

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Electrónico

TRABAJO DE TITULACIÓN

**IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN HÍBRIDOS EN
REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS UTILIZANDO ZIGBEE**

Autor: Jonny Gustavo Pilco Quihui

Tutor:

Ing. Diego Danilo Vargas Culqui

Riobamba - Ecuador

Año 2020

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **“IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN HÍBRIDOS EN REDES DE SENSORES INALAMBRICOS UTILIZANDO ZIGBEE”**, presentado por: **Jonny Gustavo Pilco Quihuiri**, y dirigido por el **Ing, Diego Danilo Vargas Culqui**.

Una vez revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en el cual consta el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman.



Ing. Diego Danilo Vargas Culqui

Tutor.



Ing. Daniel Haro Mendoza

Miembro del tribunal



Ing. José Jinez Tapia

Miembro del tribunal

DECLARACIÓN EXPUESTA DE TUTORÍA

En calidad de tutor del tema de investigación: **“IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN HÍBRIDOS EN REDES DE SENSORES INALAMBRICOS UTILIZANDO ZIGBEE”**. Realizado por el Sr. **Jonny Gustavo Pilco Quihuiri**, para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sustentada públicamente y evaluada por el jurado examinador que se designe.

Riobamba, 24 septiembre 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Diego Vargas", enclosed within a hand-drawn oval shape.

Ing. Diego Danilo Vargas Culqui

DOCENTE TUTOR.

AUDITORÍA DE INVESTIGACION

La responsabilidad del contenido de este proyecto de investigación titulado: **“IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN HÍBRIDOS EN REDES DE SENSORES INALAMBRICOS UTILIZANDO ZIGBEE”**, corresponde exclusivamente a Jonny Gustavo Pilco Quihouri, Ing. Diego Danilo Vargas Culqui y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Jonny Pilco", enclosed within a blue oval shape.

Jonny Gustavo Pilco Quihouri

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado al esfuerzo de mis padres que día a día me dieron el apoyo incondicional dando ánimo para no rendirme en este largo trayecto que ha sido mi vida estudiantil, me ofrecieron enseñanzas de vida para superar las adversidades en este largo camino, así también se lo dedico a mis hermanos, familiares amigos, que me dieron los ánimos para poder sobrellevar todo el esfuerzo necesario para poder cumplir mi meta propuesta.

Jonny Pilco Q.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a mi familia a quienes con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a llegar a mi meta, gracias a sus sabios consejos pude salir adelante mostrándome el camino correcto que se debe seguir en esta vida para lograr convertirme en una gran persona y profesional, también a mis amigos con quienes formamos gratos recuerdos, la Ing. Diego Danilo Vargas Culqui quien me ayudo con la investigación siendo guía fundamental para su culminación.

A la Universidad Nacional de Chimborazo por guiar mi formación académica, profesional y humana, a sus profesionales que me otorgaron su conocimiento para poder desarrollar todo mi potencial.

Finalmente, agradezco a todas las personas que me ayudaron de forma indirecta para el desarrollo del proyecto.

Jonny Gustavo Pilco Q.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I	5
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.2 OBJETIVOS	6
1.2.1 GENERAL	6
1.2.2 ESPECÍFICOS.	6
CAPITULO II.....	7
2 MARCO TEORICO	7
2.1 REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS	7
2.1.1 Requerimientos.....	8
2.1.2 Aplicaciones	8
2.1.3 Arquitectura	10
2.1.4 Protocolo de comunicación.....	11
2.1.5 Tecnologías inalámbricas para WSN	12
2.2 ZIGBEE.....	14
2.2.1 Topologías	15
2.2.2 Dispositivos de comunicación ZigBee.....	16
2.2.3 Elementos de una red con tecnología ZigBee.....	17
2.2.4 Modos de operación	18
2.2.5 Comandos AT	20
2.3 LOCALIZACIÓN DE NODOS EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS	21
2.3.1 Clasificación de los algoritmos de localización	21
2.3.1.1 RSSI (Indicador de intensidad de señal recibida).....	23
2.3.1.2 TDOA (diferencia en el tiempo de llegada)	26
2.3.1.3 AOA (Angulo de llegada)	27
2.3.1.4 Técnicas basadas en el almacenamiento de datos de distancia.....	29
2.3.2 Parámetros de desempeño de los algoritmos de localización	29

2.3.3	Trabajos relacionados.....	31
CAPITULO III	35
3	METODOLOGÍA.....	35
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	35
3.2	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	35
3.3	POBLACIÓN Y MUESTRA	35
3.3.1	POBLACIÓN.....	35
3.3.2	MUESTRA.....	35
3.4	FUENTES DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	36
3.5	INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	36
3.6	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	37
3.7	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	39
3.7.1	REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	39
3.7.2	DISEÑO DEL SISTEMA	39
3.7.2.1	Definición del entorno de despliegue de la red WSN	40
3.7.2.2	Selección de los dispositivos que conformaran la WSN	40
3.7.2.3	Topología de red a emplear.....	44
3.7.2.4	Configuración de los dispositivos	45
3.7.2.5	Obtener el valor RSSI.....	53
3.7.2.6	Obtener el valor de la distancia entre dispositivos	60
3.7.2.7	Obtener la ubicación del nodo móvil mediante la técnica RSSI y AOA	63
CAPITULO IV	68
4	RESULTADOS	68
CAPITULO V	86
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
5.1	CONCLUSIONES.....	86
5.2	RECOMENDACIONES.....	87
BIBLIOGRAFÍA	88

ANEXOS92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Aplicaciones en el Mercado	9
Figura 2 Arquitectura de una WSN	10
Figura 3 Clasificación de las tecnologías inalámbricas	13
Figura 4 Pila de protocolo ZigBee.....	14
Figura 5 Topología ZigBee.....	16
Figura 6 Modulo XBee	16
Figura 7 Trama Xbee en modo API.....	19
Figura 8 Trilateración	25
Figura 9 Escenario para aplicar método de trilateración	26
Figura 10 Medida de distancia TDOA	27
Figura 11 Angulo entre nodos	28
Figura 12 Técnica de localización mediante AOA.....	28
Figura 13 Grid de Mediciones	32
Figura 14 Nodos ancla y móvil.....	32
Figura 15 Sistema de parqueo inteligente para vehículos	34
Figura 16 Diagrama de flujo del proyecto	39
Figura 17 Espacio definido para la WSN	40
Figura 18 Módulo de comunicación ZigBee-Pro serie S2C. con antena.....	42
Figura 19 XBEE EXPLORER USB	43
Figura 20 Arduino Uno.....	43
Figura 21 Topología estrella en la red WSN	45

Figura 22 Conexión del Módulo Xbee al ordenador	45
Figura 23 Búsqueda de Módulos Conectados	46
Figura 24 Selección de todos los módulos disponibles	46
Figura 25 Configuración de la velocidad de conexión entre la computadora y el Xbee	47
Figura 26 Selección de Módulos conectados	47
Figura 27 Ventana con los dispositivos agregados.....	48
Figura 28 Modulo a configurar.....	48
Figura 29 Parámetros de configuración de Módulos Xbee	49
Figura 30 Parámetros a configurar en dispositivos Router.....	50
Figura 31 Detalles de red.....	50
Figura 32 Configuración del Módulo Coordinador	51
Figura 33 Configuración de red del Coordinador.....	52
Figura 34 Direccionamiento del coordinador	52
Figura 35 Generación de tramas API	53
Figura 36 Construcción de la trama API	54
Figura 37 Inclusión de la librería en Arduino.....	56
Figura 38 Configuración de los puertos serial.....	56
Figura 39 Función para envío de trama en el Router A.....	57
Figura 40 Trama de respuesta del Router A	57
Figura 41 Prueba de medición de distancia	59
Figura 42 Localización del nodo mediante 3 anclas.....	60
Figura 43 Programación para la medición de distancia entre el nodo móvil y el Router A.....	61
Figura 44 Distancia al Router A	61

Figura 45 Distancia al Router B	62
Figura 46 Distancia al Router C	62
Figura 47 Localización de nodo móvil	63
Figura 48 Calculo de distancia en el nodo ancla A	64
Figura 49 Calcula de la distancia el nodo ancla B.....	65
Figura 50 Calcula de la distancia el nodo ancla C.....	66
Figura 51 Ubicación del nodo móvil mediante el programa	69
Figura 52 Ubicación del nodo móvil mediante medición.....	69
Figura 53 Ubicación del nodo móvil mediante el programa	70
Figura 54 Ubicación del nodo móvil mediante la medición.....	70
Figura 55 Ubicación del nodo móvil mediante el programa	71
Figura 56 Ubicación del nodo móvil mediante medición.....	71
Figura 57 Ubicación del nodo móvil mediante el programa	72
Figura 58 Ubicación del nodo móvil mediante medición.....	72
Figura 59 Ubicación del nodo móvil mediante el programa	73
Figura 60 Ubicación del nodo móvil mediante medición.....	73
Figura 61 Muestras 1,5,10	76
Figura 62 Muestras 1,3,6,10	77
Figura 63 Muestras 1,3,6,10	77
Figura 64 Muestras 1,3,6,10	78
Figura 65 Muestras 1,3,6,10	78
Figura 66 Posición 1 calculada.....	81
Figura 67 Posición 1	81

Figura 68 Posición 2 calculada.....	82
Figura 69 Posición 2.....	82
Figura 70 Posición 3 calculada.....	83
Figura 71 Posición 3.....	83
Figura 72 Posición 4 Calculada.....	84
Figura 73 Posición 4.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Protocolos de enrutamiento en WSN	12
Tabla 2 Comparación entre las tecnologías de Bluetooth y Zigbee	13
Tabla 3 Módulos de familia XBee.....	17
Tabla 4 Trama API	20
Tabla 5 Comandos AT.....	21
Tabla 6 Estudio comparativo de los Algoritmos de localización	22
Tabla 7 Operacionalización de las variables	38
Tabla 8 consideración de los módulos XBee serie 2	41
Tabla 9 Características del módulo XBEE	42
Tabla 10 Características del arduino Genuino Uno R3	44
Tabla 11 Tabla resumen de configuración de los módulos	53
Tabla 12 Trama API para adquisición de RSSI.....	55
Tabla 13 Tabla resumen de peticiones RSSI	55
Tabla 14 Trama API con el comando DB	58
Tabla 15 Mediciones de Distancia.....	58
Tabla 16 Calculo de la constante de perdidas en el espacio libre.....	59
Tabla 17 Tabla de mediciones de distancia	63
Tabla 18 Comparación de resultados.....	67
Tabla 19 Ubicación del nodo móvil	68
Tabla 20 Estimación de la Exactitud	74
Tabla 21 Estimación de la precisión.....	75
Tabla 22 Materiales utilizados en el proyecto	79

Tabla 23 Costo de producción.....	79
Tabla 24 Posición Real de los nodos en exteriores	80
Tabla 25 Estimación de la precisión y exactitud en exteriores.....	85

RESUMEN

La localización de nodos móviles en una red de sensores inalámbricos es una aplicación ampliamente investigada en los últimos años, la cual ha permitido el desarrollo de tecnologías de localización con un alto grado de exactitud, no obstante, dichas tecnologías han incrementado los costos tanto de hardware como de software además de dejar inútiles a otras aplicaciones que puede desempeñarse en la misma red, es así como se plantea el diseño de una red de sensores inalámbricos basados en ZigBee el cual permita aplicar algoritmos de localización a un costo reducido sin interferir en otras aplicaciones que pueda desarrollar la red, dichos algoritmos se fundamentan en métricas basados en rango (RSSI y AOA), las cuales deben ser adquiridas y procesadas por el software MatLab para su posterior aplicación en los algoritmos de localización en el mismo, cabe recalcar que dichas métricas fueron seleccionadas a través de un estudio la cual determinó que son muy confiables y no necesitan de hardware adicional que puedan elevar el costo de la red. Los resultados se evaluaron en base a los parámetros de desempeño de los sistemas de localización obteniendo resultados bastante aceptables con un menor costo de red en comparación a otros sistemas de localización.

