INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

“Evaluación de desempeño de algoritmos de localización a un salto en escenarios reales.”

José Alfredo Lopez Urrea

ID: 19705

Asesor:

Dra. Erica Cecilia Ruiz Ibarra

Cd. Obregón, Sonora; Noviembre, 2015.

Índice

Capítulo I. 5
1.1. Antecedentes 5
1.2. Problema 7
1.3. Justificación 8
1.4. Objetivo 9
1.4.1. Objetivos específicos: 9
1.5. Alcances 10
1.6. Hipótesis 10
1.7. Limitaciones 10
Capítulo II 11
2.1. Introducción 11
2.2. Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN). 11
2.3. Redes Inalámbricas de Sensores (WSN) 12
2.3.1. Características 13
2.3.2. Aplicaciones 13
2.3.3. Retos de diseño 14
2.4. Problema de Localización 15
2.4.1. RSS/RSSI 16
2.4.2. Modelo de propagación 17
2.4.3. Estimación Maximum Likelihood de los Parámetros del Modelo Log-Normal 18
2.4.4. Estimador de Distancia Log-Normal 18
2.5. Clasificación de localización 19
2.6. Algoritmos de localización a 1 salto 21
2.6.1. Algoritmo de Centroide CL 21
2.6.2. Algoritmo de Centroide WCL 21
2.6.3. Algoritmo de Centroide RWL 22
2.6.4. Algoritmo de Centroide REWL 23
2.6.5. Algoritmo de Centroide con Sistemas Difusos 25
Capítulo III 28
3.1. Procedimiento 28
3.2. Materiales y herramientas 30
3.3. Sujetos 31

Capítulo IV 32
4.1.1. Parámetros del Desempeño. 33
4.1.2. Descripción del Primer Escenario de Evaluación. 33
4.1.3. Análisis del Desempeño de Algoritmos libres de distancia bajo escenario 1. 35
4.1.4. Análisis del Desempeño de Algoritmos basados en distancia bajo escenario 1. 40
4.1.5. Análisis del Desempeño de los Algoritmos Analizados bajo escenario 2. ... 45
Capítulo V 48
5.1. Patrón de radiación 48
5.2. Descripción del sistema de localización 50
5.3. Procedimiento de localización 51
5.4. Evaluación en escenarios reales 51
5.4.1. Evaluación de algoritmos de localización en interiores 51
5.4.2. Evaluación de algoritmos de localización en exteriores 51
5.5. Comparación entre los escenarios en simulación y reales 52
Capítulo VI 52
6.1. Descripción de algoritmo 52
6.2. Contribución de la mejora de algoritmo 52
6.2.1 Métricas de desempeño 52
6.3. Evaluación de desempeño de algoritmo 52
Conclusiones 53
Bibliografía 54

Índice de Figuras

Figura 1. Descripción a bloques de un nodo en WSN. 13
Figura 2. Clasificación de las técnicas de Localización. 20
Figura 3. Escenario de evaluación para WCL. 22
Figura 4. Ejemplo de asignación de pesos relativos. 24
Figura 5. Esquema FLS. 26
Figura 6. Procedimiento para desarrollar la investigación. 29
Figura 7. Distribución de nodos. 34
Figura 8. MSE y SD vs. (σ Noise) para densidad de nodos = 1 35
Figura 9. MSE y SD vs. (σ Ruido) para densidad de nodos= 2. 36
Figura 10. MSE y SD vs. (σ Ruido) para densidad de nodos = 5. 36
Figura 11. MSE vs Densidad de nodos para (σ Ruido = 4 dBm). 37
Figura 12. SD vs. Densidad de nodos para (σ Ruido = 4 dBm). 38
Figura 13. MSE vs. Densidad de nodos para (σ Ruido = 1 dBm). 38
Figura 14. SD vs. Densidad de nodos para (σ Noise = 1 dBm). 39
Figura 15. CDF vs. Error de localización para (σ Ruido = 4 dBm y Densidad de nodo = 1). 39
Figura 16. CDF vs Error de localización. 40
Figura 17. MSE y SD vs. (σ Ruido) para Densidad de nodos = 1. 41
Figura 18. MSE y SD vs. (σ Ruido) para Densidad de nodos = 2. 41
Figura 19. MSE y SD vs. (σ Ruido) para Densidad de nodos = 5. 42
Figura 20. MSE y SD vs. Densidad de nodos para (σ Ruido = 1 dBm). 43
Figura 21. MSE y SD vs Densidad de nodos para (σ Ruido = 4 dBm). 43
Figura 22. CDF vs. Error Location for (σ Noise = 2). 44
Figura 23. Escenario de Aplicación propuesto. 45
Figura 24. MSE vs. (σ Ruido). 46
Figura 25. . SD vs. (σ Ruido). 47
Figura 26. CDF vs. Error de localización para (σ Ruido = 2). 47
Figura 27. Grid de mediciones 48
Figura 28. Patrón de radiación de potencias recibidas de los nodos ancla. 50
Figura 29. Modelo del sistema de localización. 50
Figura 30. Proceso del sistema de localización. 51

Capítulo I.

Introducción

1.1. Antecedentes

Recientemente las redes inalámbricas de sensores (WSN por sus siglas en inglés) han sido centro de atención en la comunidad científica, debido a los desafíos teóricos y prácticos que éstas imponen. Sin embargo, existen escenarios más complejos que requieren la apropiada ejecución de acciones específicas, como resultado de la información recolectada por los nodos sensores. Ante esta necesidad, surgen las redes inalámbricas de sensores y actores (WSAN: Wireless Sensor and Actor Networks) como una importante extensión de las WSN [1], cuyas aplicaciones generalmente demandan menores tiempos de respuesta que las WSN y, en algunas aplicaciones, mayor ancho de banda.

Las WSAN están compuestas de sensores y actores distribuidos en un área geográfica de interés. Los sensores son dispositivos de poca capacidad de procesamiento, muy bajo consumo energético y bajo costo, responsables de monitorizar el ambiente físico, mientras que los actores ejecutan una tarea acorde a los datos colectados y reportados por los sensores durante un evento [2]. En WSAN es muy importante conocer la posición de los nodos sensores, ya que permite determinar la ubicación geográfica de un evento y responder oportunamente a éste, además de que facilita el enrutamiento a través de la red y reduce el consumo de energía de los nodos. La localización precisa de los sensores es un requerimiento crítico en una amplia variedad de aplicaciones en WSAN [3,4] tales como rastreo de animales, el cual permite analizar el comportamiento animal y las interacciones con otras especies; logística, donde los sensores reportan su posición cuando requieren ser encontrados; en salud, donde la ubicación de equipo médico y empleados es necesario en casos de emergencias y en el monitoreo de la evolución espacial de un fenómeno extraordinario entre otros [5].

La localización en WSANs se describe acorde a un sistema de coordenadas, definido por nodos de referencias con posiciones conocidas [6]. En redes reconfigurables, como las redes ad-hoc y WSN, no siempre existe un enlace directo entre dos nodos, por lo que los puntos de acceso están conectados a través de múltiples saltos al nodo de interés (NOI), [6, 7]. En escenarios multisalto [8], los nodos vecinos proporcionan información del NOI, la cual es necesaria y se requiere para encontrar su posición. En la actualidad existe una gama amplia de algoritmos de localización que son empleados en WSAN para determinar la posición de un nodo sensor. Algunos algoritmos se basan en los sistemas GPS, los cuales son de gran utilidad en exteriores, mientras que su desempeño es afectado adversamente en escenarios interiores, [6, 9].

De manera general en la literatura los algoritmos de localización se clasifican en basados en distancia y libres de distancia (o basados en conectividad). Los primeros asumen que la fuerza de la señal decae conforme aumenta la distancia, de esta manera, las mediciones de la fuerza de la señal se convierten en distancias estimadas y éstas a su vez se emplean para estimar la posición del NOI. Estas técnicas presentan resultados muy precisos, sin embargo, requieren hardware especializado lo que las hace más costosas en redes grandes [10]. Si no es posible estimar la distancia entre nodos o si ésta tiene errores muy grandes se emplean los algoritmos libres de distancia los cuales utilizan información de conectividad. Estos algoritmos asumen que el rango de transmisión es constante o que la distribución de los nodos es uniforme y conocida a priori. Esto significa que el desempeño depende de la diferencia entre los valores esperados y reales del rango de transmisión y la distribución de los nodos [11]. Estas técnicas disminuyen su precisión respecto a las basadas en distancia pero su implementación es sencilla y de bajo costo.

1.2. Problema

En muchas aplicaciones de WSAN la localización precisa y oportuna de los nodos sensores es un requerimiento crítico ya que permite determinar la ubicación geográfica de un evento y responder oportunamente a éste, además de facilitar el uso eficiente de los recursos de la red, como el consumo de energía al seleccionar rutas adecuadas, lo que a su vez repercute en el tiempo de vida de la red [3,4].

Actualmente existe una gran variedad de algoritmos de localización que pueden ser empleados en redes WSAN, incluso, en la literatura se reporta la evaluación de desempeño de diversos algoritmos de localización, pero la mayoría de éstos únicamente se realiza a nivel simulación, bajo condiciones ideales. Sin embargo, para desarrollar sistemas de localización reales es necesario analizar el desempeño de dichos algoritmos en escenarios reales y determinar cuál de estos es más factible de implementar en hardware sencillo y de bajo costo. Por lo tanto,

este trabajo plantea la siguiente pregunta de investigación *¿Qué algoritmo de localización presenta mejor desempeño en escenarios reales en términos de precisión, exactitud, velocidad, complejidad computacional y consumo de energía?*

1.3. Justificación

La teoría de los algoritmos de localización crece rápidamente, por lo que promete ser un área de gran interés en la comunidad científica, estas nuevas propuestas muestran mejoras en los algoritmos ya existentes pero son meramente teóricas; en la práctica diferentes fenómenos afectan la señal transmitida, como es la temperatura, presión, humedad, lluvias, etc. El resultado de esta señal a su vez es afectada por otros fenómenos como son la reflexión, la difracción, el esparcimiento, e interferencia con otras señales, lo que resulta en la distorsión de ciertos parámetros de la señal tal como RSS (Fuerza de la Señal Recibida) utilizado como base para la estimación de distancia en muchos de los algoritmos recientemente propuestos [12]. El efecto de estos fenómenos puede resultar en una estimación errónea de la posición, por lo que es necesario observar la fiabilidad de los diferentes algoritmos de localización y determinar cuáles algoritmos son capaces de obtener una aproximación real a pesar de las diferentes complicaciones que presenta la transmisión de datos en un ambiente real.

La utilización de algoritmos de localización basados en distancia es sumamente importante, pues reduce ampliamente los costos de implementación de una red de sensores inalámbrica. Sin la necesidad de hardware adicional para auto-localización y bajos niveles de complejidad de algoritmos, se vuelven un área crítica de investigación la cual necesita optimización y diseños confiables en la práctica.

Estos algoritmos de localización pueden solucionar situaciones críticas de vida o muerte como puede ser en el caso de un hospital, donde en situaciones de

emergencia se requiere la localización oportuna de recursos médicos, tales como desfibriladores y médicos especialistas, los cuales son dispositivos móviles imprescindibles, por lo que determinar su posición puede reducir el tiempo de respuesta a un paciente y salvar vidas [5]. Así mismo, es posible solucionar problemas de incendios forestales al tener la información de la fuente de ignición y localizarla en los primeros segundos de su aparición para lograr sofocar los fuegos que podrían incluso destruir un bosque entero.

1.4. Objetivo

Desarrollar un sistema de localización en hardware mediante dispositivos Arduino y XBee, con la finalidad de evaluar el desempeño de algoritmos de localización y determinar cuál de estos presenta mejores métricas de desempeño bajo diferentes escenarios.

1.4.1. Objetivos específicos:

- Evaluar la pertinencia de utilizar RSSI en algoritmos de localización como estimador de distancia en escenarios reales tanto en interior como exterior.
- Implementar los nodos anclas y nodos móviles que conformarán el sistema de localización.
- Desarrollar un sistema de localización en hardware para evaluar los diversos algoritmos de la literatura.
- Evaluar el desempeño de diversos algoritmos de localización de la literatura en escenarios reales en interior y exterior.
- A partir de los resultados obtenidos proponer una mejora a un algoritmo de localización en términos de exactitud, precisión y consumo de energía.

1.5. Alcances

Este proyecto de investigación contempla el desarrollo de un sistema de localización en hardware que consta de cuatro nodos anclas y un nodo móvil basados en tecnología Arduino y trasceivers XBee, con el cual se evaluará en escenarios reales, tanto exteriores como interiores, el desempeño de los diferentes algoritmos de localización a un salto, basados en distancia, publicados en la literatura y en base a los resultados obtenidos, se buscará mejorar uno de los algoritmos de localización analizado en términos de exactitud, precisión y consumo de energía.

1.6. Hipótesis

Es posible desarrollar un sistema de localización, preciso, de bajo costo y consumo de energía, capaz de determinar la posición de un nodo de interés en escenarios reales tanto interiores como exteriores, y a partir de éste determinar qué algoritmos de localización presentan mejor desempeño.

1.7. Limitaciones

El proyecto no contempla implementar algoritmos de localización basados en ToA, TDoA, AoA, debido a la falta de equipo en la institución y la complejidad que esto representa. En esta investigación únicamente se implementarán aquellos algoritmos que consideren que los nodos anclas se encuentran a un salto del nodo de interés, por la gran cantidad de nodos necesarios y la complejidad de implementación de los algoritmos multi-salto además de que esto incrementaría el tiempo requerido para concluir la investigación.

Capítulo II

Estado del arte

2.1. Introducción

En este capítulo se describe de forma general las redes inalámbricas de sensores (WSN), que son una parte de lo que conforman las redes de área personal (WPAN), así como sus características, aplicaciones y limitaciones.

2.2. Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN).

Una red inalámbrica de área personal (WPAN; *"Wireless Personal Area Network",* por sus siglas en inglés) hace referencia a redes computacionales para la comunicación de dispositivos cercanos al punto de acceso. Estas redes normalmente cubren un rango cercano de unos pocos metros; ya sea, para uso personal o entornos o ambientes de trabajo.

"PAN representa un concepto de red centrado en el usuario, que permitirá a la persona comunicarse con sus dispositivos personales cercanos. (Por ejemplo, asistentes digitales personales, webpads, organizadores, computadoras

personales portátiles) y para establecer las conexiones inalámbricas con el mundo externo” [13].

