y DSCL mostraron una mayor eficiencia tanto en precisión como en velocidad de convergencia al estimar las posiciones de los sensores desconocidos. Por otro lado, los algoritmos como el LS y Min-Max (los cuales son basados en fórmulas) mostraron poca precisión en las posiciones estimadas, sin embargo, estos algoritmos se utilizan comúnmente cuando la precisión en las posiciones estimadas no es un factor determinante. Por ejemplo, comúnmente a estos algoritmos se les usa como estimadores iniciales para algoritmos de refinamiento. Como trabajo futuro se pretende simular el comportamiento de los algoritmos utilizando un conjunto de redes independientes, las cuales tengan variaciones en las posiciones de los anchors, distribución de los sensores, tamaño de la red, así como también otras metodologías para la estimación de las distancias. También se pretende analizar y evaluar los un futuro cercano los algoritmos anteriormente mencionados utilizando una red de sensores real o en su defecto utilizar acceso virtual a redes inalámbricas de sensores que son proporcionadas por diferentes centros de investigación como puede ser IoT-LAB, Indriya o Wisebed. Por último se contempla como trabajo inmediato, el incluir análisis

computacional de los algoritmos, el consumo de energía derivado de las transmisión-recepción y tiempo de procesamiento.

## 5. Referencias

- [1] X. Chen and P. Yu, "Research on hierarchical mobile wireless sensor network architecture with mobile sensor nodes," 2010 3rd Int. Conf. Biomed. Eng. Informatics, no. Bmei, pp. 2863–2867, Oct. 2010.
- [2] Paginaoficial de technology and review (2014, Marzo) [online] Disponible <http://www.technologyreview.com/>
- [3]N. Akshay, M. P. Kumar, B. Harish, and S. Dhanorkar, "An efficient approach for sensor deployments in wireless sensor network," Interact-2010, pp. 350–355, Dec. 2010.
- [4] WalteneagusDargie and Christian Poellabauer. Fundamentals of wireless sensors networks: Theory and practice, Wiley, 2010.
- [5]H. Kim, C. Park, Y. Cho, C. Shin, J. Park and D. Park., "A study on a Ratiometric GPS iteration Algorithm for indoor Localization", 2012 7th International Conference on Computing and Convergence Technology (ICCCT), pp. 32-35, 2012.
- [6] S. K. Meghani and M. Asif, "Localization of WSN Node based on RTT ToA using Ultra Wide Band & 802.11S. 4a Channel Rangel," pp. 380–385, Dec. 2014.

- [7] P. Singh and S. Agrawal, "TDOA Based Node Localization in WSN Using Neural Networks," 2013 Int. Conf. Commun. Syst. Netw. Technol., pp. 400–404, Apr. 2013.
- [8] Y. S. Lee, J.-M. Lee, S. S. Yeo, J. H. Park, and L. Barolli, "A Study on the Performance of Wireless Localization System Based on AoA in WSN Environment," 2011 Third Int. Conf. Intell. Netw. Collab. Syst., vol. 1, pp. 184–187, Nov. 2011.
- [9] X. He and Y. Wang, "A LSSVR Three-dimensional WSN Nodes Location Algorithm Based on RSSI," pp. 1889–1895, 2011.
- [10] R. Ioana, A. Gontean and L. Crisan. Wireless Sensor Network Localization Scenario, IEEE 18th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2012, pp. 263-266.
- [11] T. Pavani, G. Costa, M. Mazzotti A. Conti; D. Dardari. Experimental Results on Indoor Localization Techniques through Wireless Sensors Network, IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring , 2006, VOL. 2, pp .663-667.
- [12] J. Cota-Ruiz, J. G. Rosiles, E. Sifuentes, and P. Rivas-Perea, "A low complexity geometric bilateration method for localization in wireless sensor networks and its comparison with least-squares methods," *Sensors*, vol. 12, no. 1, pp. 839–862, 2012.
- [13] Jessica Feng Sanford, Miodrag Potkonjak and Sasha Slijepcevic. Localization in wireless networks: Foundations and Applications, Springer, 2012.
- [14] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero III, R. L. Moses, and N. S. Correal, "Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks ," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 54–69, Jul. 2005.
- [15] J. Nocedal and S. J. Wright, Numerical Optimization. New York, USA: Springer-Verlag, 2006.