Palabras clave: Algoritmos de localización, AOA, MatLab, RSSI, Redes de sensores, Xbee, Zigbee,

ABSTRACT

The location of mobile nodes in a wireless sensor network is an application widely investigated in recent years. It has allowed the development of location technology with a high tech accuracy; however, that sort of technology has increased hardware costs. Specifically, as software, it turns useless to other applications that can function in the same network. For this reason, a wireless sensor network design has been proposed, based on ZigBee. It allows applying some location algorithms at a reduced cost without interfering with other applications that the network may develop. These algorithms are based on range-based metrics (RSSI and AOA), which must be bought and processed by MatLab software for subsequent application within the location algorithms in it. Therefore, it should be noted that these metrics were selected through a study which stated that they are very reliable and an additional hardware is not needed. Those may probably increase the cost of the network. In a nutshell, the results were evaluated, based on the performance parameters of the location systems. They showed significant and acceptable results with a lower network cost, while compared with other location systems.

Keywords: Location algorithms, AOA, MatLab, RSSI, Sensor networks, Xbee, Zigbee,

INTRODUCCIÓN.

La industria de las comunicaciones está en constante crecimiento debido al alto número de sistemas y dispositivos electrónicos que se conectan a una determinada red de telecomunicaciones, dichas redes tienen como objetivo principal el intercambio de información entre dispositivos con el fin de resolver las diferentes necesidades de los usuarios, tal es el caso de las redes de sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés, Wireless Sensor Networks), cuya aplicación permite a los usuarios obtener información correspondiente a las diferentes variables de nuestro entorno con el fin de poder controlar o manipular las condiciones del ambiente, esto lo hace mediante numerosos dispositivos distribuidos espacialmente en el entorno a controlar.

En la actualidad existen sistemas que utilizan dispositivos electrónicos los cuales integran transductores que nos permiten medir magnitudes físicas y transformarlas en magnitudes eléctricas a estos dispositivos se les denominan sensores. La nueva generación de sensores incorpora un elemento llamado transceptor el cual permite interconectarse de forma inalámbrica entre ellos. Es así como surgen las denominadas WSN que se refieren a redes formadas por sensores inteligentes que intercambian información entre sí, interconectados mediante un protocolo de comunicación inalámbrico (Roca, 2012).

Se denomina Zigbee a la tecnología de comunicación inalámbrica la cual funciona mediante un conjunto de protocolos de alto nivel basados netamente en el estándar IEEE 802.15.4 definidas para las redes inalámbricas de área reducida. Se caracterizan por ser utilizadas en aplicaciones que necesitan comunicaciones seguras con baja tasa de transferencia de datos y el máximo rendimiento de la vida útil de su fuente de alimentación. Entre otras características se encuentran; bajos costos, mínimo consumo de energía, flexibilidad de red, etc. Dicho estándar, se puede utilizar para muchas aplicaciones como por ejemplo la domótica, automatización industrial, reconocimiento remoto, medicina, entre otras. (Acosta, 2006).

El sector de las telecomunicaciones ha mostrado cierto interés por las redes WSN debido a que pueden ser desplegadas en entornos hostiles sin alguna infraestructura de red previa, tienen un amplio rango de aplicaciones entre las cuales se encuentran la automoción, militares, médicas, predicciones medioambientales, entre otras.

Una de las áreas más importantes en la investigación de las WSN se refiere a la localización de objetos dentro de un área de cobertura o monitoreo de la red. Las WSN a menudo se implementan sin conocimiento exacto de las ubicaciones de los nodos sensores, éstos también pueden llegar a ser móviles dentro del área de cobertura permitida (Mao & Fidan, 2009) .

Un sistema de localización consiste en: nodos que necesitan ser ubicados o rastreados, balizas o anclas que sirven como puntos de referencia, estación central de procesamiento que implementa algoritmos de posicionamiento la cual coordina las comunicaciones de datos y muestra los resultados de posicionamiento o seguimiento.

El sistema puede usar diferentes métricas de rango para obtener información de posición, entre las más comunes se encuentran: fuerza de la señal recibida (RSS, por sus siglas en inglés, Received Signal Strength) que se define como el nivel de potencia de las señales recibidas por un dispositivo, tiempo de llegada (TOA, por sus siglas en inglés, Time of Arrival) la cual se especifica como la medida del tiempo de viaje de una señal enviado desde un único transmisor a un receptor, diferencia de tiempo de llegada (TDOA, por sus siglas en ingles Time Difference of Arrival) la cual se basa en la medición precisa entre la llegada de las señales en los nodos ancla y ángulo de llegada (AOA, por sus siglas en inglés, Angle of Arrival) cuya medición permite conocer la dirección desde la cual se recibe la señal (Rugeles & Leon, 2013).

En el año 2012 se realizó un estudio comparativo y clasificación de los algoritmos de localización para redes de sensores inalámbricos cuyos objetivos fueron: analizar el funcionamiento de algoritmos de posicionamiento y desarrollar diferentes técnicas de localización de nodos móviles (Nazir , Arshad, Shahid, & Raza, 2012). Como resultado se obtuvieron algoritmos basados en técnicas:

- Centralizadas y distribuidas.

- Dentro y fuera de rango.
- Con o sin balizas.

Los resultados del estudio comparativo decidieron que los algoritmos basados en técnicas dentro y fuera de rango tienen una precisión media-alta al momento de encontrar un nodo desconocido. No obstante, los costos computacionales y de hardware resultaron ser mucho más bajos que las demás técnicas debido a que los nodos no necesitan de ningún hardware adicional.

En el año 2017 se realizó un estudio denominado “Localization in Wireless Sensor Networks: A Survey on Algorithms, Measurement Techniques, Applications and Challenges” en donde dividieron los algoritmos en localización en dos categorías: las centralizadas cuyo algoritmo permite medir todas las distancias de los sensores a una ubicación central permitiendo conocer todas las posiciones de los sensores y las distribuidas cuyo algoritmo permite a cada sensor individual localizar su propia posición mediante la medición de distancia de otros nodos ancla, estos algoritmos a su vez se sub dividen en algoritmos dentro y fuera de rango (Anup & Takuro, 2017).

Bajo este precedente se realizaron múltiples estudios de los algoritmos basados en técnicas dentro de rango como: RSSI, AOA, TDOA y fuera de rango como: per-hop distance, single-neighbor, multi-neighbor. En el estudio “Localización basada en RSS a través de rangos bayesianos y posicionamiento iterativo de mínimos cuadrados” propuso una formulación bayesiana que mejora el enfoque común de invertir la fórmula de la pérdida de trayectoria dando como resultado una mejora considerable en la precisión con un ligero aumento de la complejidad computacional (Coluccia & Ricciato, 2014).

Una de las alternativas para mejorar la precisión en la localización de nodos fue combinar 2 diferentes métodos de las técnicas denominadas dentro de rango como se muestra en el estudio “Localización de destino utilizando medidas combinadas de RSS y AOA” los cuales analizaron un conjunto de algoritmos para la localización dando como resultado un excelente equilibrio entre la precisión de la estimación y la complejidad computacional mostrando un buen rendimiento y solidez (Tomic, Beko, Dinis, & Bernardo, 2018).

Con este proyecto se pretende la implementación física de una red de sensores inalámbricos bajo el estándar IEEE 802.15.4 el cual permita realizar mediciones utilizando los métodos RSS y AOA y procesarlos mediante algoritmos en MatLab; el resultado de la localización de los nodos (fijos y móviles) podrá ser observado en pantalla. Adicionalmente se analizará que los nodos se puedan localizar en redes de sensores inalámbricos tanto de exteriores como en ambientes cerrados.

CAPITULO I

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las actuales redes de sensores inalámbricas presentan diversos problemas en los dispositivos electrónicos los cuales son denominados nodos sensores, mismos que al ser de bajo costo no disponen de recursos suficientes (capacidad de procesamiento, consumo de energía, niveles de potencia de transmisión y recepción, etc.), lo que se evidenció en las mediciones de potencia recibida necesarios para el cálculo de distancia, conllevando a una serie de problemas al sistema de localización, la medida RSSI no es constante debido a la presencia de reflexiones, difracciones, dispersión de la señal y pérdidas por multi-trayecto, y en las mediciones AOA es necesario un arreglo de antenas directivas para conocer el valor AOA de una señal incidente lo que ocasiona un elevó de costes de hardware, sin embargo también se puede utilizar las medidas RSSI de al menos dos nodos para conocer este parámetro.

En base a lo anterior es necesario el diseño de una red de sensores que tenga la capacidad de realizar mediciones con mayor precisión tanto RSS como AOA para procesarlos mediante la implementación de algoritmos de localización, lo que conlleva a una mejora en la precisión de localización de un nodo móvil, con menor costo tanto en hardware, computacional y de comunicación.

El presente proyecto utilizará una red de sensores inalámbricos bajo el estándar de comunicación IEEE 802.15.4 Zigbee el cual fue diseñado para redes inalámbricas con capacidades de control y monitoreo que sean confiables, de bajo consumo de energía y de bajo costo. Además, que los estudios realizados hasta la fecha se concentran en estimadores de localización y no en el diseño de la red para la obtención de las mediciones necesarias.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GENERAL

- Implementar un algoritmo de localización híbrido a través de la combinación de los métodos RSS y AOA en redes de sensores inalámbricos utilizando ZigBee.