Posteriormente, experimentó muchas variantes desarrolladas por diferentes instituciones de investigación o compañías. La diferente variedad de soluciones PAN incluyen [13]:

- Proyecto Oxygen (MIT).
- Asociación infrarroja de datos (IrDa, por sus siglas en inglés).
- Bluetooth
- IEEE 802.15.

Los objetivos de este proyecto se centran en la especificación IEEE 802.15; el cual, es un grupo de trabajo dentro de IEEE 802 especializado en redes PAN inalámbricas (WPAN). Se divide en 5 subgrupos; de los cuales, el número 4 se encarga de las redes WPAN de baja velocidad bajo la especificación 802.15.4.

2.3. Redes Inalámbricas de Sensores (WSN)

Una red inalámbrica de sensores consta de nodos dedicados a la toma de mediciones y/o actuación sobre un entorno heterogéneo. Estos nodos cuentan con un microcontrolador, sensores y transmisor/receptor, que forma una red de múltiples nodos generalmente perteneciendo al rango de WPAN. Es decir un nodo sensor está formado de cuatro componentes básicos: unidad de sensado, unidad de procesamiento, unidad de transceptor y unidad de potencia, la Figura 1, muestra una descripción a bloques de los componentes de un nodo en WSN.

La primera convierte a señales digitales las señales analógicas producidas por los sensores, mediante el ADC, y las introduce a la unidad de procesamiento. Esta unidad almacena y procesa la información. Por su parte, el transceptor conecta el nodo a la red. Por último, la unidad de potencia, se encarga de proveer de energía a las demás unidades de los nodos sensores, los cuales utilizan normalmente baterías para flexibilidad en su despliegue.

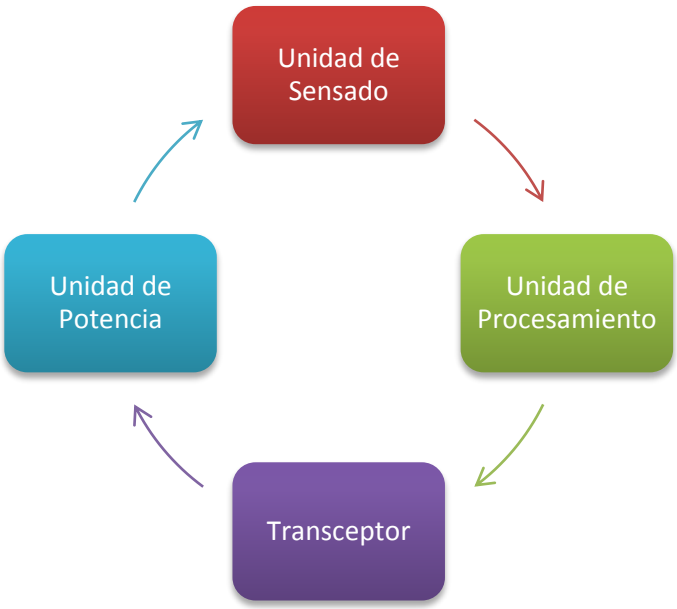

Figura 1. Descripción a bloques de un nodo en WSN.

2.3.1. Características

Las WSN tienen capacidad de auto restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas rutas para encaminar los paquetes de datos. De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan. Las capacidades de auto diagnóstico, auto configuración, auto organización, auto restauración y reparación, son propiedades que se han desarrollado para este tipo de redes para solventar problemas que no eran posibles con otras tecnologías.

Las WSN se basan en asignar a cada nodo enlaces de baja potencia, de tal modo que el área de cobertura sea relativamente pequeña con el fin de economizar energía, mientras que, en cambio, es necesario proporcionar mecanismos de enrutamiento con multiples saltos, que permitan la comunicación con los nodos que estén fuera del rango de comunicación de un nodo especifico. Otra ventaja es le reutilización de frecuencias, ya que dos nodos con rangos de comunicación disjuntos podrán emplear la misma banda de transmisión.

Otra ventaja significativa consiste en la utilización de mecanismos de coordinación entre nodos, la cual permite la distribución de funciones, por ejemplo, la realización de una tarea complementaria a la de sus nodos vecinos, o bien, mediante procesos donde cada nodo supervisa el comportamiento de su vecino.

2.3.2. Aplicaciones

La importancia de la monitorización continua de diferentes parámetros físicos en los diferentes campos de aplicación, se hace cada vez más notoria con el paso del

tiempo. Los sistemas actuales de producción y fabricación de diversos materiales cuentan con un gran número de dispositivos que requieren ciertas condiciones para el funcionamiento correcto de los mismos.

Las redes inalámbricas de sensores sirven como la interfaz entre el usuario y los dispositivos para conocer los niveles de diferentes parámetros físicos sin la necesidad de presenciarlas físicamente. Actividades como la agricultura inteligente, domótica, líneas de producción, etc., hacen uso de las WSN para controlar y mantener las condiciones ideales de los dispositivos y/o el ambiente.

Entre las aplicaciones se encuentra:

- Monitoreo de temperatura y humedad.
- Estudio de movimiento de objetos.
- Condiciones de iluminación.
- Medición de la presión.
- Sensado de nivel de ruido.
- Monitoreo de parámetros como la velocidad, dirección, tamaño y posición.

Estas redes inalámbricas de sensores pueden ser aplicadas para el monitoreo continuo de detección de eventos, localización y control de actuadores.

2.3.3. Retos de diseño

Para el despliegue funcional de una red inalámbrica de sensores, es necesario cumplir con los siguientes retos de diseño:

- Tiempo de vida extendido.
- Capacidad de respuesta.
- Robustez.
- Sinergia.
- Escalabilidad.
- Optimización y adaptación automática.
- Heterogeneidad.
- Autoconfiguración.
- Privacidad y seguridad.

2.4. Problema de Localización

En WSAN es muy importante conocer la posición de los nodos sensores, ya que permite determinar la ubicación geográfica de un evento y responder oportunamente a éste, además, con el conocimiento de la posición exacta de los nodos en la red es posible mejorar servicios como ruteo, control de topología, cobertura, etc. Al proceso de la ubicación física del nodo sensor, se le conoce como localización.

La localización se puede hacer de dos maneras distintas: Distribuida y Centralizada. En la primera todos los nodos en la red participan compartiendo y procesando información para localizar a uno o varios nodos de interés. En la forma centralizada, todos los nodos ya sea de posición conocida o no envían su información a un dispositivo central conocido como sumidero o Sink, el cual procesa la información y determina la posición del nodo de interés. Los algoritmos centralizados resuelven la limitante de la reducida capacidad de cómputo de los nodos, sin embargo, estos deben comunicarse al sumidero lo que provoca mayor consumo de energía que el procesamiento mismo. [14]

Para determinar la posición de un nodo desconocido NOI se considera un conjunto de nodos sensores distribuidos aleatoriamente sobre un plano de dos dimensiones. También se considera un conjunto de N nodos de referencia $\mathrm{A_i}$ con coordenadas $\mathrm{p_i} = (\mathrm{x_i}, \mathrm{y_i})$, $\mathrm{i} = 1, 2, \ldots, \mathrm{N}$, que pueden estar dentro o fuera del rango de transmisión del NOI.

Los algoritmos de localización libres de distancia utilizan la información de conectividad entre dos nodos para estimar la distancia entre el NOI a los nodos de referencia. Se considera que existe conectividad entre dos nodos cuando éstos están dentro del rango de cobertura uno del otro. El radio de cobertura se obtiene mediante el RSSI.

2.4.1. RSS/RSSI

El modelo de propagación de la señal, consiste en establecer una relación entre la atenuación de la señal y la distancia recorrida, de donde una relación entre el RSS y la distancia entre los nodos puede ser obtenida. Dependiendo de la complejidad del modelo, otros factores que pueden afectar la propagación de la señal, pueden ser considerados, por ejemplo, el tamaño de la antena o el número de obstáculos que la señal debe de atravesar.

El RSS es uno de los parámetros más populares para realizar la localización en ambientes interiores, ya que la mayoría de los dispositivos inalámbricos son capaces de medir este parámetro de forma sencilla y barata. El valor de RSS es obtenido del RSSI y es equivalente a la potencia de la señal recibida.

El RSS es el voltaje medido por el circuito RSSI por los receptores. El RSS es una medida del nivel de potencia, dado en dBm, es decir la magnitud cuadrática de la fuerza de la señal [14], en cambio RSSI es un valor adimensional arbitrario empleado para medir la fuerza de la señal otorgada por el circuito del dispositivo receptor. Sin embargo, debido a que este valor RSSI no maneja una relación directa en dBm y, a que varía de un fabricante a otro, es necesario caracterizar los valores de RSSI para asociarlo a un valor de RSS. Las mediciones de RSS son poco costosas y simples de implementar en hardware, además de que no requieren ancho de banda o energía adicional en los sensores [8].

En espacio libre, la potencia de la señal es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación entre el transmisor y el receptor, por lo cual la señal se atenúa a una tasa de 20dB/década. En los sistemas de comunicaciones móviles, en modelos a gran escala, la potencia de la señal se ve afectada por reflexión, difracción y scattering. Por su parte a pequeña escala, el efecto de multitrayectorias y el fading, son los principales factores que generan error en la lectura del RSS [15].

Además de las pérdidas de trayectoria, la medición de RSS es también una función de la calibración entre el transmisor y el receptor. Dependiendo del costo del proceso de manufactura, los circuitos de RSSI y la potencia del transmisor pueden variar de dispositivo a dispositivo. Además, las mediciones de potencia, pueden variar conforme se agoten las baterías, por lo que, los sensores deben ser diseñados para medir e informar sobre sus propios datos de calibración a sus vecinos. La diferencia de RSS entre dos sensores provee información acerca de la distancia relativa desde el transmisor y descarta la dependencia de la potencia de transmisión actual.

2.4.2. Modelo de propagación

El modelo más típico y ampliamente usado, es el modelo Log-Normal Shadowing [16], el cual es una generalización de la ecuación de espacio libre de Friis, debido a que tanto los estudios teóricos como experimentales soportan este modelo en escenarios interiores y exteriores. El modelo puede ser expresado mediante la ecuación (1).

$$\mathrm{P_{RX}(dBm)} = \mathrm{A} - 10\eta\log\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d_0}} + \chi_\sigma \qquad (1)$$

Donde A es una constante, la cual denota una potencia promedio para una distancia de referencia dada por d_0, η es el exponente de pérdidas que denota la tasa de decaimiento de la potencia con respecto a la distancia y χ es una variable aleatoria Gaussiana con media cero y varianza σ_χ^2 que está definida en dBs. La ecuación del modelo log-normal es una línea con pendiente 10η cuando es trazada con respecto a la distancia. El rango típico del exponente de pérdidas está entre valores de 1.5 y 5. Típicamente, el valor de σ es tan bajo como 4 y tan alto como 12.

2.4.3. Estimación Maximum Likelihood de los Parámetros del Modelo Log-Normal

Los parámetros η y σ_χ^2 son usualmente desconocidos y deben ser estimados basado sobre las mediciones del canal. Considerando un conjunto de N observaciones de potencias promedios obtenidas a diferentes distancias de un transmisor y diferentes puntos de localización en el área de interés tal que N pares de mediciones $\{P_{RX}(d_i), d_i\}$ son disponibles. Por simplicidad se asumen que las potencias están dadas en dB. La función log-likelihood es obtenida de la función de densidad de probabilidad conjunta de las N observaciones:

$$L(n, \sigma_\chi^2) = -N ln\left(\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}\right) - \frac{1}{2\sigma_\chi^2}\sum_{i=1}^{N}\left[P_{RX}(d_i) - P_{RX}(d_0) - 10\eta log\left(\frac{d_i}{d_0}\right)\right]^2 \qquad (2)$$

Minimizando la expresión anterior con respecto a η, entonces la estimación está dada por:

$$\hat{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^{N} log\left(\frac{d_i}{d_0}\right)[P_{RX}(d_i) - P_{RX}(d_0)]}{10\sum_{i=1}^{N}\left(log\left(\frac{d_i}{d_0}\right)\right)^2} \qquad (3)$$

Sustituyendo η por $\hat{\eta}$ en la ecuación y derivando con respecto a σ_χ^2, se obtiene la siguiente expresión:

$$\sigma_\chi^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[P_{RX}(d_i) - P_{RX}(d_0) - 10\hat{\eta} log\left(\frac{d_i}{d_0}\right)\right]^2 \qquad (4)$$

2.4.4. Estimador de Distancia Log-Normal

Cuando los parámetros del canal han sido estimados, las mediciones de la potencia pueden ser utilizadas para estimar la distancia entre el transmisor y el receptor. Sustituyendo los valores de $\hat{\eta}$ y σ_χ^2, y redefiniendo la ecuación, para una simple observación de potencia P_{RX}, se obtiene la siguiente expresión:

$$L(\hat{n}, \hat{\sigma}_\chi^2, d) = -ln\left(\sqrt{2\pi\hat{\sigma}_\chi^2}\right) - \frac{1}{2\hat{\sigma}_\chi^2}\left[P_{RX}(d) - P_{RX}(d_0) - 10\hat{\eta} log\left(\frac{d}{d_0}\right)\right]^2 \qquad (5)$$

Derivando la expresión con respecto a d, se obtiene la expresión del estimador de distancia:

$$\hat{d} = d_0 10^{\wedge} \left[\frac{P_{RX}(d_0) - P_{RX}}{10\hat{\eta}}\right] \quad (6)$$

2.5. Clasificación de localización

Actualmente existen muchas técnicas para determinar la distancia entre los nodos sensores. Los sistemas de posicionamiento global GPS (Global Positioning System) son muy útiles en exteriores, sin embargo no lo son en interiores, debido a que las señales de radio son bloqueadas por las construcciones [7, 9].

Los métodos que existen en la localización en WSN se dividen principalmente en tres grupos. En el primer grupo existen los métodos de estimación de distancia como el tiempo de llegada ToA (Time of Arrival), la cual calcula físicamente la distancia a través de la velocidad y el tiempo de propagación de la señal, la técnica de ángulo de llegada AoA (Angle of Arrival), que estima la distancia del nodo de interés NOI (Node of Interest) obteniendo la dirección de la señal enviada por nodos adjuntos a través de un arreglo de antenas y múltiples receptores, mientras que el indicador de la fuerza de la señal recibida RSSI (Received Signal Strength Indicator) mide la potencia recibida por el nodo receptor, calcula las pérdidas de propagación y las transforma a distancia, empleando un modelo teórico o empírico de las pérdidas de trayectorias de la señal [1].