- [16] J. Cota. J. G. Rosiles. P. Rivas. E. Sifuentes. A Distributed Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks Based on the Solutions of Spatially-Constrained Local Problems. *IEEE sensors journals*, Vol. 13, No. 6, pp. 2181 – 2191, June 2013.
- [17] P. Biswas, T. C. Liang, K. C. Toh, Y. Ye, and T. C. Wang, “Semidefinite programming approaches for sensor network localization with noisy distance measurements,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 3, no. 4, pp. 360–371, Oct. 2006.
- [18] J. Nie, “Sum of squares method for sensor network localization,” *Comput. Optim. Appl.*, vol. 43, no. 2, pp. 151–179, 2009.
- [19] B. H. Cheng, L. Vandenberghe, and K. Yao, “Distributed algorithm for node localization in wireless ad-hoc networks,” *ACM Trans. Sensor Netw.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–20, 2009.
- [20] M. W. Carter, H. H. Jin, M. A. Saunders, and Y. Ye, “SpaseLoc: An adaptive subproblem algorithm for scalable wireless sensor network localization,” *SIAM J. Optim.*, vol. 17, no. 4, pp. 1102–1128, 2007.
- [21] J. A. R. Azevedo and F. E. Santos, “Signal propagation measurements with wireless sensor nodes,” *Campus da Penteadada, Univ. Madeira, Funchal, Portugal*, Tech. Rep. 9000-390, 2007.
- [22] A. Note. (2014, Mayo.). XBee and xBee-PRO RF Modules [Online]. Disponible: <http://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>
- [23] J. A. Costa, N. Patwari, and A. O. Hero, “Distributed Weighted multidimensional scaling for node localization in sensor networks,” *ACM Trans. Sensor Netw.*, vol. 2, no. 1, pp. 39–64, Feb. 2006.
- [24] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, vol. 207. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1996.

- [25] V. H. Dang, V. D. Le, Y. K. Lee, and S. Lee, "Distributed push-pull estimation for node localization in wireless sensor networks," *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 71, no. 3, pp. 471–484, 2011.
- [26] R. Verdone. D. Dardari. G. Mazzini. A. Conti. *Wireless Sensor and Actuator Networks: Technologies, Analysis and Design*. Academic Press, 2008.

## **6. Autores**

Ivan E. Faudoa es estudiante de decimo semestre de la carrera en Ingeniería de Sistemas Digitales y Comunicaciones en la UACJ. Ha participado en eventos como la XIX semana de la ingeniería de la UACJ y el congreso ELECTRO de Chihuahua. Sus áreas de interés son Redes Inalámbricas de Sensores, Diseño de circuitos ASIC, Instrumentación y Sistemas de Adquisición de Datos.

Dr. Juan Cota-Ruiz es profesor-investigador en la UACJ, obtuvo su Doctorado en la Universidad de Texas en El Paso (UTEP) en 2011 y su Maestría en el Instituto Tecnológico de Chihuahua en el 2003. El Dr. Cota ha publicado en revistas nacionales e internacionales en el área de Wireless Sensor Networks. Sus áreas de interés son Redes Inalámbricas de Sensores, Optimización Numérica, Instrumentación, Control y DSP.

Dr. Pablo Rivas-Perea obtuvo su Doctorado en UTEP, El Paso, Texas en 2011 y su Maestría en el Instituto Tecnológico de Chihuahua. Ha trabajado en la industria por 8 años, recientemente hizo un verano de investigación en la NASA y actualmente se encuentra haciendo un Post-Doctorado en el Departamento de Ciencias Computacionales en la Universidad de Baylor, en Waco, Texas.

M. en C. Francisco Javier Enríquez Aguilera es profesor-investigador en la UACJ, obtuvo su maestría en Electrónica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Sus áreas de interés son DSP, FPGA, Adquisición de Datos, Instrumentación y Control.

M. en C. David Garcia Chaparro. Es profesor en la UACJ. Actualmente es el coordinador de la Ingeniería de Sistemas digitales y comunicaciones. Sus áreas de interés se centran en diseño de circuitos digitales, Microelectrónica y Comunicaciones.