1.2.2 ESPECÍFICOS.

- Estudiar los algoritmos de localización en redes de sensores inalámbrico para comparar los parámetros de desempeño de los algoritmos en torno a la precisión, exactitud y costo de hardware en un entorno definido.
- Diseñar e implementar una red de sensores inalámbricos basados en ZigBee que permita aplicar un algoritmo de localización híbrido; y una interfaz de usuario que conceda la visualización de los resultados en MatLab.
- Evaluar el grado de cumplimiento de las especificaciones del algoritmo de localización híbrido mediante la medición de la precisión, exactitud y costo de hardware para la aplicación de localización de nodos móviles en una red de sensores inalámbricos basados en ZigBee.

CAPITULO II

2 MARCO TEORICO

2.1 REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS

Las redes de sensores nacen a partir de los sistemas de comunicación industrial, dichas comunicaciones se formaron con el objetivo de dar automatización en la industria, en sus inicios este tipo de redes se denominaron buses de campo por el motivo de la topología que utilizaba la red, entonces por definición “los buses de campo son buses de datos, para la comunicación digital, multipunto, para el control de la industria e instrumentación de dispositivos como; actuadores transductores y controladores locales” según la Comisión Electrónica Internacional en su normativa IEC 61158.

Las comunicaciones a nivel de campo sustituyeron a las conexiones punto a punto entre los equipos de control, los sensores y actuadores permitiendo beneficios como flexibilidad, modularidad o la facilidad de conexión, al inicio se consideró utilizar las redes LAN pero las características industriales (bajas tasas de transferencias de datos, fiabilidad, interoperabilidad, etc.) no permitieron usar estas tecnologías informáticas que estaban diseñada para las comunicaciones informáticas (Americo, 2011).

Actualmente las redes de sensores han evolucionado de tal manera que ya no necesitan la utilización de redes cableadas para poder obtener todas las necesidades requeridas por las redes industriales, esta evolución ha permitido combinar las redes de sensores con la tecnología inalámbrica denominándose WSN.

Las WSN consisten en un sin número de dispositivos electrónicos inteligentes denominados sensores los cuales se encuentran ubicados físicamente en el espacio con el fin de monitorizar y controlar las condiciones físicas que ocurren en el mundo real, con el avance de la tecnología dichos sensores permiten el almacenamiento de datos y la comunicación a través de una determinada red (Rueda & Tabalera, 2017) (Diana & Santamaria, 2013).

2.1.1 Requerimientos

Las WSN poseen requerimientos dependiendo el tipo de aplicación que se utilice, pero en general los principales requerimientos según Hadim y Nohamed (Rueda & Tabalera, 2017) en una WSN básica son las siguientes:

- Topología dinámica y mantenimiento.
- Uso eficiente de energía y recursos limitados.
- Hardware y Software específico a la aplicación.
- Sincronización de los dispositivos.
- Seguridad y privacidad.
- Facilidad de despliegue.
- Diversidad de aplicaciones.
- Organización de la red.
- Integración con el mundo real.

2.1.2 Aplicaciones

La facilidad de implementación y la flexibilidad de comunicación de los datos, las WSN permiten una amplia gama de aplicaciones como se muestra en la Figura 1, entre los principales se encuentran:

- Aplicaciones militares, para estas aplicaciones se pueden encontrar redes para el reconocimiento o vigilancia del área de batalla.
- Aplicaciones Medioambientales, estas aplicaciones tienen un extenso rango de usos como por ejemplo seguimiento de animales, agricultura de precisión, estudios de contaminación, detección de inundaciones, estudios sísmicos, seguridad de estructuras, etc.

- Aplicaciones médicas, aquí se encuentran usos como la tele monitorización de datos fisiológicos en los pacientes, el seguimiento de médicos a los pacientes, diagnósticos, etc.
- Aplicaciones sociales, se utilizan redes para monitorear datos de una tarea específica, almacenando los datos los cuales permite realizar recomendaciones en torno al estilo de vida de los usuarios.
- Aplicaciones de automoción, aplicado a la industria automovilística, las WSN permiten realizar la monitorización y control en sistemas modernos de gestión de motor, sistemas de seguridad y confort.
- Aplicación domótica, son WSN aplicadas a los hogares con el fin de mejorar el confort o disponer de un sistema de comunicación interno o simplemente la accesibilidad en los hogares (Flores, 2012).

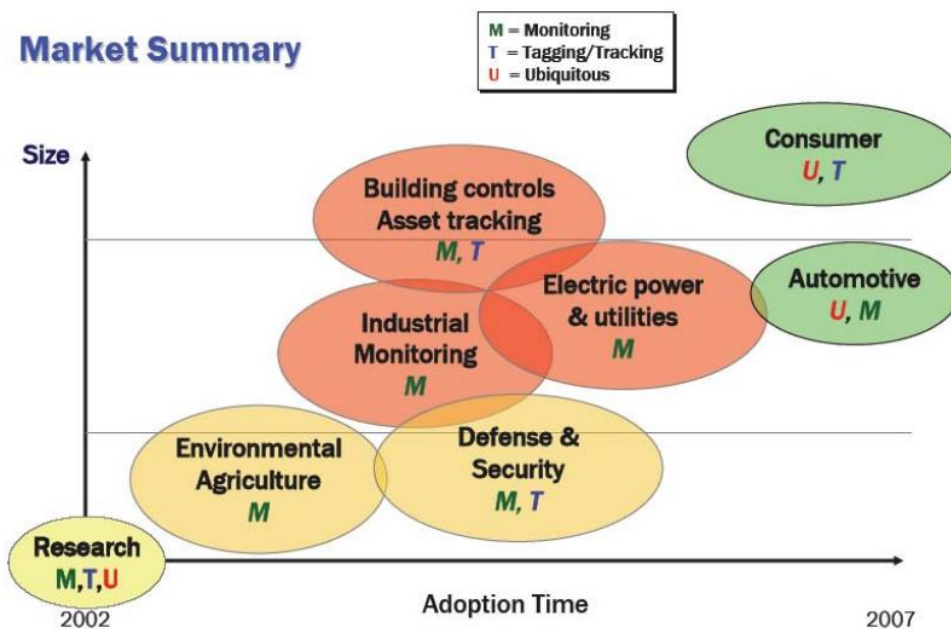


Figura 1 Aplicaciones en el Mercado

Fuente: (Fernandez, Ordines, Martinez, Gonzales, & Alba, 2020)

2.1.3 Arquitectura

Una WSN básica se encuentra formada por diversos nodos sensores inteligentes que se conectan de manera inalámbrica, un Gateway o puerta de enlace que tiene como objetivo controlar a la red y a una estación base como se muestra en la Figura 2 (Muñoz & Molales, 2018).

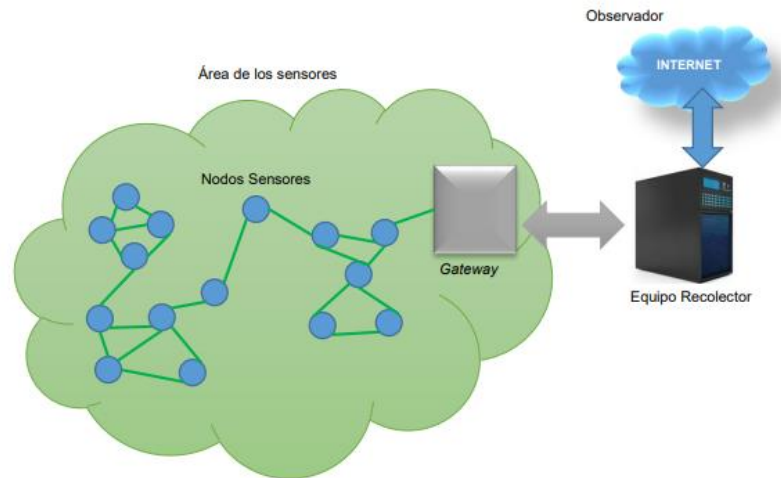


Figura 2 Arquitectura de una WSN

Fuente (Muñoz & Molales, 2018)

- **Nodos sensores o motas.**

Son dispositivos electrónicos que recogen la información del entorno, la procesan y la transmiten inalámbricamente a otro destinatario, estos dispositivos están diseñados especialmente para cumplir una única función lo que reduce su coste y aumenta su vida útil, suelen estar estructurados internamente de los siguientes componentes (Muñoz & Molales, 2018):

- Procesador.
- Transceptor.
- Memoria.
- Fuente de potencia.
- Sensor.

- **Gateway o puerta de enlace.**

Es un dispositivo electrónico que realiza la función de coordinar la red a través un protocolo de comunicación la cual permite la interconexión con todos los nodos de la red, además, permite la reconfiguración de la red y la transmisión de los datos a una estación base externa (Fernandez, Ordines, Martinez, Gonzales, & Alba, 2020).

- **Estación base o equipo receptor.**

Es un dispositivo el cual permite que el usuario acceda a los datos entregados por el Gateway, aquí la información es almacenada para poder ser analizada, así como también se puede obtener la información del estado de la red.

2.1.4 Protocolo de comunicación

Las WNS necesitan un protocolo de comunicación el cual nos permite crear rutas entre los nodos convirtiéndose en una parte indispensable para realizar la interconexión entre los dispositivos, los protocolos se dividen proactivos y reactivos; los proactivos periódicamente envían información de encaminamiento con el fin de que cualquier nodo en cualquier momento pueda comunicarse con otro de su red, los reactivos por otra parte solo crean rutas cuando son necesarios, ambos tipos tienen sus desventajas y ventajas, sin embargo, con el avance de las investigaciones se han desarrollado protocolos híbridos que mantienen ambas características dependiendo el tipo de su uso (Fernandez, Ordines, Martinez, Gonzales, & Alba, 2020). Los autores Bravo y Belduma realizan una clasificación de los protocolos según los requerimientos de ahorro de energía que deben cumplir las WSN las cuales dividen en 5 grupos las cuales abarcan un sinnúmero de posibilidades para el diseño de tablas de enrutamiento (Bravo & Belmuda, 2017), en la Tabla 1 se puede observar los diferentes tipos de protocolos independientes hasta la fecha.