En el segundo grupo, existen las técnicas de localización las cuales a su vez se clasifican en dos grupos: técnicas basadas en distancia (range-based) y tecnicas libres de distancia (range-free) o basadas en proximidad. Las técnicas basadas en distancia, necesitan calcular la distancia entre un grupo de nodos, para estimar la posición del NOI. En este grupo, se encuentran las técnicas de escalamiento multidimensional MDS (Multidimentional Scaling) [17], sistemas de posicionamiento Ad-hoc APS (System Positioning Ad-hoc) [18], algoritmos de posicionamiento circular e hiperbólico [19]. Por su parte, las técnicas libres de

distancia, son aquellas, que estiman la posición del NOI mediante RSS por lo que no necesitan estimar la distancia entre los nodos. En este grupo, están DV-Hop (Distance Vector-Hop) [7], APIT (Approximate Point In Triangle) [7, 20], Centroide [7], intersección rectangular, intersección circular, e intersección hexagonal [21], entre otras.

Por último, se encuentran las técnicas de estimación de la posición, las que se basan en la intersección de múltiples rangos de comunicación para localizar al nodo de interés NOI, entre estas tecnicas se pueden encontrar la triangulación, trilateración y multilateración.

En la Figura 2 se muestra el esquema de la clasificación de las técnicas de localización.

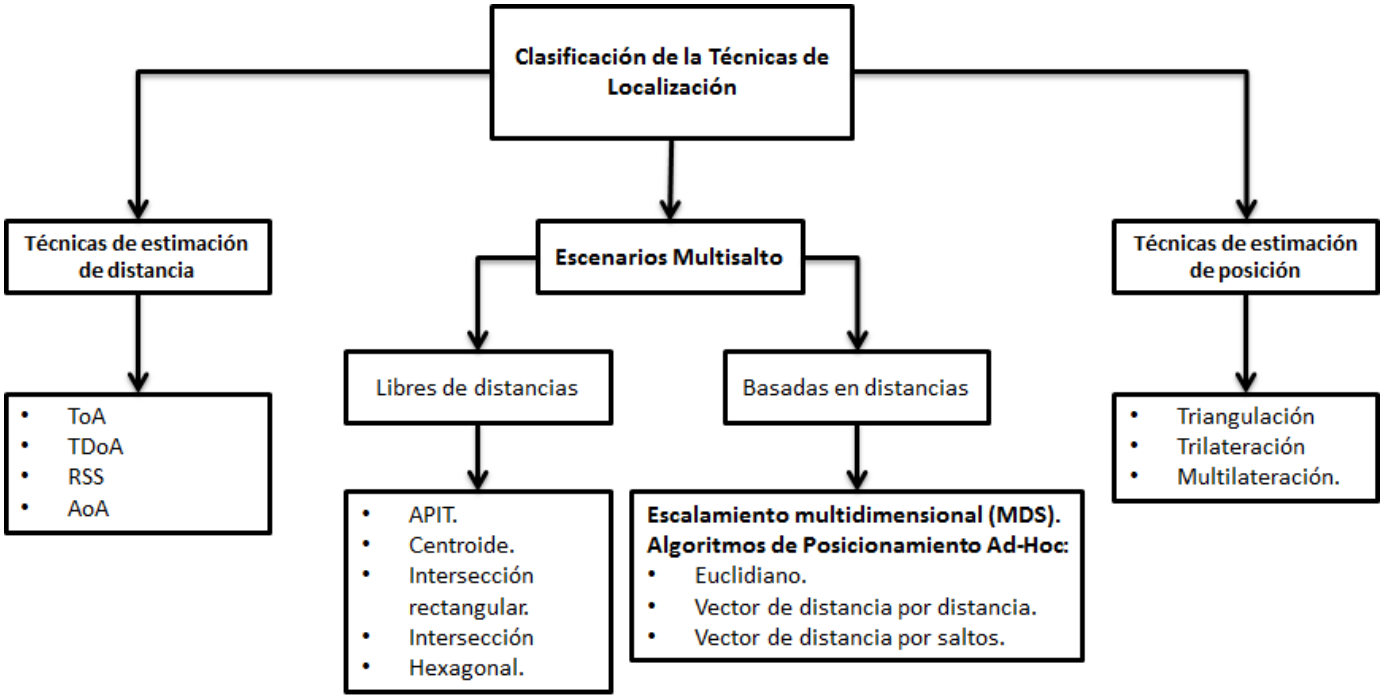

Figura 2. Clasificación de las técnicas de Localización.

2.6. Algoritmos de localización a 1 salto

2.6.1. Algoritmo de Centroide CL

El método CL (Centroid Localization) no utiliza la potencia de la señal, para determinar la distancia o el AoA de los nodos de referencias al NOI, entonces, para calcular la posición del NOI, este nodo recibe las coordenadas de los nodos de referencias y el NOI simplemente estima el centroide de dichos puntos [22], el cual está dado por:

$$\hat{p} = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} p_i \tag{7}$$

Donde $\hat{p}$ es la coordenada del NOI y $p_i = (x_i, y_i)$ es la coordenada de la referencia *i*.

2.6.2. Algoritmo de Centroide WCL

El método de centroide CL asume que todos los puntos están a la misma distancia del NOI. Sin embargo, [23] toma en cuenta que algunos puntos pueden estar más cerca que otros al NOI, bajo este argumento propone WCL (Weighted Centroid Localization), en el cual se toma en cuenta la potencia de la señal para estimar la distancia entre el NOI y los nodos de referencia. En este método algunos puntos están más cercanos al nodo de interés, por lo tanto el NOI recibe las distancias de los nodos de referencias y los pesos, los cuales dependen de la distancia y del parámetro g**.** En (9) se muestra la ecuación que estima la posición del NOI y la expresión del factor de ponderación de la referencia i sobre el NOI.

$$\hat{p} = \frac{\sum_{i=0}^{n} w_i p_i}{\sum_{i=0}^{n} w_i} \qquad con \quad w_i = \frac{1}{(d_i)^g} \tag{8}$$

donde d_i es la distancia conocida, estimada por algún método como ToA, TDoA, AoA o RSS entre el nodo desconocido al nodo de referencia p_i. Observando la ecuación (8), el factor de peso w_i es mayor para distancia pequeñas y pequeño para distancias grandes, es decir, si el NOI recibe muy baja potencia de algún nodo de referencia, entonces el peso es muy pequeño, en algunos casos puede

ser despreciable. Los valores de g son determinados manualmente, por ejemplo para un rango de transmisión de 10m, $g = 1$ y para un rango de transmisión de 20m, $g = 2$. En la Figura 3 se muestra un ejemplo del escenario de evaluación WCL.

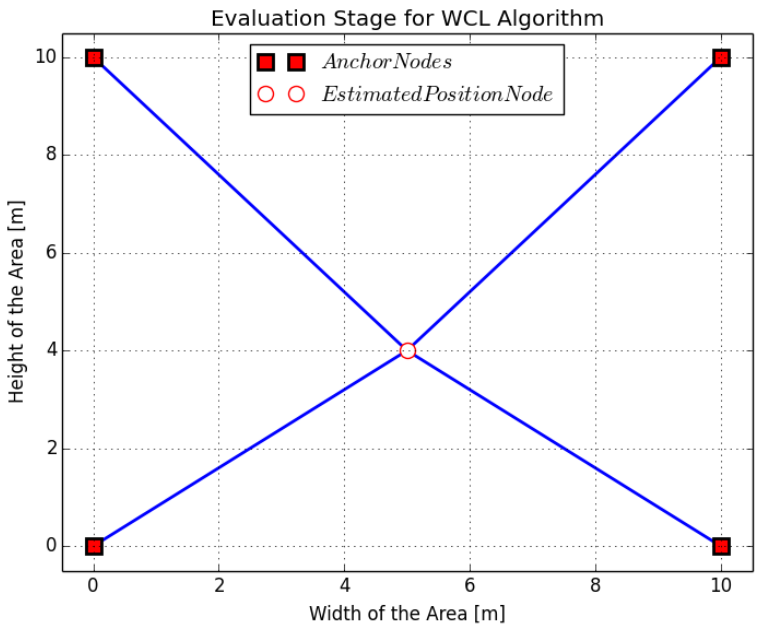

Figura 3. Escenario de evaluación para WCL.

2.6.3. Algoritmo de Centroide RWL

Este método RWL (Relative Span Weighted Localization) es similar al método WCL, sólo que los pesos son asignados mediante la relación lineal de los valores RSS medidos de cada receptor R_i sobre el rango RSS [24], definido como:

$$v^{\Delta} = \upsilon_{max} - \upsilon_{min} \tag{9}$$

donde:

$$\upsilon_{max} = \max\{v_i \in \gamma\}$$

$$\upsilon_{min} = \min\{v_i \in \gamma\}$$

$$\gamma = \{v_i : v_i es\ el\ valor\ de\ RSS\ para\ el\ mensaje\ \mathcal{M}_T\ a\ R_i\ para\ todo R_i\ \epsilon\ \mathbb{R}\}$$

Definiendo el valor mínimo y máximo de RSS, υ_{max} es el máximo valor de RSS y υ_{min} es el mínimo valor de RSS para el mensaje $\mathcal{M}_T$. El rango del conjunto de valores de RSS medidos para cada receptor $R_i \in \mathbb{R}$ se define como υ^{Δ}.

El peso w_i de cada receptor R_i, es calculado mediante la siguiente expresión:

$$w_i = \frac{\upsilon_i - \upsilon_{min}}{\upsilon^{\Delta}} \tag{10}$$

El RWL centroide es calculado mediante la siguiente expresión:

$$\hat{p} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\upsilon_i - \upsilon_{min})p_i}{\sum_{i=1}^{n}(\upsilon_i - \upsilon_{min})} \tag{11}$$

donde $\hat{p}$ es la coordenada estimada del NOI.

2.6.4. Algoritmo de Centroide REWL

El algoritmo REWL (Relative Span Exponentially Weighted Localization) es una variante al WCL en donde los pesos aumentan exponencialmente con la fuerza del RSS [24], de esta manera se acentúa más el efecto de los nodos más cercanos en el cálculo del centroide. En el método REWL se propone un factor de peso λ, el cual es un factor de ajuste de un peso w_i. Este parámetro de control λ, toma valores reales positivos entre 0 y 1. Por ejemplo, si $\lambda > 1$, entonces el factor $(1 - \lambda)$ es negativo, lo cual influye en que el peso w_i, se comporte como una curva con oscilaciones, es decir el factor w_i estaría variando de positivo a negativo, lo cual no está bien, ya que a mayor potencia mayor peso y menor potencia menor peso. Si ($\lambda = 0{,}1$), para estos dos valores, el factor $(1 - \lambda)$ toma valores de 1,0, por lo tanto el peso w_i toma valores constantes, lo cual no es válido, ya que w_i es variante conforme varía la potencia. Por último si $\lambda < 0$, entonces el factor $(1 - \lambda)$ es mayor a uno, lo cual significa que el peso w_i decae exponencialmente conforme aumenta la potencia. Para este último sucede lo contrario, a mayor potencia menor peso. Analizando el comportamiento del factor λ se garantiza que para valores entre 0 y 1 el w_i se comporta exponencialmente creciente, es decir, a

mayor potencia mayor peso y a menor potencia menor peso. El peso w_i de cada receptor R_i es calculado mediante la siguiente expresión:

$$w_i = (1-\lambda)^{(v_{max}-v_i)} \tag{12}$$

El REWL centroide es calculado mediante la expresión (13):

$$\hat{p} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(1-\lambda)^{(v_{max}-v_i)}p_i}{\sum_{i=1}^{n}(1-\lambda)^{(v_{max}-v_i)}} \tag{13}$$

En la Figura 4, se muestra un ejemplo donde los pesos varían con respecto al RSS, en ésta se comparan los pesos relativos asignados a un conjunto de receptores con un rango de RSS de $v^{\Delta} = 15dBm$ teniendo en cuenta las asignaciones de pesos a RWL y REWL, asumiendo tres diferentes valores del factor de ponderación λ.

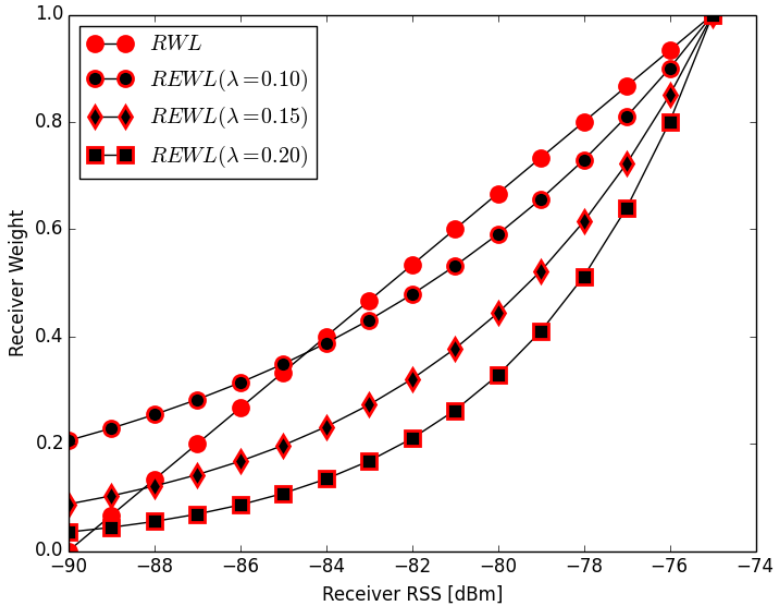

Figura 4. Ejemplo de asignación de pesos relativos.

2.6.5. Algoritmo de Centroide con Sistemas Difusos

Es un método para encontrar los pesos de los nodos de referencia dados. El sistema de lógica difusa FLS (Fuzzy Logic System) es un método que mapea una entrada a un salida usando fuzzy logic. Este mecanismo consiste en un fuzificador, un mecanismo de inferencia y un defuzificador, como se muestra en la Figura 5. El fuzificador, es el bloque encargado de asignar valores lingüísticos a la variable de entrada, por ejemplo: {bajo, medio, alto}. La salida de este bloque son funciones de membresía, El mecanismo de inferencia o sistema de inferencia difusa FIS (Fuzzy Inference System) es el encargado de tomar las funciones de membresía y generar la salida difusa mediante un conjunto de reglas o condiciones *if-then* y el defuzificador realiza la conversión del conjunto difuso a un valor crisp.

No existe un procedimiento sistemático para seleccionar una buena estrategia de defuzificación. La selección toma en consideración las propiedades de la aplicación en cada caso. Existen diferentes métodos. También existen diversos tipos de sistema difusos como Mamdani y Sugeno. La diferencia entre estos dos modelos son las funciones de pertenencia de salida, Mamdani utiliza funciones triangulares, trapezoidales, y Sugeno utiliza variables constantes o lineales.

Una regla difusa, puede ser escrita mediante la siguiente notación:

$$Rule\ i: IF\ x_1\ is\ A_1^i\ and\ x_2\ is\ A_2^i \dots\ x_N\ is\ A_N^i\ THEN\ y\ is\ y^i$$

donde $i = 1,2,3 \dots M$, denota la implicación i y M es el número de reglas, x_j $\{j = 1,2,3 \dots N\}$ son las variables de entrada del sistema difuso FLS, y_i es un singleton y A_j^i es la función de pertenencia difusa.

La salida del sistema difuso, para una entrada $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ puede ser expresada por:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i} \tag{14}$$

donde α_i implica el valor de verdad de la premisa de la implicación $i-th$, y es calculado como:

$$\alpha_i = \prod_{j=1}^{N} A_j^i(x_i) \tag{15}$$

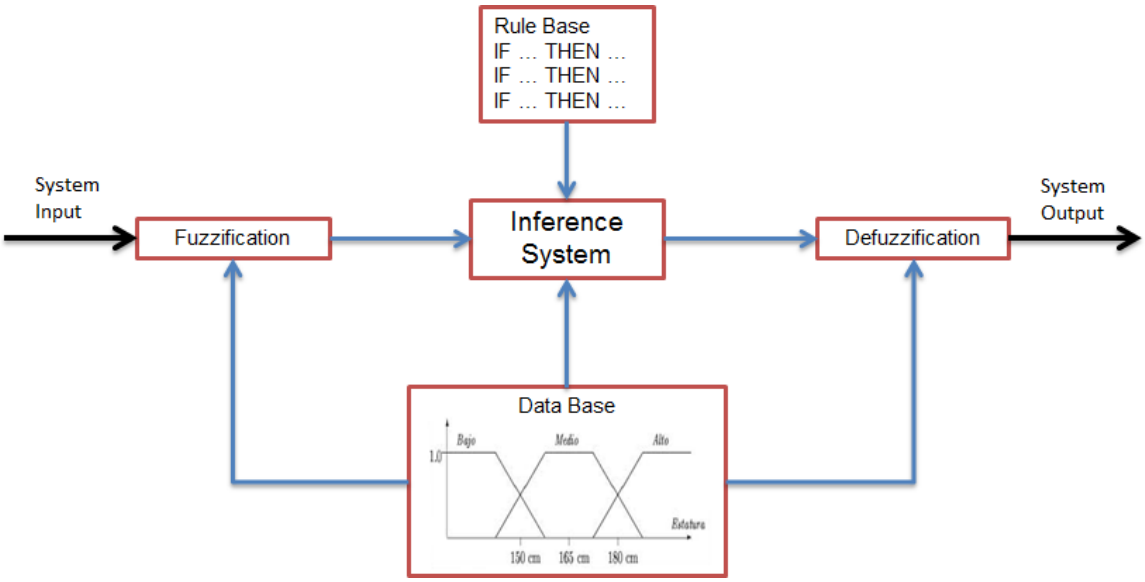

Figura 5. Esquema FLS.

En este método, el cual fue aplicado para WSN, se utiliza el RSS como parámetro de entrada, el cual toma valores desde el intervalo $[RSS_{min}, 0]$ y el nivel de peso como variable de salida.

En la Tabla I se muestran las reglas difusas asignadas para cada nivel de peso [25], como es probable que en algunos casos el nodo sensor reciba niveles bajos de potencia, entonces el nivel de peso debe ser bajo, en caso contrario el nivel de peso es alto.

Tabla I. Reglas de lógica difusa para cada nivel de ponderación.

Regla	*Si: RSS es*	*Entonces: El peso*

Regla 1	*Muy bajo*	*Muy bajo*
Regla 2	*Bajo*	*Bajo*
Regla 3	*Medio*	*Medio*
Regla 4	*Alto*	*Alto*
Regla	*Muy alto*	*Muy alto*

Capítulo III

Método

Este capítulo se enfoca en los procesos o metodología que se llevó a cabo durante el desarrollo de este proyecto, mostrando específicamente cada etapa que conforma parte relevante de éste, a partir del inicio de la investigación hasta su terminación, no obstante englobando los elementos, materiales e instrumentación involucrados.

3.1. Procedimiento

La Figura 6 muestra el procedimiento para desarrollar la presente investigación, el cual se describe brevemente a continuación.

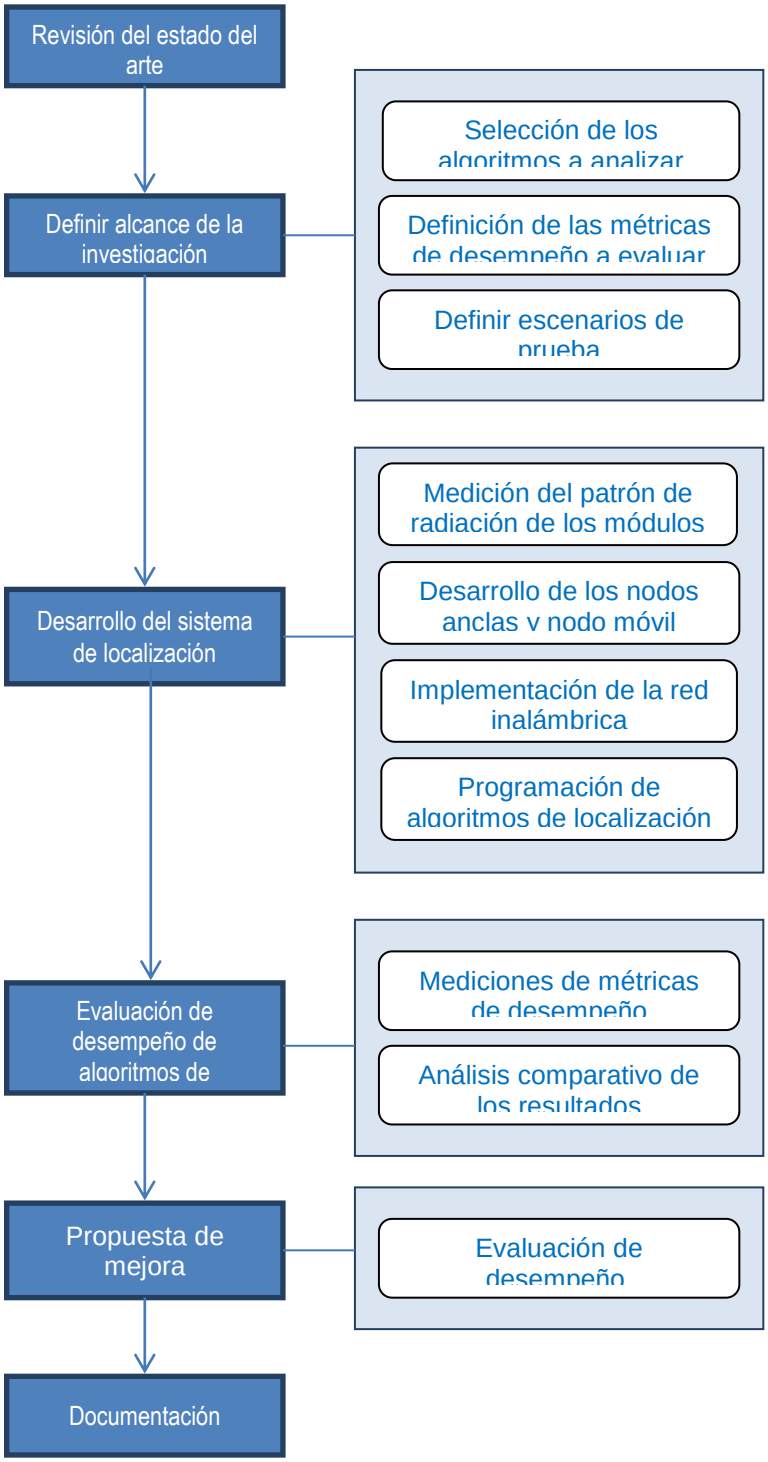

Figura 6. Procedimiento para desarrollar la investigación.

- **Revisión del estado del arte:** Consiste de la lectura de los artículos relacionados con los algoritmos de localización existentes, además se realiza una clasificación de los mismos y se identifican las diferencias entre estos.

- **Definir alcance de la investigación:** en esta etapa se seleccionan aquellos algoritmos que se han de evaluar como parte de este de trabajo, se definen las métricas de interés bajo los cuales se van a comparar los algoritmos de localización y los escenarios de prueba.

- **Desarrollo del sistema de localización:** Antes de implementar el sistema de localización es necesario realizar pruebas del patrón de radiación de los nodos Xbee, con la finalidad de validar el uso de RSSI como parámetro para estimar la distancia entre el nodo de interés y los nodos ancla. Enseguida se implementan cuatro nodos ancla y un nodo móvil utilizando módulos arduino y Xbee como transceptor. Por último se programan los algoritmos de localización en los módulos arduinos.

- **Evaluación de desempeño:** consiste en medir los parámetros de desempeño de los algoritmos utilizando los sistemas de localización desarrollado y enseguida analizar los resultados de los algoritmos evaluados.

- **Propuesta de mejora:** en base a los resultados obtenidos se propone alguna modificación a un algoritmo de localización tratando de mejorar la exactitud y precisión del algoritmo.

- **Documentación:** Esta etapa se realiza paralelamente durante el desarrollo del trabajo y consiste en la redacción del trabajo de tesis.

3.2. Materiales y herramientas

- 5 Arduino UNO
- 5 Xbee S1
- 5 MaxStream XBee Shield
- Bases de montaje para nodos.

- 1 Laptop: Procesador Intel i7, 4GB RAM, Procesador Grafico Intel Graphics HD.
- Base de datos institucionales, IEEE, Elsevier, Springer, Google Académico.

3.3. Sujetos

Esta investigación está enfocada en los algoritmos de localización a un salto libres de distancia, el cual es desarrollado por el Cuerpo Académico de Redes y Sistemas Colaborativos del Instituto Tecnológico de Sonora.

Capítulo IV

Evaluación de algoritmos de localización en simulación

4.1. Evaluación de algoritmos de localización en simulación (MATLAB)

En este capítulo se evalúa las métricas de desempeño de los algoritmos de localización. Este capítulo está estructurado de la siguiente manera: primero se describen las métricas de desempeño de los algoritmos de localización, así mismo, los escenarios de localización y por último se presentan los resultados obtenidos.

Los algoritmos evaluados están basados en RSS para estimar la posición del nodo de interés, ya que los otros métodos de estimación de distancia, involucran hardware más costoso en el caso de AoA, el método ToA involucra que no siempre haya sincronización perfecta entre todos los nodos y el método TDoA está limitado en cuanto a cobertura [7], por lo general de pocos metros. La desventaja

del método RSS, es que a medida que aumenta la distancia de transmisión, tiende a ser impreciso en la estimación de la distancia.

En este capítulo, se evalúan dos escenarios, un primer escenario en un área de cobertura extensa y un segundo escenario en un área pequeña. Las métricas de desempeño a evaluar son exactitud en cuanto a MSE, precisión en cuanto a desviación estándar SD (Standard Desviation) y complejidad computacional. Los resultados de las métricas de desempeño, fueron simulados en Matlab versión 2011.

4.1.1. Parámetros del Desempeño.

Exactitud. Este parámetro se define como el valor esperado de los errores de localización. En la ecuación 3.1 se muestra el cálculo para obtener esta métrica de desempeño.

$$MSE = E\left(\sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}\right) \tag{3.1}$$

$$location\ error = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \tag{3.2}$$

donde:

$(x, y) = real\ position\ \ node.$

$(x_k, y_k) = estimated\ position\ \ node.$

Precisión. Considera la distribución de las distancias de errores mientras que la exactitud considera el valor medio de los errores. Cuando dos técnicas son comparadas, la técnica con distancias de error concentradas sobre valores pequeños es la preferida.

4.1.2. Descripción del Primer Escenario de Evaluación.

El primer escenario en el cual se analizaron las técnicas de localización está representado por un área de 1000m x 1000m, tal como se muestra en la Figura 7. Se evaluaron 10,000 iteraciones, para cada una de las cuales se genera un nodo aleatorio, que representa el nodo a localizar. Para toda densidad de nodos $\rho \in \{1,2,5\}$, estos son distribuidos aleatoriamente sobre todo el grid de simulación. Para cada una de las densidades de los nodos, se varía el nivel de ruido

(desviación estándar) donde $\sigma \in \{0.5,1,2,3,4,5,6,7,8\}$. Para cada nodo de interés, se calcula el valor de RSS con el modelo de propagación log-normal Shadowing ec. (1).

Los parámetros del modelo de propagación de la señal fueron propuestos de: $n = 4$, (exponente de pérdidas en el espacio libre) y $P_o(dB) = -12dBm$ la cual fue calculada considerando un sensor con un rango de transmisión de $100m$ en exteriores, una sensitividad de $-92dBm$ y una potencia de transmisión de $1mW$ $(0dBm)$. d_{ij} es la distancia entre el nodo de interés i y el nodo de referencia adyacente j. X_σ es una variable aleatoria con ruido AWGN.

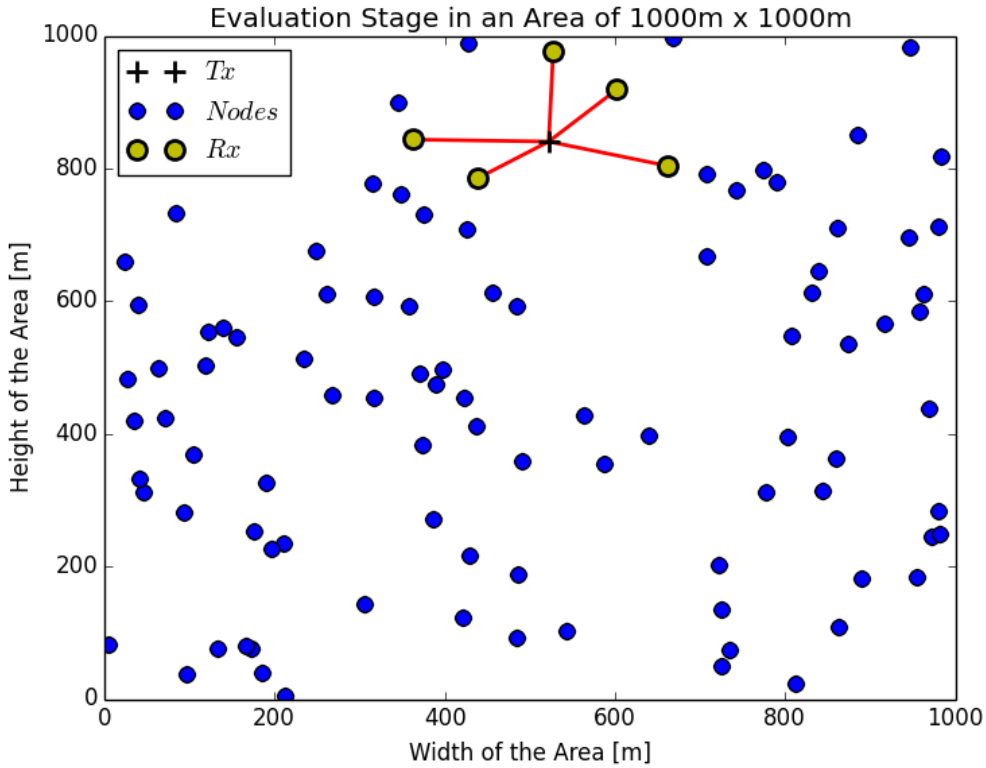

Figura 7. Distribución de nodos.