Tabla 1 Protocolos de enrutamiento en WSN

Fuente: Autor

GRUPO	PROTOCOLOS
Centrado en los datos	-Sensor Protocol for Information via negotiation (SPIN) -Por difusión directa -basado en gradientes
Jerárquico	-Low Energi Adaptative Clustering Hierarchy (LEACH) -Power-Efficient Gathering in Sensor Information System (PAGASIS). -Thershold-Sensitive Energy Efficient Protocols (TEEN)
Basado en localización	-Geographic Adaptative Fidelity (GAF) -Geographic and Energy Aware Routing (GEAR) -Geographic Random Forwarding (GeRaF)
Basado en la movilidad	-Scalable Energy-Efficient Asynchronous Dissemination (SEAD) -Movilidad común y enrutamiento Data MULEs
Calidad de servicio	-Sequential Assignment Routing (SAR) -Multi path and Multi SPEED (MMSPEED) -Enrutamiento Consiente de Energia QoS
Otros protocolos	-Flujo de red (Network flow) -Basado en multisalto (Multipath-based) -Basado en heterogeneidad (Heterogeneity-based)

2.1.5 Tecnologías inalámbricas para WSN

Las tecnologías inalámbricas cumplen un rol fundamental puesto que son necesarias para la comunicación vía señales de radiofrecuencia, en la Figura 3 se muestra una clasificación de las tecnologías de acuerdo a la área de aplicación y el alcance de la señal, según los requerimientos antes establecidos en las WSN, las tecnologías que más se adaptan se encuentran en las redes inalámbricas de área personal (WPAN, proveniente del inglés, Wireless Personal Área Network), entre estas se encuentran Bluetooth y ZigBee en la Tabla 2 se muestra una comparativa.

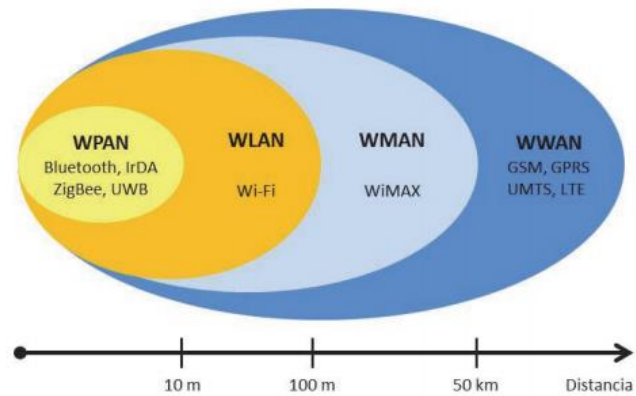


Figura 3 Clasificación de las tecnologías inalámbricas

fuelle: (Salazar , 2020)

Tabla 2 Comparación entre las tecnologías de Bluetooth y Zigbee

Fuelle: Autor

Comparación de Bluetooth y Zigbee		
	Bluetooth	Zigbee
Bandas de Frecuencia	2.4Ghz	2.4Ghz, 868/915Mhz
Tamaño de pila	1Mb	20Mb
Tasa de transferencia	1Mbps	250Kbps(2.4Ghz) 40Kbps(915Mhz) 20Kbps(868Mhz)
Canales	79	16(2.4Ghz) 10(915Mhz) 1(868Mhz)
Tipo de datos	Digital, Audio	Digital (Texto)
Rango de nodos internos	10m-100m	10m-100m
Numero de dispositivos	8	255/65535
Requisitos de alimentación	Media (Días de batería)	Muy baja (años de batería)
Arquitecturas	Estrella	Estrella, Árbol, Malla
Mejores aplicaciones	Computadoras y teléfonos	Control de bajo costo y monitoreo
Consumo de potencia	400mA (Transmitiendo) 20mA (En reposo)	30mA (Transmitiendo) 3mA (En reposo)
Precio	Accesible	Bajo
Seguridad	64bits, 128bits	AES de 128bits y definidas por el usuario

Los estudios en las WSN concentran sus energías en estudiar y generar soluciones para que sus nodos sensores utilicen de manera óptima sus recursos, como, por ejemplo, el consumo de energía, comunicaciones de corto alcance y la conectividad entre los nodos sensores, para ello la tecnología ZigBee se encuentra en constante desarrollo.

2.2 ZIGBEE

Zigbee es una pila de protocolos de alto nivel normalizado en el estándar IEEE 802.15.4 del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos(IEEE), se describe como un protocolo basado en el modelo OSI el cual está diseñado para permitir la interoperabilidad entre diferentes dispositivos de distintos fabricantes, utiliza 4 capas del modelo OSI como se observa en la Figura 4, esto lo hace con el fin de simplificar la arquitectura de la red obteniendo una baja tasa de transmisión con un mínimo consumo de corriente, el estándar IEEE 802.15.4 define los niveles de capa física y capa de acceso al medio en redes inalámbricas, mientras que las capas de red y aplicación las define Zigbee (Zigbee Alliance, 2020), En la Tabla 2 podemos encontrar las especificaciones en base a este estándar.

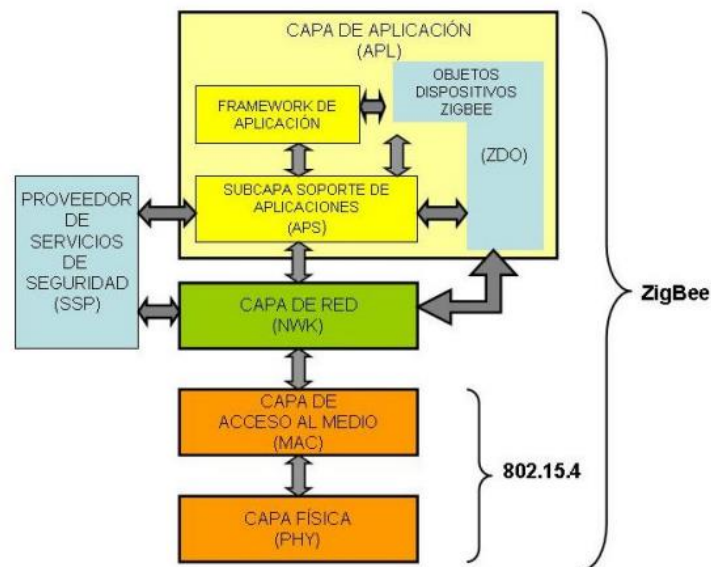


Figura 4 Pila de protocolo ZigBee

fuelle: (Vera, Barbosa , & Pavon, 2017)

- **Capa física**

Esta capa define los aspectos y funciones relacionados a la transmisión, la potencia y la sensibilidad del receptor, además, proporciona el servicio de datos el cual permite la transmisión y recepción de unidades de datos de la capa física a través de un canal de radio físico, y también proporciona el servicio gestión de capa física (Vera, Barbosa , & Pavon, 2017), las características de esta capa son: el control del transceptor de radio, detección de energía, indicador de la calidad de enlace, selección de canal, etc.

- **Capa de acceso al medio**

Esta capa determina la interfaz entre la capa física y la capa de red, esta capa se compone de acuerdo las especificaciones de acuerdo al protocolo IEEE 802.15.4 por lo que la capa que sigue puede ser cualquiera de acuerdo al protocolo usado (Dignami, 2011).

Las comunicaciones Zigbee se realizan en la banda libre de 2.4Ghz, 915Mhz y 868Mhz, su alcance depende de la potencia de transmisión del dispositivo, así como también dependen del tipo de antenas (Whip antena, Rf Conector, Chip antena, etc.) que se utiliza en los módulos.

2.2.1 Topologías

Zigbee soporta diferentes topologías de red en la Figura 5 observamos las topologías y a continuación se presenta una descripción:

- **Estrella**, permite a la red una larga vida útil como consecuencia del bajo consumo de energía.
- **Malla**, permite múltiples caminos para alcanzar un destino concediendo una alta confiabilidad.
- **Árbol**, es una topología Malla-Estrella que contiene todos sus beneficios.

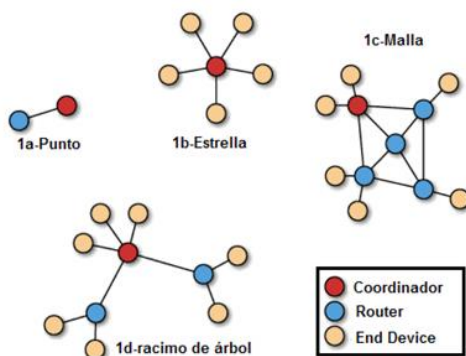


Figura 5 Topología ZigBee

Fuente: (Vera, Barbosa, & Pavon, 2015)

2.2.2 Dispositivos de comunicación ZigBee

Los módulos de comunicación por radio basados en el estándar Zigbee son conocidos comercialmente como XBee, un ejemplo se muestra en la Figura 6 , son elaborados para aplicaciones que requieren un alto tráfico de datos con baja latencia y con una sincronización predecible, en la siguiente figura observamos uno de los módulos (Crespo, 2020).

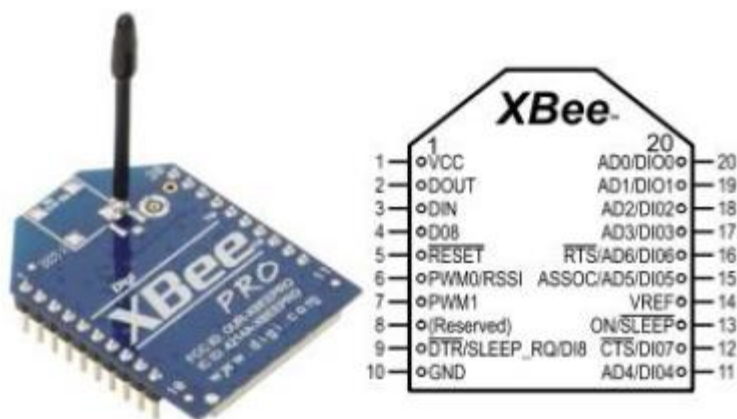


Figura 6 Modulo XBee

fuelle: (Crespo, 2020)

Estos módulos pueden ser utilizados con un reducido número de conexiones (Vcc, Gnd, Tx y Rx) además se debe alimentar específicamente con 3.3Vcd, se puede interconectar con módulo

de procesamiento como tal es el caso del Arduino el cual tiene la salida de voltaje necesario, en la Tabla 3 nos muestra familia de los módulos de radio XBee.

Tabla 3 Módulos de familia XBee

fuelle: Autor

XBee 802.15.4	Modulo inicial para topologías punto a punto o estrella.
XBee-PRO 802.15.4	Alta potencia, rango extenso a su predecesor.
XBee DigiMesh 2.4	Integra un protocolo de red de malla durmiente desarrollado por Digi International
XBee-PRO DigiMesh 2.4	Alta potencia, rango extenso a su predecesor.
XBee ZB	Modulo que integra un protocolo de red mallada de Zigbee Pro
XBee-PRO ZB	Alta potencia, rango extenso a su predecesor.
XBee ZB SMT	XBee de montaje en superficies irregulares
XBee-PRO ZB SMT	Alta potencia, rango extenso a su predecesor.
XBee SE	Integra la seguridad de cluster para consumo de energía inteligente de ZigBee
XBee-PRO SE	Alta potencia, rango extenso a su predecesor.
XBee-PRO 900HP	Modulo a 900Mhz con un rango hasta de 28 millas con alta ganancia en la antena transmisora.
XBee-PRO XSC (S3B)	Modulo a 900Mhz compatible con los radios 9xStream
XBee-PRO 868	Modulo a 868Mhz con 500mW de potencia a bajo rango el cual soporta propiamente topologías punto a punto y estrella
XBee 865/868LP	Modulo a 868Mhz el cual utiliza DigiMesh
XBee ZigBee (S2C)	Modulo actualizado el cual incorpora un chip transceptor mejorando los de sus predecesores, con mejor RAM, Flash y velocidad de reloj consumiendo un reducido consumo de corriente.
XBee-PRO ZigBee (S2C)	Alta potencia, rango extenso a su predecesor.