4.1.3. Análisis del Desempeño de Algoritmos libres de distancia bajo escenario 1.

Análisis de MSE y SD

En la Figura 8, se observa el MSE y la desviación estándar obtenida para el algoritmo de localización para una densidad de nodos de 1 (nodo/100m x 100m). En cuanto a MSE, se observa que el algoritmo de Multilateración presenta mejor desempeño que los demás algoritmos por debajo de $\sigma = 5\ dBm$ de nivel de ruido; para niveles de ruido mayores a este valor, su MSE es mayor que los algoritmos REWL, RWL y WCL. En cuanto a precisión este algoritmo tiene un mejor comportamiento que los demás algoritmos para niveles de ruido por debajo de $\sigma = 2\ dBm$.

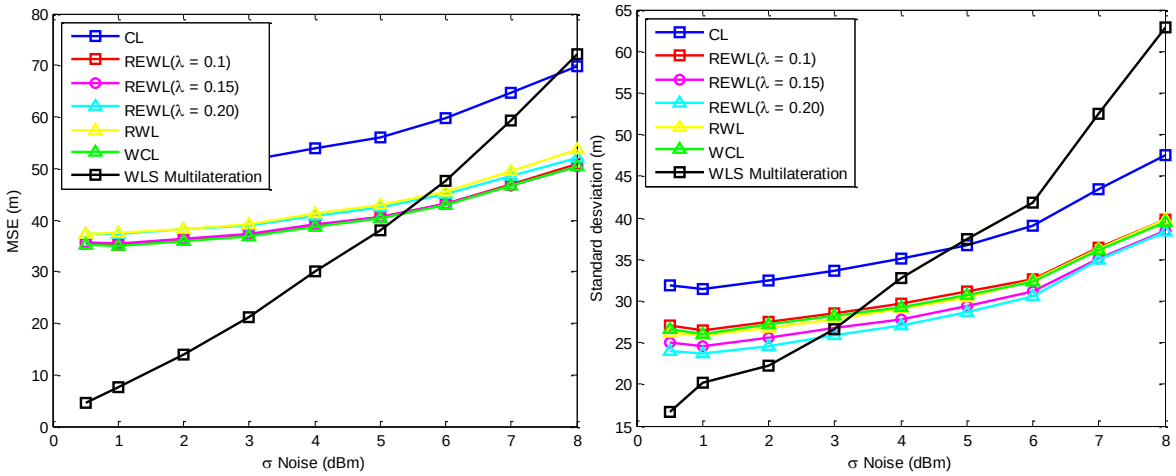

Figura 8. MSE y SD vs. (σ Noise) para densidad de nodos = 1

En la Figura 9, se observa el MSE y la desviación estándar obtenida para algoritmo de localización para una densidad de nodos de 2 (nodos/100m x 100m). En cuanto a desempeño, todos los algoritmos presentaron menor MSE y mayor precisión, debido a que aumenta la densidad de nodos. Para esta densidad de nodos, se observa que el algoritmo de Multilateración, presenta mejor precisión hasta niveles de ruido con $\sigma = 4\ dBm$.

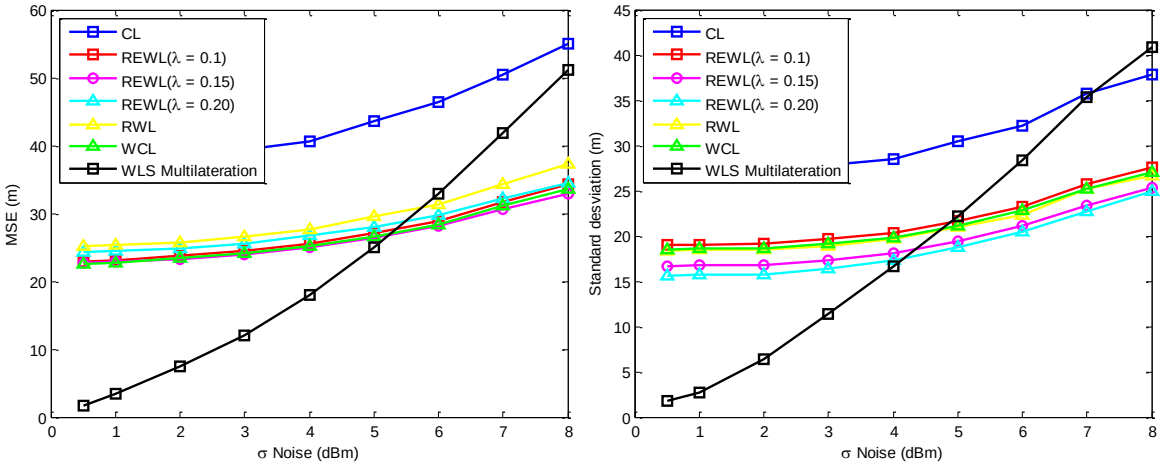

Figura 9. MSE y SD vs. (σ Ruido) para densidad de nodos= 2.

Analizando la Figura 10, se observa que para una densidad de nodos de 5 (nodos/100m x 100m) todos los algoritmos presentan menor MSE y mayor precisión. Entonces, se puede concluir que un aumento en la densidad de nodos para todo nivel de ruido, implica mejor desempeño en cuanto a MSE, ya que éste tiende a bajar y repercute en una mejor precisión, ya que ésta tiende a aumentar.

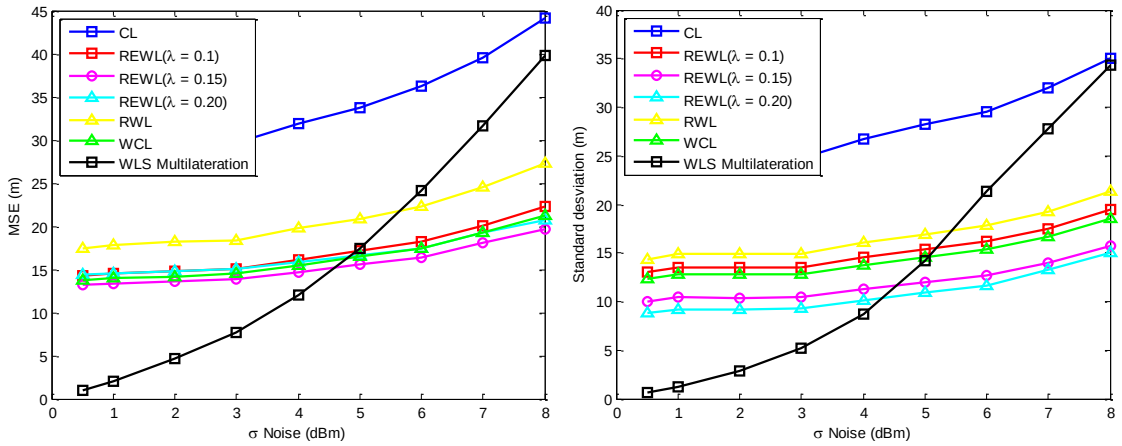

Figura 10. MSE y SD vs. (σ Ruido) para densidad de nodos = 5.

En la Figura 11, se observa cómo desciende el MSE para cada algoritmo de localización conforme aumenta la densidad de nodos en la red.

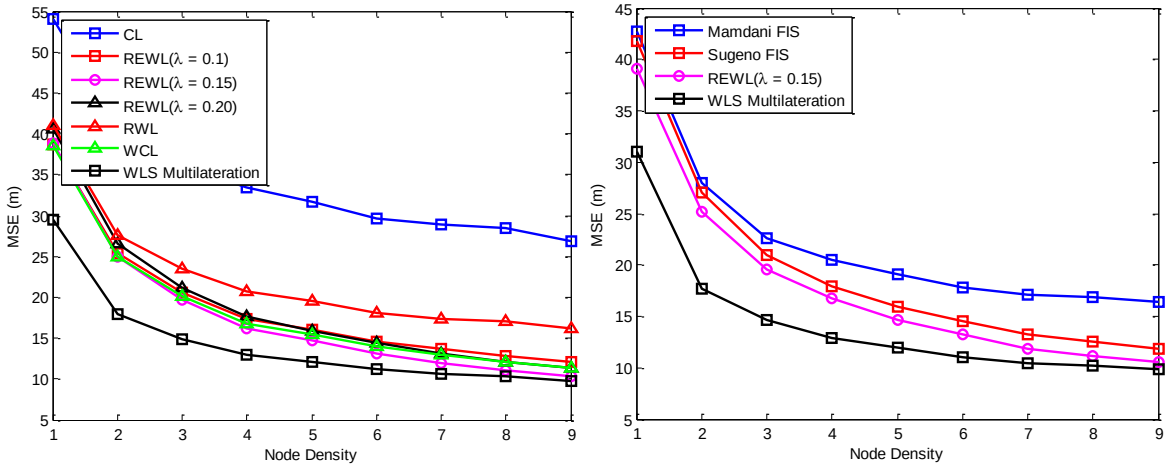

Figura 11. MSE vs Densidad de nodos para (σ Ruido = 4 dBm).

En la Figura 11, se observa que el algoritmo de Multilateración iterativa por mínimos cuadrados, muestra mejor desempeño en cuanto a MSE conforme aumenta la densidad de nodos en la red. En cuanto a sistemas difusos, se observa que Sugeno FIS se desempeña mejor que Mamdani FIS, por lo que es más adecuado usar Sugeno FIS para estimar la posición de un nodo.

En la Figura 12, se observa como varía la desviación estándar conforme aumenta la densidad de nodos en la red. Analizando la desviación estándar, se observa que el algoritmo de Multilateración iterativa por LS, presenta menor desviación estándar que los demás algoritmos analizados, por lo que este método es más preciso.

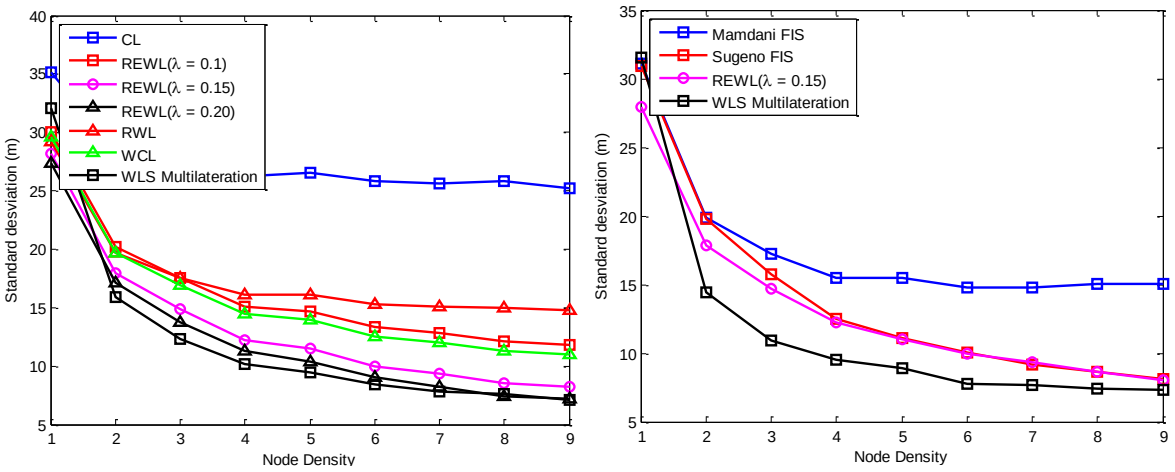

Figura 12. SD vs. Densidad de nodos para (σ Ruido = 4 dBm).

En la Figura 13, se muestra que para una desviación estándar de ruido de 1 dBm, el algoritmo de Multilateración iterativa por LS, mantiene un MSE muy bajo comparado con los demás algoritmos mostrados en la Figura 3.7.

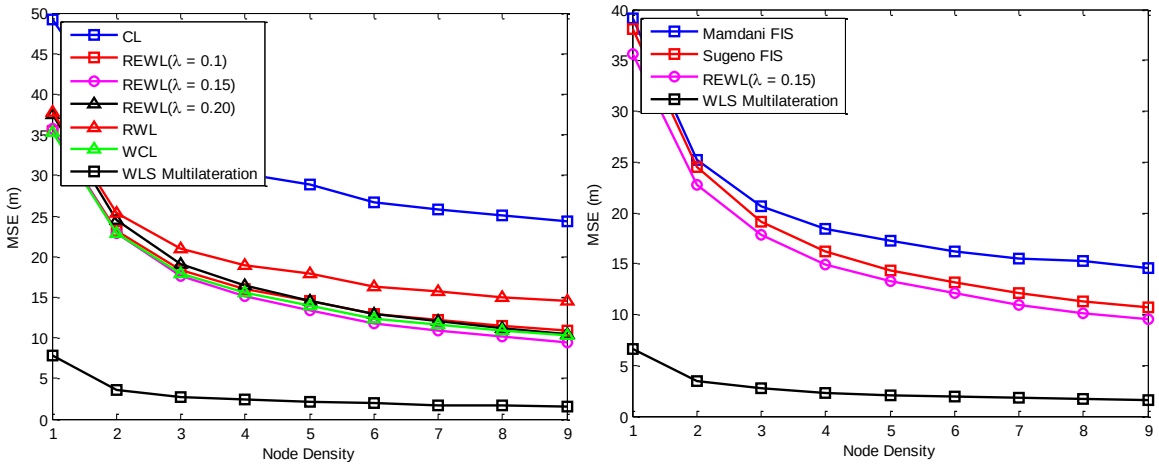

Figura 13. MSE vs. Densidad de nodos para (σ Ruido = 1 dBm).

En la Figura 14, se muestra que para una desviación estándar de ruido de 1 dBm, el algoritmo de Multilateración iterativa por LS, mantiene una precisión muy alta comparado con los demás algoritmos mostrados en dicha figura. Para una densidad de un (nodo/100m x 100m) la precisión es baja, ya que son pocos los nodos de referencia para estimar la localización del nodo de interés.

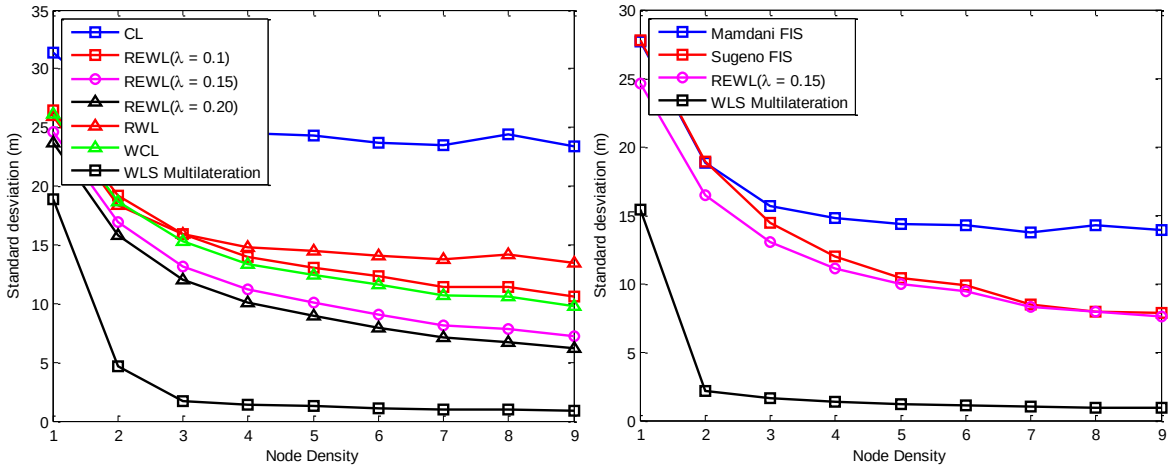

Figura 14. SD vs. Densidad de nodos para (σ Noise = 1 dBm).

A continuación se muestran unas imágenes, donde se observa la precisión de todos los algoritmos analizados para este escenario de evaluación, conforme varía el error de localización mediante la función de distribución acumulada CDF (Cumulative Distribution Function).

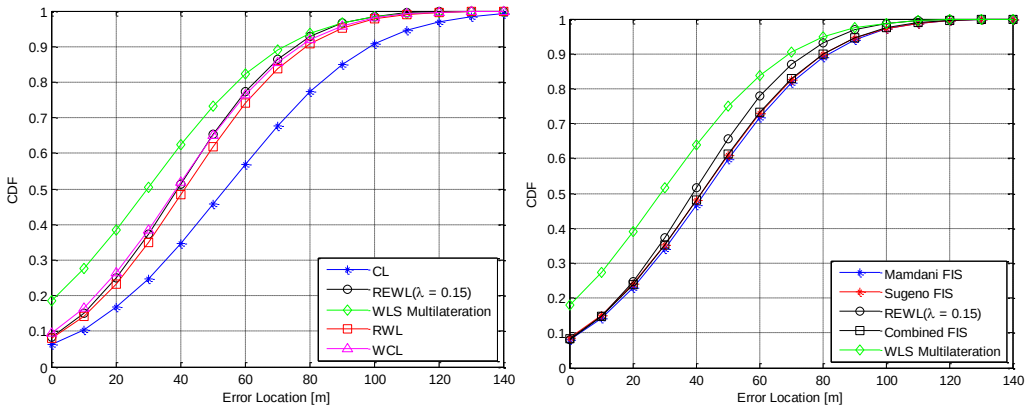

Figura 15. CDF vs. Error de localización para (σ Ruido = 4 dBm y Densidad de nodo = 1).

En la Figura 15 se observa que el algoritmo de Multilateración WLS presenta mejor precisión que los demás algoritmos analizados. Para un 90% de los casos,

presenta error de localización menor a 70m, para el 50% de los casos presenta error de localización menor a 30m.

En la Figura 16 se observa que la precisión del algoritmo de Multilateración WLS es considerablemente mejor que la de los demás algoritmos analizados. Para un 90% de los casos, presenta error de localización menor a 30m, para el 50% de los casos presenta error de localización menor a 10m.

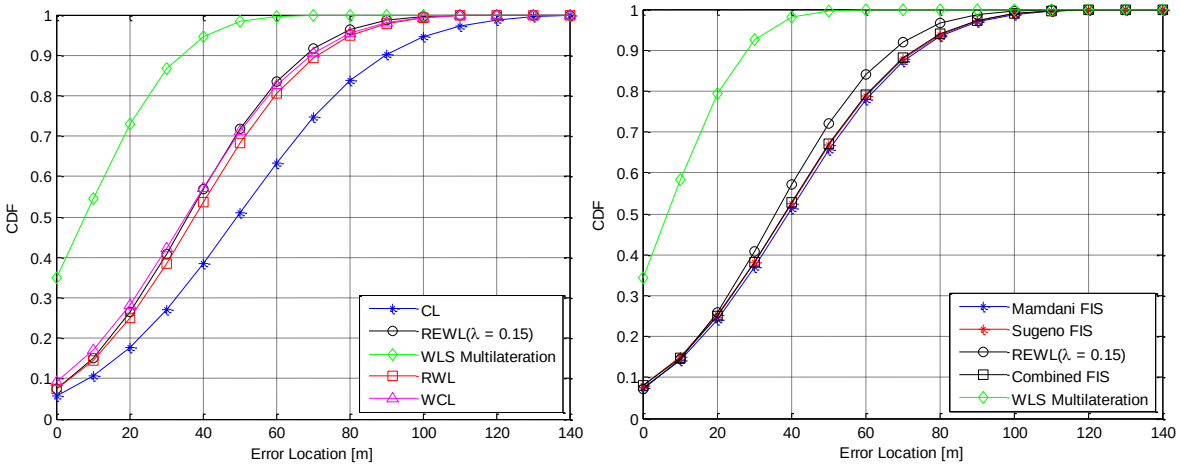

Figura 16. CDF vs Error de localización para (σ Ruido = 1 dBm y Densidad de nodos = 1).

4.1.4. Análisis del Desempeño de Algoritmos basados en distancia bajo escenario 1.

Análisis de MSE y SD

En las figuras 17 y 18 se observa el desempeño de los algoritmos de localización para densidades de nodos de 1 y 2 (nodos/100m x 100m); comparando los algoritmos analizados, se observa que el algoritmo de Multilateración WLS presenta mejor MSE y desviación estándar que los demás algoritmos analizados para ambas densidades de nodos. Para este análisis, sólo se tomó el algoritmo de Multilateración WLS para ser comparado con otras técnicas, ya que este algoritmo mostró mejor desempeño que los algoritmos de centroide presentados anteriormente.

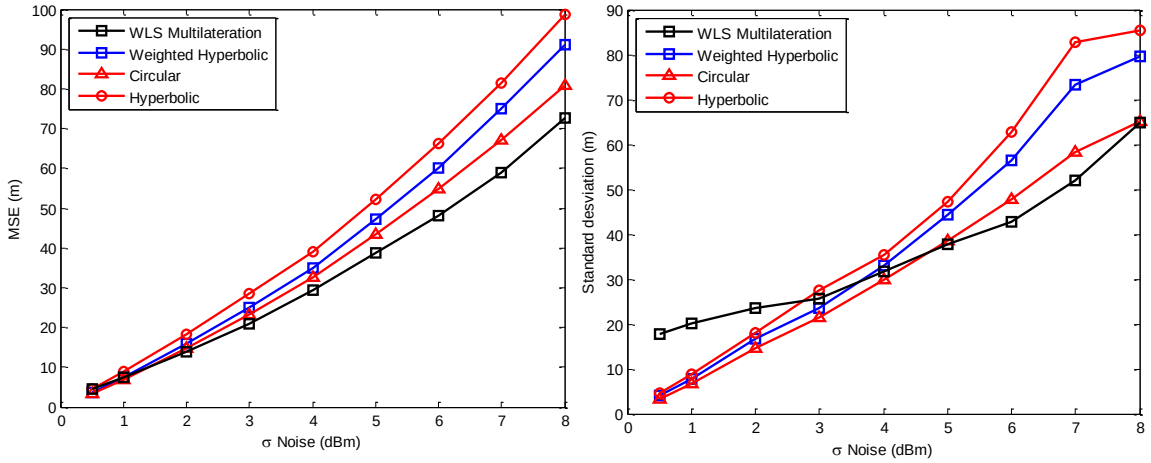

Figura 17. MSE y SD vs. (σ Ruido) para Densidad de nodos = 1.

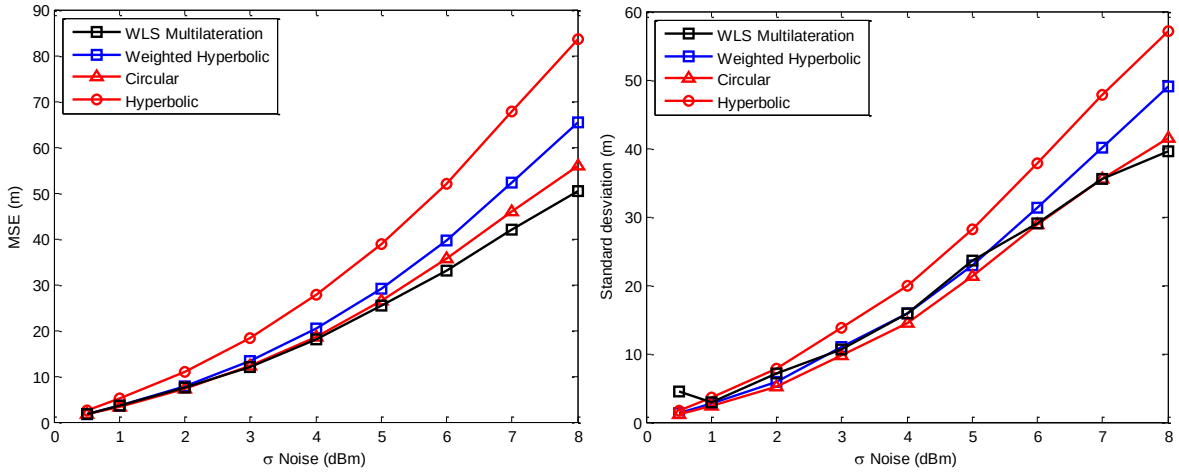

Figura 18. MSE y SD vs. (σ Ruido) para Densidad de nodos = 2.

En la Figura 19, se observa que el de mutilateración WLS y el algoritmo circular presentan el mismo desempeño de MSE, aunque en desviación estándar, el algoritmo circular se desempeña mejor.

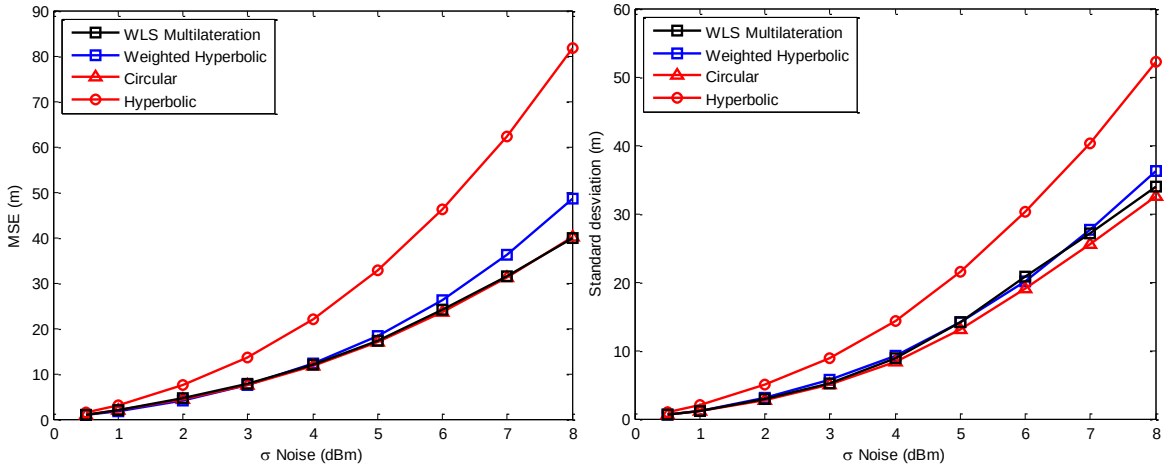

Figura 19. MSE y SD vs. (σ Ruido) para Densidad de nodos = 5.

Esta mejora del algoritmo circular comparado en los esquemas anteriores, se debe a la mejora del algoritmo Weighted Hyperbolic, ya que la posición calculada por este algoritmo es la posición inicialmente estimada por el algoritmo circular. El algoritmo circular, al igual que el algoritmo de multilateración WLS es iterativo, por lo que el usar la posición calculada por el algoritmo Weighted Hyperbolic, propicia que el algoritmo circular calcule una posición con menor error durante el número de iteraciones para converger a la posición estimada.

A continuación en las Figuras 20 y 21 se muestran las gráficas de desempeño de MSE y SD variando la densidad de nodos en la red para desviaciones estándar de ruido gaussiano de 1 dBm y 4 dBm.

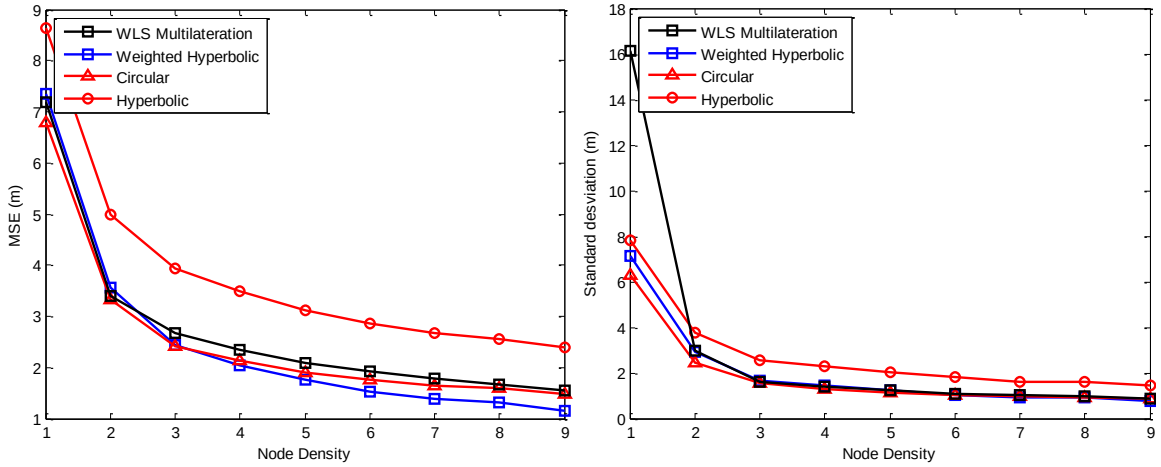

Figura 20. MSE y SD vs. Densidad de nodos para (σ Ruido = 1 dBm).