2.2.3 Elementos de una red con tecnología ZigBee

- **El coordinador**, es la disposición del dispositivo que permite establecer un canal de comunicaciones y que además sirve como el identificador para toda la red, esta configuración permite formar la red conectándose a los routers y terminales, además que permite también realizar las funciones de routers participando en el enrutado de la red.
- **Routers**, configuración del dispositivo que crea y conserva información sobre la red para establecer la mejor ruta para enrutar los datos,

- **Dispositivos finales**, esta configuración únicamente recopila la información del sensor y lo envía al coordinador o a un router para que pueda ser transmitida a través de la red, normalmente su consumo de energía es menor a comparación de los otros elementos de red al no tener que realizar operaciones de enrutamiento.

2.2.4 Modos de operación

Para la comunicación de los módulos no es necesario que estén conectados a un microcontrolador debido a que funcionan de modo independiente simplemente mandando los datos de los sensores conectados al módulo a un nodo central, no obstante, también se pueden conectar a un arduino el cual contiene un microcontrolador integrado con el fin de procesar los datos recibidos del nodo, cuando se conecta el nodo a un dispositivo exterior mediante el puerto serie puede tener los siguientes modos de operación: modo transparente y modo API (Crespo, 2020).

- **Modo transparente:**

Su funcionamiento se basa en recibir información al puerto serie y enviarlo al aire a través de la antena y viceversa, únicamente funciona mediante la comunicación punto a punto otorgando muchas limitaciones si se requiere conectar más dispositivos a la red, sin embargo, son muy útiles cuando hay una comunicación únicamente entre dos elementos.

- **Modo API:**

Interfaz de Aplicación de Programación es el modo que ofrece un interfaz estructurado, establece una comunicación compleja entre módulos mediante un protocolo propio que determina la manera en que los datos son intercambiados. Diseñada específicamente para solventar las limitaciones del modo transparente cuenta con las siguientes ventajas:

- Comunicación con varios destinatarios.
- Configuración de módulos tanto locales como remotos.

- Recepción del estado de transmisión de paquetes.
- Obtención de la fuerza de la señal en los paquetes recibidos.
- Gestión y Diagnostico de la red.

Para configurar el modo API se debe modificar el parámetro AP dentro del dispositivo, por defecto viene con el modo transparente, pero se puede seleccionar entre los dos modos API soportados

- API1, se utiliza únicamente cuando se basa en el parámetro delimitador de inicio y la longitud de los bytes para diferenciar una trama de otra.
- API2, se utiliza mediante la introducción de un carácter denominado escape adjuntándose en una trama con el objetivo de maximizar la fiabilidad de comunicación en entornos ruidosos.

En el modo API los datos son enviados en formas de trama permitiendo obtener información del dato enviado, en la Figura 7 observamos la trama API

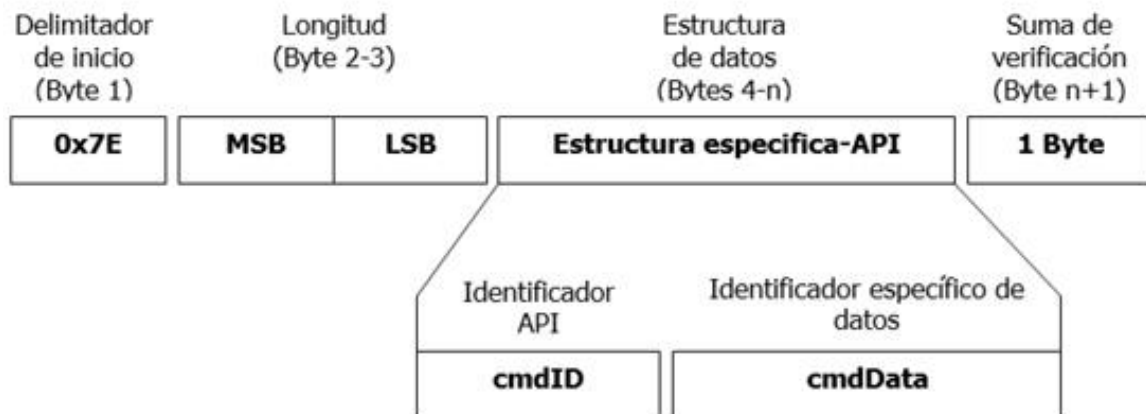


Figura 7 Trama Xbee en modo API

Fuente: (Vera, Barbosa, & Pavon, 2015)

En la Tabla 4 podemos apreciar cada uno de los bytes de la trama API

Tabla 4 Trama API

Fuente: Autor

Trama API para el envío de comandos AT remotos		
Byte	Ejemplo	Descripción
0	0x7E	Byte de inicio, indica el comienzo de los paquetes de datos
1	0x00	Longitud, numero de bytes (checksumByte #1-2)
2	0x10	
3	0x17	Tipo de mensaje, 0x17 significa que es un comando AT
4	0x01	Identificador de trama
5	0x00	Dirección de destino de 64 bits
6	0x13	MSB es el byte 5 y LSB es en byte 12
7	0xA2	
8	0x00	0x0000000000000000=Coordinador
9	0x40	0x000000000000FFFF=Broadcast
10	0x8B	
11	0x78	
12	0x4E	
13	0xFF	Dirección de la red de destino
14	0xFE	Configurado para enviar un broadcast
15	0x02	Opción de comando remoto
16	0x44(D)	Nombre del comando AT (Dos caracteres ASCII)
17	0x32(2)	
18	0x05	Parámetro de comando
19	0x025	Checksum

2.2.5 Comandos AT

Los comandos AT son un conjunto de instrucciones codificadas que se utilizan como medio de comunicación entre el hombre y la maquina entre los principales comandos que se utilizan se muestran en la Tabla 5 y son los siguientes (Sparkfun Electronics, 2020):

Tabla 5 Comandos AT

Fuente: Autor

Comandos AT	Descripción
ATCH	Indica en canal seleccionado por el coordinador para realizar la comunicación
ATDB	Indica la velocidad en baudios establecida para la comunicación
ATSH	Muestra el serial alto del dispositivo
ATND	Muestra quien está conectado a la red del coordinador
ATCN	Instrucción para salir del modo de comandos AT

2.3 LOCALIZACIÓN DE NODOS EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS

Las WSN se encuentran en constante desarrollo debido a los avances en las comunicaciones inalámbricas y en la electrónica en general, esto ha permitido que el campo de aplicación de las WSN sea numeroso, una de las aplicaciones más importantes es la localización, es decir, cada dispositivo de la red debe conocer su ubicación exacta en el entorno en cualquier instante de tiempo, se han realizado muchos estudios sobre esta aplicación, la autora García en su estudio “Técnicas de localización en Redes Inalámbricas de sensores” nos detalla diversas técnicas de localización, así como también estudia como la elección de la técnica de localización dependerá en gran medida a la aplicación específica a la que se encuentre destinada la WSN (Garcia, 2008).

2.3.1 Clasificación de los algoritmos de localización

Los autores (Nazir , Arshad, Shahid, & Raza, 2012), realizaron una clasificación de los algoritmos de localización en redes de sensores basándose en el estado de movilidad de nodos desconocidos y puntos de referencia, además de presentar un análisis de los algoritmos más representativos y compararlos con los existentes, dando como resultado la Tabla 5 con determinados parámetros de desempeño.

Tabla 6 Estudio comparativo de los Algoritmos de localización

Fuente: Autor

Algoritmos de localización	Modo de operación	Precisión	Costo hardware	Costo computacional	Costo comunicación
Basados en rango	Técnicas basadas en distancia <ul style="list-style-type: none"> • RSSI • TDoA 	Medio Alto	Bajo Alto	Bajo Bajo	- -
	Técnicas basadas en ángulo <ul style="list-style-type: none"> • AOA 	Alto	Alto	Bajo	-
Libre de rango	Técnicas basadas en saltos <ul style="list-style-type: none"> • distancia Per Hop 	Medio	Bajo	Medio	
	Técnicas basadas en nodos vecinos <ul style="list-style-type: none"> • Vecino único • Multi-vecinos 	Bajo Bajo	Bajo Bajo	Bajo Bajo	
Centralizados	-	Alto	-	Alto	Alto
Distribuidos	-	Medio	-	Medio	Bajo
Basados en nodos anclas	-	Alto	Muy alto	-	-
Libres de nodos ancla	-	Medio	Muy bajo	-	-

Con tal precedente las técnicas basadas en rango tienen una precisión aceptable y costos relativamente bajos, se realizaron estudios como lo explican los autores (Coluccia & Ricciato, 2014) en su investigación los cuales proponen una técnica diferente a lo habitual con el fin de mejorar la precisión sin necesidad de aumentar significativamente los costos computacionales y de hardware. Sin embargo (MacLean & Datta, 2013) plantean un nuevo enfoque que se basa en la reducción del error posicional de los algoritmos de posicionamiento basados en conectividad a través de la cooperación entre vecinos proponiendo un nuevo algoritmo de posicionamiento denominado Orbit, el algoritmo se ejecutó en una red de sensores y se comparó

con resultados de simulaciones por computadora obteniendo resultados realistas. Al final del experimento se comprobó que eleva la precisión de localización de nodos, pero la integración del algoritmo aumenta los costos computacionales y de comunicación dentro de la red.

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se seleccionó las técnicas basadas en rango RSSI y AOA debido a que su implementación es muy sencilla, con parámetros de desempeño (exactitud, precisión, costo de hardware, costo computacional) considerablemente buenos, además de no necesitar de ningún hardware adicional que pueda aumentar el costo de la red, para su funcionamiento base se requiere únicamente un mínimo de 3 nodos con posiciones conocidas (nodos ancla) para localizar a un nodo con posición desconocida (nodo móvil), con tal precedente, se seleccionaron dichas técnicas para combinarlas y lograr una mejor exactitud en comparación a los algoritmos trabajando individualmente.

Entre los algoritmos de localización basados en rango o distancia se encuentran las siguientes:

2.3.1.1 RSSI (Indicador de intensidad de señal recibida)

Se define como la escala de referencia para medir la potencia de las señales recibidas por un dispositivo en redes inalámbricas, entonces si se conoce la RSSI se podría estimar la distancia estimada en la que se encuentra el transmisor, suelen ser muy precisos en distancias no superiores a los 20m en el espacio libre con errores de medición permisibles del 10% según lo establecido por Eve María García (Garcia, 2008).

- **Métodos para obtener valor RSSI de un nodo de la red.**

Existen dos métodos para obtener el valor RSSI de un XBEE de la serie S2C

- Los módulos XBEE tienen un pin RSSI que emite una señal PWM que representa este valor, en Arduino se emplea una función llamada *pulseIn* que permite transformar la señal PWM medida del módulo en un número entero el cual se pueda utilizar. En este caso, este método no fue de ayuda debido a que los valores obtenidos eran muy variantes, por lo tanto, no fueron de utilidad para el proyecto.

- Los valores RSSI se pueden leer en el XBee a través del registro DB, este proporciona el RSSI máximo durante la recepción del paquete más reciente. Se emplea comandos AT para obtener el valor DB mediante el uso de las tramas API (Vera, Barbosa, & Pavon, 2015).
- **Obtener el valor de la distancia entre dispositivos**

Para obtener la distancia entre dispositivos se emplea el valor RSSI obtenido, para ello se debe encontrar una relación entre la distancia y el valor RSSI, según Li y otros, se obtiene un modelo de estimador de distancia RSSI en base a los diferentes modelos de pérdidas (Li, y otros, 2018). Para determinar la potencia de la señal recibida se emplea la ecuación 1.

$$(Ec.1) \quad RSSI[dBm] = -10n \log_{10}(d) + A[dBm]$$

Donde:

n : es la constante de pérdida en el espacio.

d : la distancia entre los nodos.

A : el valor RSSI a una distancia de 1m.

Para determinar la distancia despejamos d de la ecuación 2.

$$(Ec.2) \quad d = 10^{-\frac{RSSI-A}{10n}}$$

Para determinar el valor de n se emplea la ecuación de la pérdida de propagación de la señal recibida por un nodo a una distancia d , en la ecuación 3 se muestra dicha fórmula.

$$(Ec.3) \quad P_L(d_i)[dB] = P_L(d_0)[dB] + 10n \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_0} \right)$$

De la cual despejando n tenemos la ecuación 4:

$$(Ec.4) \quad n = \frac{P_L(d_i) - P_L(d_0)}{10 \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_0} \right)}$$

Esta ecuación nos permite obtener el valor de n mediante mediciones de potencias a diferentes distancias

- **Obtener la ubicación mediante la técnica RSSI**

Una vez que se obtiene el valor distancia del nodo transmisor con respecto al nodo receptor se debe aplicar un algoritmo que permita estimar la posición del nodo desconocido, según García existen numerosas técnicas de estimación de posición, pero las principales son trilateración, triangulación, multilateración, análisis de la escena y proximidad (García, 2008). Sin embargo, Haro únicamente definió a las técnicas de trilateración y triangulación como técnicas de estimación de posición definidos para las WSN (Haro, 2020), para la investigación se utilizó la técnica de trilateración por su baja complejidad de procesamiento, y debido a que la triangulación necesita de un arreglo de antenas directivas para obtener el valor de los ángulos.

➤ **Trilateración**

Este método nos permite conocer la ubicación del nodo móvil midiendo las distancias desde el mismo hasta varias posiciones referenciales (nodos ancla), para ello se necesita las distancias de al menos 3 nodos anclas puestos en diferentes líneas, en la Figura 8 se muestra la geometría circular generados por los nodos ancla para determinar la posición del nodo móvil.

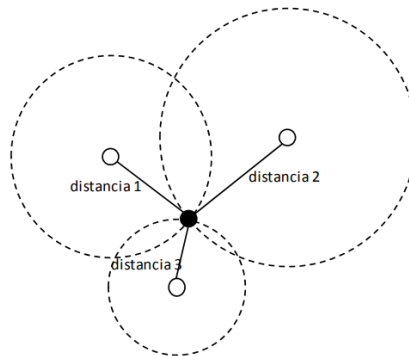


Figura 8 Trilateración

fuentes: (García, 2008)

Dado el siguiente escenario de la que se muestra en la Figura 9.

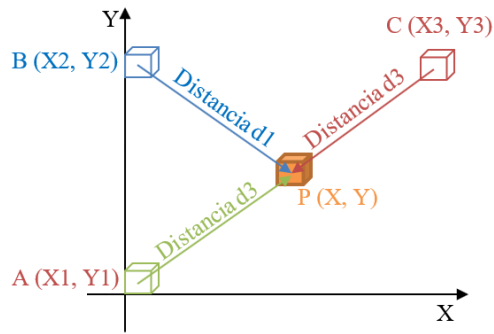


Figura 9 Escenario para aplicar método de trilateración

fuelle: Autor

Dados los puntos conocidos o nodos anclas en las posiciones A (X1, Y1), B (X2, Y2) y C (X3, Y3) aplicando técnica de estimación de distancia entre puntos de la ecuación 5.

$$(Ec.5) \quad d_n^2 = (x - x_{n+1})^2 + (y - y_{n+1})^2$$

Despejando la formula se obtienen los puntos P (X, Y) con ecuación 6 y ecuación 7.

$$(Ec.6) \quad y = \frac{d_n^2 - d_{n+1}^2 + y_{n+1}^2}{2y_{n+1}}$$

$$(Ec.7) \quad x = \sqrt{d_n^2 - y^2}$$

2.3.1.2 TDOA (diferencia en el tiempo de llegada)

Este sistema utiliza la medición de la diferencia de tiempos de dos señales: una de radiofrecuencia y otra acústica (comúnmente ultrasonido) las cuales poseen diferentes velocidades de propagación, las cuales son enviadas desde un transmisor hasta un receptor como se puede observar en la Figura 10,

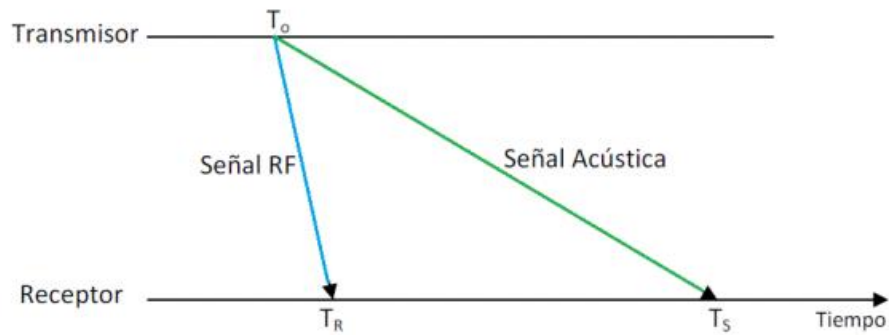


Figura 10 Medida de distancia TDOA

Fuente: (Rugeles & Leon, 2013)

Según Kim and Chong el método convencional para la localización de nodo se basa en la ecuación 8 (Kim & Chong, 2017).

$$(Ec.8) \quad d_n = cT_n = \|x - b_n\| = \sqrt{(x_s - x_n)^2 + (y_{s,n} - y_n)^2}$$

Donde:

b_n : es la estación base que se encuentra en los puntos $[x_n, y_n]$.

X: son las coordenadas de la fuente en los puntos $[x_s, y_s]$.

d_n : es la distancia estimada.

Entre los algoritmos de localización basados ángulos se encuentran las siguientes técnicas de medición:

2.3.1.3 AOA (Angulo de llegada)

La medida AOA se define como el ángulo que se forma entre la dirección de propagación de una onda incidente y una dirección de referencia (orientación) Figura 11, para obtener esta medida se utiliza antenas direccionales o un array de antenas las cuales general una señal incidente, sin embargo, también se puede utilizar las medidas RSSI de al menos dos antenas direccionales en un mismo nodo para obtener este parámetro.

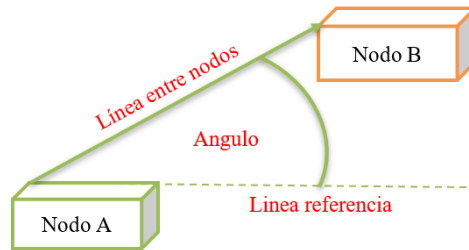


Figura 11 Ángulo entre nodos

fuelle: Autor

- **Obtener la ubicación mediante la técnica de AOA**

Para este método se necesita dos estaciones fijas las cuales nos ayudaran a determinar los ángulos de arribo de la señal. Debido a que esta técnica emplea antenas direccionales, no se podrá aplicar de manera directa, sino que se deberá tomar en cuenta ciertas consideraciones.

Si definimos el ambiente donde se va a implementar este sistema y como se van a colocar estos dispositivos se podrá aplicar este método de localización sin ningún inconveniente (Villalba, 2015).

Se define un escenario donde se han posicionado 2 nodos ancla y un nodo móvil, el valor de la distancia a y distancia b, son obtenidas mediante la técnica de RSSI, en la Figura 12 se muestra la posición de los nodos. Mediante estos datos se tiene los requerimientos necesarios para aplicar el método de ubicación AOA, finalmente se podrá determinar la ubicación del dispositivo móvil.

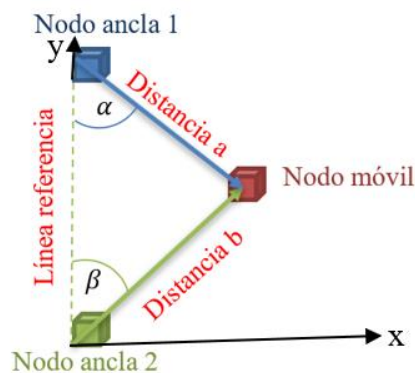


Figura 12 Técnica de localización mediante AOA

Fuelle: Autor

Para calcular el ángulo A, al tener los lados del triángulo se aplica la ley de los cosenos en la ecuación 9.

$$(Ec.9) \quad a^2 = b^2 + c^2 - 2bc * \text{Cos}(A)$$

Despejando el ángulo A tenemos en la ecuación 10:

$$(Ec.10) \quad A = \text{Cos}^{-1}\left(-\frac{a^2-b^2-c^2}{2bc}\right)$$

Una vez obtenida la dirección y la distancia al dispositivo móvil en la posición [x,y], se puede encontrar las coordenadas aplicando las siguientes formulas, ecuación 11 y ecuación 12:

$$(Ec.11) \quad x = b * \text{sen}(A)$$

$$(Ec.12) \quad y = b * \text{cos}(A)$$

2.3.1.4 Técnicas basadas en el almacenamiento de datos de distancia.

Estas técnicas utilizan datos de mediciones como RSSI almacenados con anticipación, los cuales permiten detectar un cambio de estado de los nodos móviles, esto se aplica de forma paralela a las técnicas convencionales (Rugeles & Leon, 2013), entre las más conocidas tenemos:

- Huella Digital (Fingerprinting).
- APIT (Punto aproximado en triangulación).