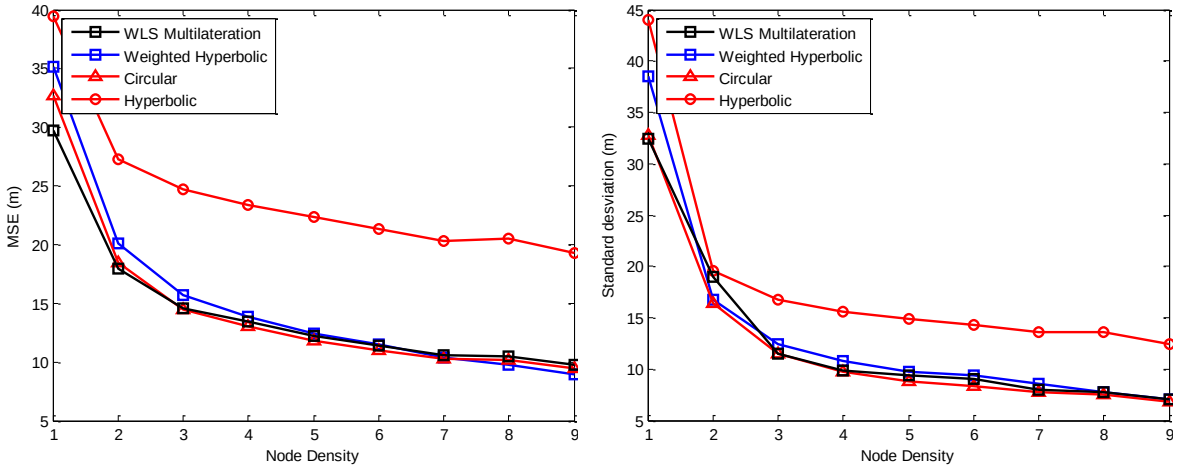

Figura 21. MSE y SD vs Densidad de nodos para (σ Ruido = 4 dBm).

En la Figura 21 se observa que el algoritmo de posicionamiento hiperbólico ponderado presenta un mejor desempeño de MSE para densidades superiores a 5 nodos por 100m x 100m que los demás algoritmos mostrados en la figura y, además, los algoritmos mantienen cierta robustez para densidades superiores a 6 nodos por 100m x 100m. En la Figura 22 el desempeño de los algoritmos de localización es similar a partir de densidades superiores a 5 nodos por 100m x 100m.

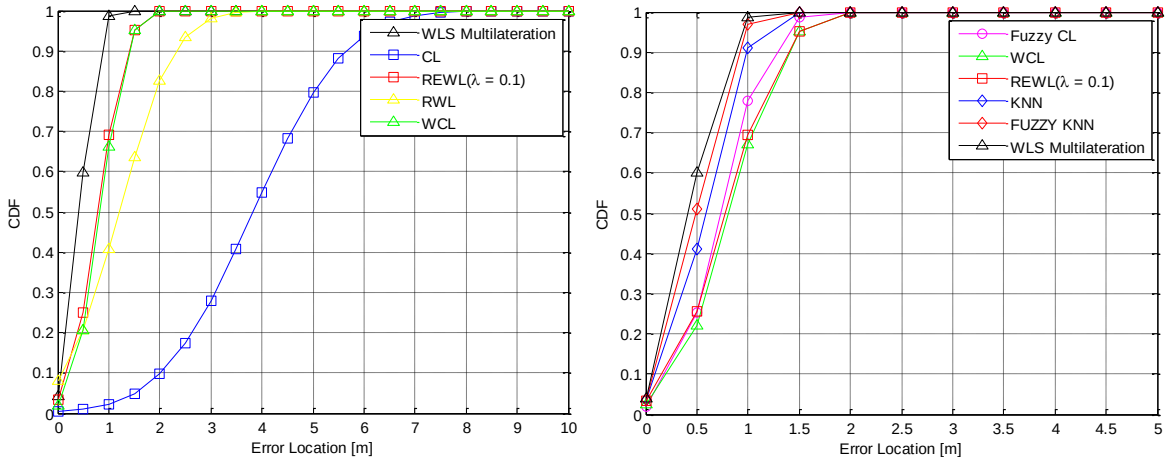

Figura 22. CDF vs. Error Location for (σ Noise = 2).

4.1.1. Descripción del Segundo Escenario de Evaluación.

La Figura 23 muestra el escenario de evaluación propuesto, en el que se evaluaron los algoritmos de localización de Centroide, Fuzzy Centroide, Multilateración WLS y Vecino más Cercano, para un área de 10m x 10m con 4 nodos de referencia.

La fuerza de la señal recibida fue calculada mediante el modelo log-normal shadowing. Donde, $n = 4$, (exponente de pérdidas en el espacio libre) y $P_o(dB) = -40dBm$ como potencia mínima a una distancia de 1m, la cual fue calculada considerando un sensor con un rango de transmisión de $20m$ en interiores, una sensitividad de $-92dBm$ y una potencia de transmisión de $1mW$ $(0dBm)$.

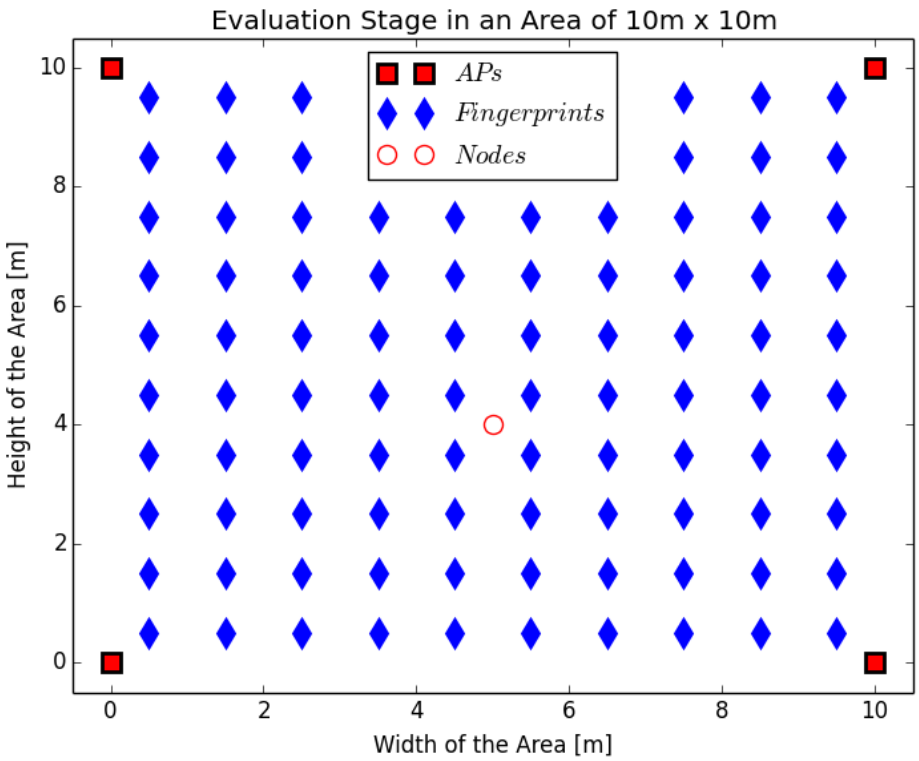

Figura 23. Escenario de Aplicación propuesto.

4.1.5. Análisis del Desempeño de los Algoritmos Analizados bajo escenario 2.

La Figura 24 presenta el desempeño en cuanto a MSE de los algoritmos de localización analizados para este escenario. Para niveles de ruido inferiores a $\sigma = 2\,dBm$, WLS Multilateration presenta menor MSE que todos los algoritmos presentados. Haciendo una comparación general de los algoritmos analizados, el algoritmo REWL ($\lambda = 0.1$) presenta menor MSE para niveles de ruido por encima de $\sigma = 3\,dBm$ que los demás algoritmos. Entonces para niveles de ruido inferiores a $\sigma = 2\,dBm$, multilateración se desempeña mejor y para niveles superiores a $\sigma = 3\,dBm$, REWL ($\lambda = 0.1$) se desempeña mejor.

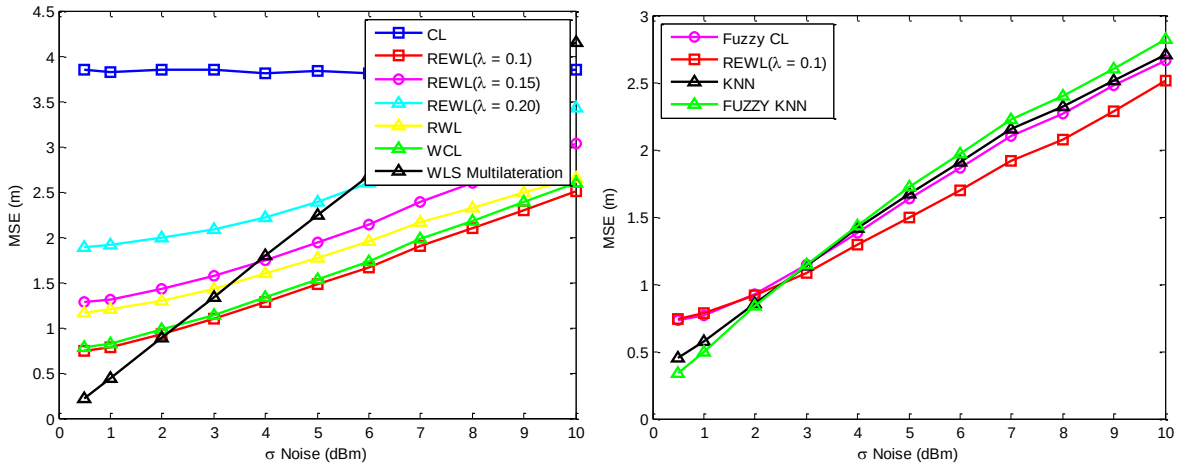

Figura 24. MSE vs. (σ Ruido).

Para niveles de ruido inferiores a $\sigma = 2\ dBm$, WLS Multilateration presenta mejor desempeño. Comparando KNN con Fuzzy KNN, se observa que el algoritmo Fuzzy KNN, presenta mejor desempeño para niveles de ruido inferiores a $\sigma = 3\ dBm$; en cambio para niveles de ruido superiores a este valor, se desempeña mejor KNN.

En la Figura 25 se muestra cómo varía la desviación estándar para los algoritmos analizados. Se observa que para niveles de ruido inferiores a $\sigma = 2\ dBm$, el algoritmo Fuzzy KNN es más preciso que el algoritmo KNN, en cambio para niveles superiores a este valor, KNN es más preciso. Para niveles altos de ruido, el algoritmo REWL ($\lambda = 0.1$) es más preciso que todos los algoritmos evaluados en este escenario, en cambio para niveles bajos de ruido, multilateración por mínimos cuadrados ponderados es más preciso. En conclusión para condiciones donde el ruido sea muy bajo, multilateración por mínimos cuadrados ponderados es la mejor opción para estimar la posición de un NOI, ya que resultó ser algoritmo con menor MSE y mejor precisión. Si se desea utilizar la información de los fingerprints para estimar la posición del NOI, considerando que el ruido gaussiano es bajo, es preferible utilizar Fuzzy KNN que KNN para estimar la posición del NOI.

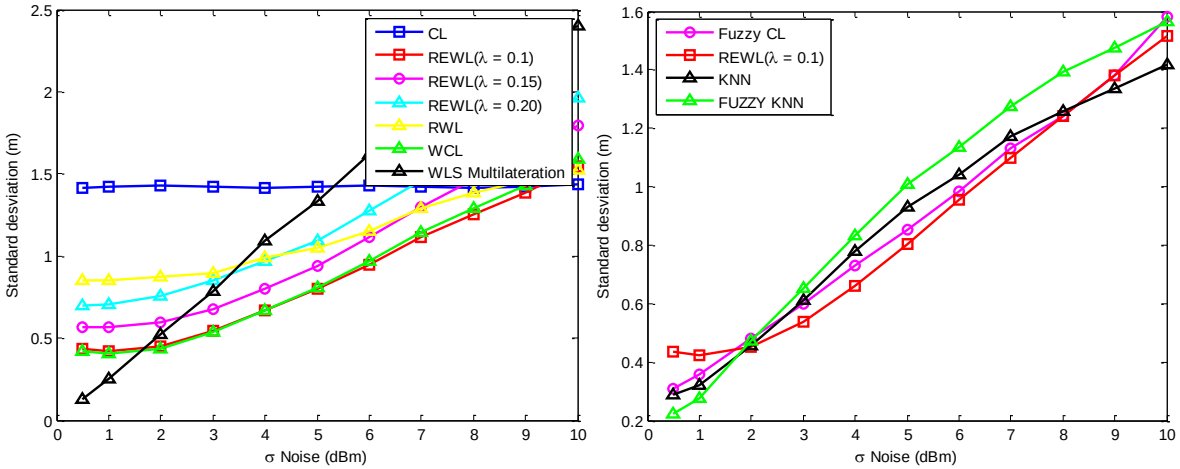

Figura 25. . SD vs. (σ Ruido).

En la Figura 26 presenta las curvas de CDF para los algoritmos de localización, analizados en este escenario, para $\sigma = 1\ dBm$, en la que se observa que WLS Multilateration, presenta mejor precisión que todos los algoritmos analizados, para el 90% de los casos. El error de localización de este algoritmo es menor a 1m y en el 50% de los casos el error es menor a 0.5m.