2.3.2 Parámetros de desempeño de los algoritmos de localización

Los parámetros de desempeño corresponden a los estándares o métricas que nos permiten tomar decisiones objetivas en base a un resultado esperado, en cuanto en algoritmos de localización nos permite evaluar el resultado de los algoritmos en torno a los resultados esperados, los principales parámetros de desempeño son:

- **Exactitud**

Parámetro definido como el error esperado en los valores de localización, el cual se obtiene a través de la ecuación del error cuadrático medio (MSE) mismo que representa la diferencia entre el valor real y estimado como se muestra en la Ecuación 13 (Lopez, Ruiz, Berumen, Gonzales , & Espinoza, 2016), despejando para sistemas de localización se encuentra la Ecuación 13.1

$$(Ec.13) \quad MSE = \sum(p_i - r_i)^2 = \sum e_i^2 / N$$

Donde:

P: valor proyectado o estimado

R: valor real

N: número de muestras

$$(Ec.13.1) \quad MSE = \frac{\sqrt{((x - x_k)^2 + (y - y_k)^2)}}{N}$$

Donde:

(x, y) : Posición real del nodo.

(x_k, y_k) : Posición estimada del nodo.

- **Precisión**

Este parámetro considera la distribución de error de las distancias, por definición la precisión se define como la capacidad de un instrumento de medición en otorgar un resultado similar mediante la toma de un número de muestras diferentes de medición en igualdad de condiciones, en algoritmos de localización 2 técnicas son comparadas la técnica con menor error, es la preferible.

- **Costo de hardware**

Mediante el costo de hardware se toma en cuenta el precio en el mercado del costo total de todos los materiales que se utilizaron para el funcionamiento del algoritmo de localización y se tomó un valor referencia con otros sistemas de localización tomando en cuenta los valores de exactitud y precisión de la técnica.

- **Costo computacional**

El costo computacional se refiere a la cantidad de recursos (número de operaciones matemáticas realizadas durante la ejecución de un programa) utilizados por algún algoritmo en particular con el fin de buscar una solución a un problema determinado.

2.3.3 Trabajos relacionados

Las tecnologías de localización dependen de la precisión de la medida de las métricas de localización y de las condiciones de propagación en los diferentes tipos de ambientes, estos parámetros provocan que los mecanismos de localización no sean infalibles; debido a esto si queremos obtener una buena precisión, los errores encontrados en el proceso de medida tienen que ser mitigados por algoritmos de posicionamiento y técnicas de reconocimiento de patrones los cuales permitan mejorar el posicionamiento cuando las métricas de localización no sean fiables (Nuñez, 2009).

En la investigación presentada por los autores (Copa, Carducci, & Rey, 2015), denominada “Técnicas de Refinamiento para Localización en Redes de Sensores Inalámbricas”, el cual propone utilizar el método RSS utilizando las técnicas de escalamiento multidimensional (MDS) y cuadrados lineales (LS), además propone mecanismos para alcanzar la máxima precisión con un mínimo de nodos. El enfoque del trabajo se centró en dos variantes de refinamiento: La primera, necesita conocer las distancias entre todos los dispositivos, y luego de pocas iteraciones se alcanza el mínimo error usando las estimaciones entregadas por MDS y LS como condición inicial. En la segunda variante, sólo se dispone de las mediciones de las anclas, compensando la

falta de información con una mejora en la condición inicial y la reutilización de la semilla para calcular las distancias faltantes, alcanzándose así un desempeño similar.

Posteriormente el autor (Lopez,2015), realiza una evaluación de desempeño de algoritmos de localización en escenarios reales, la investigación se centra en simular una red de sensores inalámbricos los cuales están compuesto por 4 nodos anclas y 1 nodo móvil que es el encargado de recibir las señales de los 4 nodos anclas las mediciones fueron tomadas en un grid de 11m x 11m como se muestra en la siguiente figura:

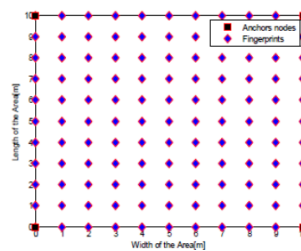


Figura 13 Grid de Mediciones

fuelle: (López, 2015)

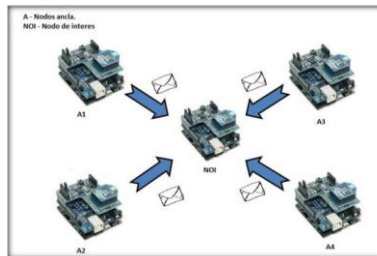


Figura 14 Nodos ancla y móvil

fuelle: (López, 2015)

Los nodos fueron colocados en los exteriores del campus del Instituto Tecnológico de Sonora en la ciudad de Obregón, México, se observó que la potencia de la señal recibida va decayendo en la relación a la distancia, a mayores distancias, menor es la 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. 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 puede representar en una gran variación entre los resultados obtenidos por los algoritmos.

Los autores (Lopez, Ruiz, Berumen, Gonzales , & Espinoza, 2016) en su investigación “Comparación de Desempeño de Algoritmos de Localización en Escenarios Exteriores Reales” utilizaron redes de sensores y actuadores (WSAN) basados en ZigBee, analizaron la pertinencia de utilizar la RSS como estimador de distancia en algoritmos de localización, mediante la caracterización del patrón de radiación de módulos XBee S1. Como resultado se observa que el comportamiento isotrópico de la antena de los módulos XBee Series 1 no es exactamente como lo muestra el fabricante esto afecta a las mediciones RSS, no obstante, en escenarios reales, las mediciones también se ven afectadas por las variaciones del canal las afectan directamente la transmisión de datos, en conclusión, el algoritmo de localización con más exactitud y precisión en condiciones reales es el Centroide Ponderado con métricas RSS.

Actualmente se han diseñado estimadores de posición mediante la utilización de diferentes algoritmos de localización empleando técnicas de medición RSS como es el caso de la investigación de los autores (Tomic, Beko, Dinis, & Bernardo, 2018) siendo la única limitación el espacio bidimensional en el que trabajan, sin embargo, los resultados fueron notorios dando un mayor grado de desempeño. No obstante, los autores (Nguyen, Shin, & Tuan, 2019) lograron eliminar la limitación del espacio bidimensional y reemplazándola por un espacio tridimensional dando muy buenos resultados, en la siguiente figura se puede observar el área donde fue aplicado el estimador.

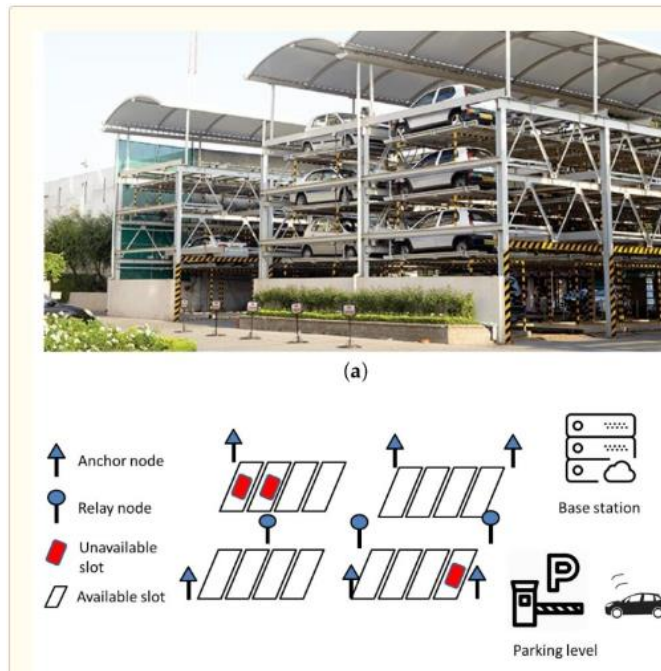


Figura 15 Sistema de parqueo inteligente para vehículos

fuelle: (Nguyen, Shin, & Tuan, 2019)

CAPITULO III

3 METODOLOGÍA.

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación presentada corresponde al tipo aplicada debido a que se realiza mediante la utilización de conocimientos previos con el fin de aplicarlos en beneficio de la sociedad. Para la investigación se necesita la implementación de una red de sensores inalámbricos el cual cada uno de sus nodos tengan la capacidad de proveer información necesaria para el funcionamiento de los algoritmos de localización.

3.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Para el presente proyecto se aplicará el método experimental debido a que se necesita recoger datos cuantitativos (incluyendo la medición sistemática) desde la red de sensores, para su posterior aplicación en algoritmos de localización en WSN.

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1 POBLACIÓN

La población del estudio se encuentra en el diseño e implementación de redes de sensores inalámbricos, existe un sinnúmero de estas las cuales difieren según las aplicaciones y otros factores externos como la ubicación, la topología, etc, los autores Inga y Pozo nos muestran una clasificación detallada de las mismas (Inga & Pozo, 2019).

3.3.2 MUESTRA

La muestra del estudio corresponde la localización de un nodo móvil dentro de un ambiente definido en una red de sensores inalámbricos, se seleccionó un ambiente para interiores sin obstáculos en el cual se pueda utilizar de manera óptima las técnicas basadas en rango (RSSI y

AOA) sin la necesidad de adquirir hardware y software adicional como es necesario para otros sistemas de localización, además, la selección se debió a factores como las características de los dispositivos y a otros factores externos como la emergencia sanitaria presentada este año, la WSN se implementa con un mínimo de 4 nodos (1 nodo con posición desconocida y 3 con posiciones conocidas) y una estación central de procesamiento, las cuales sirven como base para la aplicación de los algoritmos de localización RSSI y AOA.

3.4 FUENTES DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El presente trabajo realizó la recopilación de información científica y experimental que existe sobre la utilización de algoritmos de localización en redes de sensores inalámbricos, además se realizó una revisión sistemática de libros, papers, tesis y artículos en bibliotecas online como es Science Direct, Research Gate, Scopus y IEEE con una restricción de publicación no mayor a 10 años. Además, se empleó la técnica de observación el cual consiste en visualizar y capturar en forma detallada cualquier situación que se produzca, en función a los objetivos de la investigación.

3.5 INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los instrumentos para el desarrollo de este proyecto son:

- Antena Whip para XBee.
- Arduino genuino Uno R3.
- Fuentes de alimentación de 5 voltios.
- XBee ZB S2C TH integrado con antena Whip.
- USB Explorer Regulator para Xbee.
- X-CTU Studio Suite software de uso libre.
- Software Matlab versión 2020 de licencia provisional.
- Software Blender versión 2.8 de licencia libre

Para la recolección de datos principalmente se utilizó el módulo XBee ZB S2C TH el cual está integrado con una antena omnidireccional del tipo Whip, en el manual de usuario publicado por Digi (Digi, 2020) nos indica cómo obtener el valor RSSI mediante el comando DB siendo su máximo retorno de valor pedido de 0x50 el cual representa -80dBm de potencia, cabe recalcar que Digi está certificada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) mediante el estándar ZigBee, en la investigación presentada por parte de Park Lee & An nos muestra que para obtener este valor, la RSSI debe ser mediada desde varias posiciones donde han sido previamente posicionados los módulos Xbee (Park, Lee, & An, 2010).