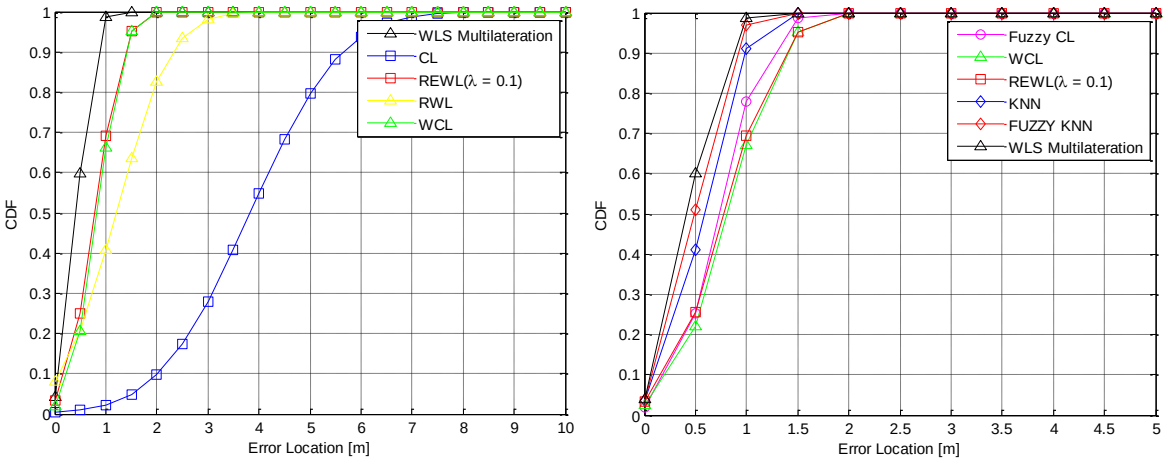

Figura 26. CDF vs. Error de localización para (σ Ruido = 2).

Capítulo V

Evaluación de algoritmos de localización en escenarios reales

5.1. Patrón de radiación

Las lecturas de la métrica RSS se realizaron en una red sensores implementada en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Sonora. Esta red cuenta con 5 dispositivos; 4 nodos ancla y 1 nodo móvil que es el encargado de recibir las señales de los 4 nodos ancla. Estas mediciones fueron tomadas en un grid de 11 metros x 11 metros, con separación de un metro entre cada medición, dando un total de 121 mediciones en cada uno de estos puntos, como se muestra en la Figura 32.

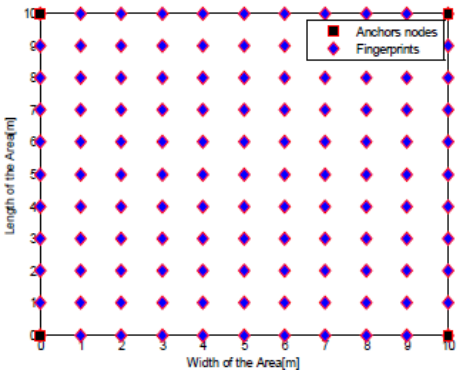

Figura 27. Grid de mediciones

La tabla II, muestra las diferentes alturas en las que se realizaron las mediciones, con el fin de observar el efecto que tiene la diferencia de alturas entre los nodos ancla y los nodos móviles sobre la medición de potencia.

Tabla II. Alturas de las mediciones realizadas.

	Grid #1	Grid #2	Grid #3	Grid #4
Nodo Móvil	1 Metro	1 Metro	1.8 Metros	1.8 Metros
Nodo Ancla	1 Metro	1.8 Metros	1 Metro	1.8 Metros
Nodo Ancla 2	1 Metro	1.8 Metros	1 Metro	1.8 Metros
Nodo Ancla 3	1 Metro	1.8 Metros	1 Metro	1.8 Metros
Nodo Ancla 4	1 Metro	1.8 Metros	1 Metro	1.8 Metros

La Figura 28 muestra los resultados obtenidos a partir de esta medición en forma de la caracterización del patrón de radiación en el área de interés. Estas mediciones se realizaron en escenarios exteriores, frente a la explanada de registro escolar, analizando los resultados se observa como la potencia de la señal recibida va decayendo en relación a la distancia, a mayores distancias, menor potencia recibida por el nodo móvil. Además, se tienen interferencias notorias con la calidad de la señal, pues en diversos puntos se observa cómo fluctúan las mediciones RSS, esto se cree que es debido a la antena instalada en el edificio CISCO que comunica el campus Nainari con el campus Centro,

En estas pruebas, se pueden observar ciertas irregularidades en el patrón de radiación debido a la interferencia de las redes existentes en el área. La diferencia existente entre las mediciones de cada ancla, muestra las grandes variaciones que presenta la métrica de RSS, por lo que se considera importante observar la pertinencia de la utilización de esta métrica como base para la estimación de distancia, pues, esto puedo representar en una gran variación entre los resultados obtenidos por los algoritmos.

A partir de estas mediciones, se ingresaron los valores promedio de RSS a los algoritmos para la estimación de distancias y comparación de estos valores con la simulación.

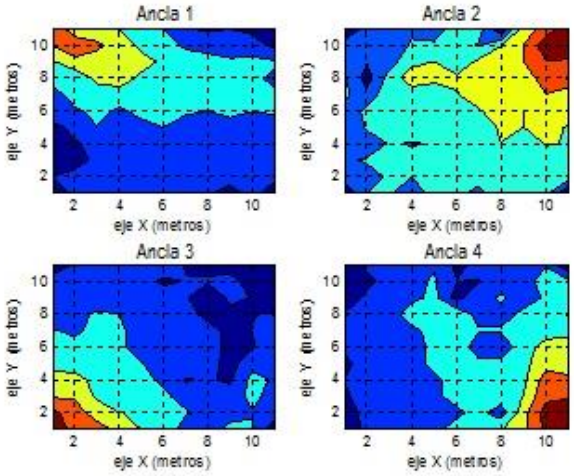

Figura 28. Patrón de radiación de potencias recibidas de los nodos ancla.

5.2. Descripción del sistema de localización

El sistema de localización desarrollado consta de 4 nodos anclas de posiciones conocidas, y un nodo móvil cuya de posición desconocida y que se encuentra dentro del área cobertura de los cuatro nodos ancla como se muestra en la Figura 29.

Los nodos ancla envían paquetes de datos en modo API hacia el nodo móvil a través de módulos transceptores XBee, con el fin de obtener el RSSI de los nodos anclas para estimar la posición del NOI, utilizando algoritmos de localización que serán programados en el sistema Arduino.

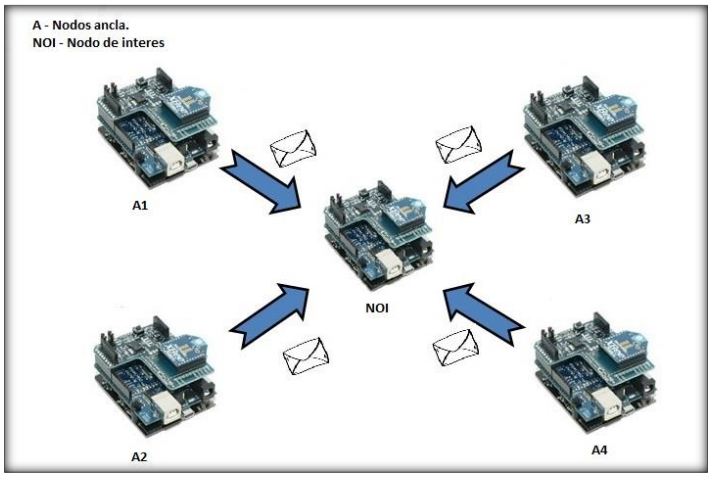

Figura 29. Modelo del sistema de localización.

5.3. Procedimiento de localización

La Figura 30 muestra el proceso a seguir desde él envió de datos hasta la obtención de la posición del nodo desconocido, el cual consta de la transmisión de un paquete de datos hacia el nodo móvil el cual detectara los niveles de lectura de RSS y se utilizará como métrica de entrada al algoritmo; una vez obtenida la posición del nodo móvil a través del algoritmo, la información de posición será reenviada hacia el nodo ancla.

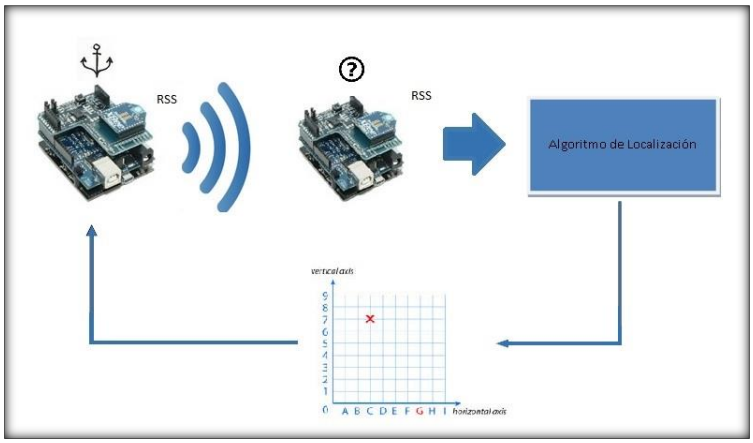

Figura 30. Proceso del sistema de localización.

5.4. Evaluación en escenarios reales

5.4.1. Evaluación de algoritmos de localización en interiores

5.4.2. Evaluación de algoritmos de localización en exteriores

5.5. Comparación entre los escenarios en simulación y reales

Capítulo VI

Propuesta de mejora para algoritmo de localización

6.1. Descripción de algoritmo

6.2. Contribución de la mejora de algoritmo

6.2.1 Métricas de desempeño

6.3. Evaluación de desempeño de algoritmo

Conclusiones

Bibliografía

[1] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. & Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks, IEEE Communications Magazine 40(8): 102–114.

[2] Vassis D., Kormentzas G. y Skianis C. 2006. Performance evaluation of single and multi-channel actor to actor communication for wireless sensor actor networks. Ad Hoc Networks, Elsevier Science. 4(4): 487-498p.

[3] Neal Patwari, Joshua N. Ash, Spyros Kyperountas, Alfred O. Hero III, Randolph L. Moses, and Neiyer S. Correal. (July 2005). “Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks.” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 54–69.

[4] G. Mao, B. Fidan and B. D. O. Anderson, (July 2007). “Wireless sensor network localization techniques.” Computer Networks. NY, USA, vol. 51, issue 10, pp. 2529-2553.

[5] L.A. Castro and J. Favela. (September 2005). “Continuous tracking of user location using recurrent neural networks.” in Proc. 6th Mexican Int. Conf. Computer Science. Puebla, Mexico, pp. 174–181.

[6] V. Pérez-González, D. Muñoz Rodríguez, C. Vargas-Rosales, and R. Torres-Villegas (2014). “Relational Position Location in Ad Hoc Networks,” submitted to Ad Hoc Networks, Elsevier.

[7] David Munoz, Frantz Bouchereau, Cesar Vargas and Rogerio Enriquez. 2009, “Position Location Techniques and Applications.” Elsevier/Academic Press. pp. 87-89.

[8] Neal Patwari, Joshua N. Ash, Spyros Kyperountas, Alfred O. Hero III, Randolph L. Moses, and Neiyer S. Correal. (July 2005). “Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks.” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 54–69.

[9] Thompson, B. and R. M. Buehrer. (2012). “Characterizing and improving the collaborative position location problem.” IEEE Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC), pp. 42-46.

[10] A. Savvides, C. Han, and M.B. Strivastava, “Dynamic fine grained localization in ad- hoc networks of sensors,” Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.166-179, 2001.

[11] B. Dil and P. Havinga, “Com-loc: A distributed range-free localization algorithm in wireless networks,” in Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, ISSNIP 2009, December 2009, pp. 457-462.

[12] Ambili Tottham, Mohammad Iftekhar, Shambhu Upadhyaya (2009). “Is RSSI a Reliable Parameter in Sensor Localization Algoriths – An Experimental Study”. In Field Failure Data Analysis Workshop (F2DA’09).

[13] T. S. Rappaport, “Wireless Communications: Principles and Practice”, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2nd edition, 2002.

[14] U. Nazir, M. A. Arshad, N. Shahid, S. H. Raza (October 2012). “Classification of Localization Algorithms for Wireless Sensor Network: A Survey”. International Conference on Open Source Systems and Technologies.

[15] Omotayo G. Adewumi, Karim Djouani, Anish M. Kurien. (February 2013). “RSSI Based Indoor and Outdoor Distance Estimation for Localization in WSN.” IEEE International Conference on, Cape Town, pp. 1534-1539.

[16] Hashemi H.: “The indoor radio propagation channel,” Proc. IEEE, July 1993, pp. 943-996.

[17] Xiang Ji, Hongyuan Zha. (March 2004). “Sensor Positioning in Wireless Ad-hoc Sensor Networks Using Multidimensional Scaling.” IEEE INFOCOM 2004. pp. 2652-2661.

[18] Dragos Niculescu, Badri Nath. (November 2001). “Ad Hoc Positioning System (APS).” IEEE GLOBECOM 2001. vol.5, San Antonio, TX, pp. 2926-2931.

[19] Liu, b., Lin, K. (January 2008) “Distance Difference Error Correction by Least Square for Stationary Signal-Strength-Difference-Based Hyperbolic Location in Cellular Communications.” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 57, issue 1, pp. 227-238.

[20] T. He, C. Huang, B.M. Blum, J. A. Swnkovic, and T. Abdelzaher. (September 2003). “Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks.” Proceedings of the ninth annual international conference on Mobile computing and networking (MOBICOM 2003). San Diego, California, pp. 81-95.

[21] Eva M. García, Aurelio Bermúdez, Rafael Casado, Francisco J. Quiles. (September 2007). “Wireless Sensor Network Localization using Hexagonal Intersection.” Proceedings of the IFIP WG 6.8 First International Conference on Wireless Sensor and Actor Networks (WSAN 2007). Albacete, Spain, vol. 248; pp. 155-166.

[22] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin. (October 2000). “GPS-less Low-Cost Outdoor Localization for Very Small Devices.” IEEE Personal Communications Magazine. Los Angeles, USA, Vol. 7, No. 5, pp. 28-34.

[23] Blumenthal, J., Grossmann, R., Golatowski, F., Timmermann, D. (October 2007). “Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks.” Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP). Alcala de Henares, pp. 1-6.

[24] Christine Laurendeau and Michel Barbeau (November 2009). “Centroid Localization of Uncooperative Nodes in Wireless Networks Using a Relative Span Weighting Method.” In: EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. pp. 358-361.

[25] Y. Sukhyun, L. Jaehun, and Wooyong. (May 2009). “A soft computing approach to localization in wireless sensor networks.” Expert Systems with Applications. Vol. 36, issue 4, pp. 7552–7561.