3.6 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Variable Dependiente

Posición calculada por el sistema de un nodo en una red de sensores inalámbricos dentro de un entorno definido.

Variable Independiente

Posición real de un nodo en una red de sensores inalámbricos dentro de un entorno definido.

Tabla 7 Operacionalización de las variables

Fuente: Autor

VARIABLES	CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Posición calculada por el sistema de un nodo en una red de sensores inalámbricos dentro de un entorno definido.	Ubicación de un objeto en un espacio delimitado, determinada por el sistema, mismo que necesitan coordenadas que otorguen puntos de referencia para que esta sea trazable y comunicable.	-Potencia de señal dBm -Ángulo de llegada -frecuencia de trabajo a 2.4 Ghz -canal de comunicación -Sistema de coordenadas	-PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator. Antena XBee. -Microprocesador ATMEGA 328P.Arduino
Posición real de un nodo en una red de sensores inalámbricos dentro de un entorno definido.	La posición de un objeto permite describir la localización de un objeto en un determinado punto del espacio a través de un sistema de coordenadas	- Sistema de unidades - Sistema de coordenadas - Espacio de localización	-Cinta métrica o flexómetro. -Regla graduada. -Vernier. -Micrómetro. -Reloj comparador. -Interferómetro. -Odómetro

3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

3.7.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Para realizar una red de sensores inalámbricas mediante la tecnología ZigBee se debe considerar los requerimientos antes mencionados en el punto 2.3.1.

3.7.2 DISEÑO DEL SISTEMA

Lo que se busca desarrollar es un sistema de posicionamiento en ambientes definidos empleando la tecnología ZigBee combinando las técnicas localización de RSSI y AOA, para lo cual se seguirá el siguiente diagrama de flujo presentado en la Figura 16.

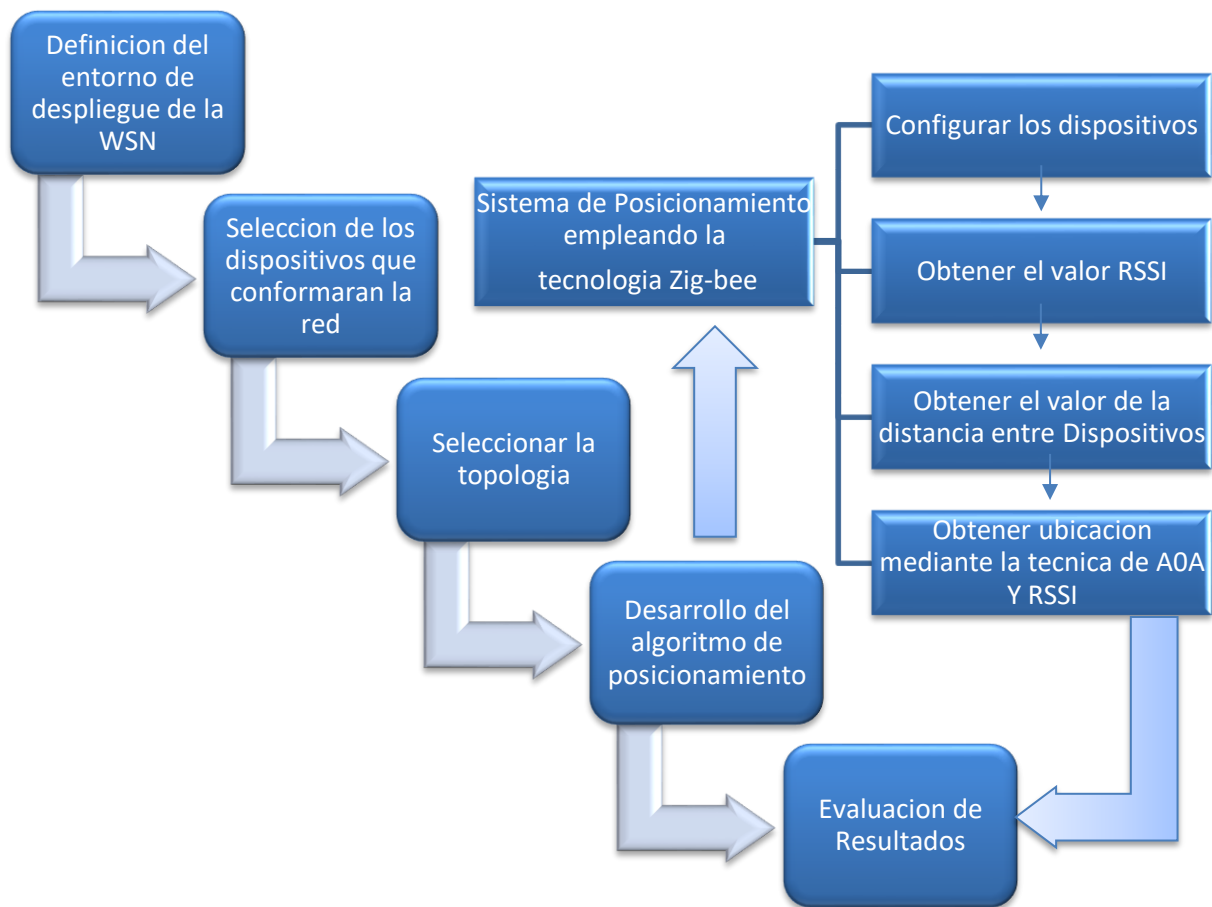


Figura 16 Diagrama de flujo del proyecto

fuelle: Autor

3.7.2.1 Definición del entorno de despliegue de la red WSN

Los algoritmos de localización se ven afectados por un sin número de factores, para ello cada algoritmos de localización o posicionamiento debe ser seleccionada de manera específica a la aplicación que se destine la red de sensores inalámbricos, para nuestra investigación se definió un entorno cerrado (una habitación) el cual tiene una medida de 3 metros de largo por 2.6 metros de ancho con una altura de 2.5 metros el cual se ha instalado tres nodos anclas (A, B, C) en cada esquina de la habitación a una altura de 1.5 metros y un nodo móvil (D) en cual se moverá por el área con el fin de ser localizada por el algoritmo, dicho las condiciones se seleccionó la técnica de trilateración debido a que en espacios cerrados y sin interferencia esta técnica provee un nivel de precisión aceptable con una pequeña proporción de nodos anclas, en la Figura 17 podemos observar el campo con el despliegue de las redes de sensores.

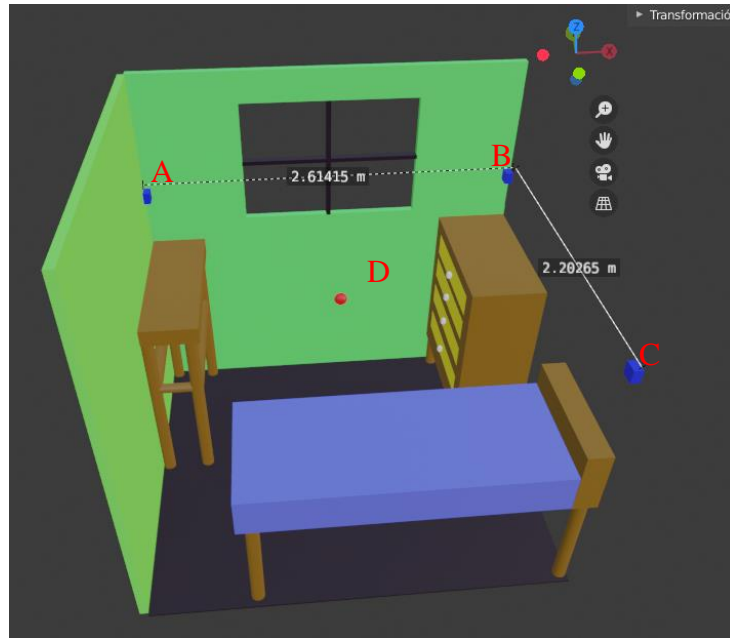


Figura 17 Espacio definido para la WSN

fuelle: Autor

3.7.2.2 Selección de los dispositivos que conformaran la WSN

El sistema está compuesto en su mayoría por equipos de la tecnología Zigbee, su bajo costo y a su simplicidad de uso hacen que esta tecnología destaque entre otras tecnologías de

comunicación inalámbrica, para el diseño de la red se tomaron en cuenta los diferentes modelos de los transmisores, en la siguiente tabla se detallan sus características.

Tabla 8 consideración de los módulos XBee serie 2

fuelle: (didacticaselectronicas, 2020)

Considerations	XBee ZB (S2)	XBee ZB (S2C) TH	Comments
Indoor/Urban Range	up to 133 ft. (40 m)	Up to 200 ft. (60 m)	Improved
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 400 ft. (120 m)	Up to 4000 ft. (1200 m)	Improved
Transmit Power Output	2mW (+3dBm), Boost mode 1.25mW (+1dBm), Normal mode	6.3mW (+8dBm), Boost mode 3.1mW (+5dBm), Normal mode Channel 26 max power is +3dBm	Improved Note: An International variant of the XBee ZB (S2C) TH is not available; the +8dBm non-PRO variant should be used.
Receiver Sensitivity	-96 dBm, Boost mode -95 dBm, Normal mode	-102 dBm, Boost mode -100 dBm, Normal mode	Improved
Operating Current (Transmit)	40mA (@ 3.3 V, Boost mode) 35mA (@ 3.3 V, Normal mode)	45mA (+8 dBm, Boost mode) 33mA (+5 dBm, Normal mode)	Slightly higher on boost mode to due to increased output power. Improved on normal mode.
Operating Current (Receive)	40mA (@ 3.3 V, Boost mode) 38mA (@ 3.3 V, Normal mode)	31mA (Boost mode) 28mA (Normal mode)	Improved
SPI	Not Supported	5 Mbps maximum (burst)	Added SPI interface
FCC ID	OUR-XBEE2	MCQ-S2CTH	Customer will need to change the label on their end product to show the appropriate FCC ID for the S2C.
Industry Canada (IC) ID	4214A-XBEE2	1846A-S2CTH	Customer will need to change the label on their end product to show the appropriate IC ID for the S2C.

- **ZIGBEE-PRO SERIE S2C**



Figura 18 Módulo de comunicación ZigBee-Pro serie S2C. con antena

fuelle: (didacticaselectronicas, 2020)

En la figura 18 nos muestra el Módulo de comunicación ZigBee-Pro ZB con antena, compatible pin a pin con las versiones anteriores. Con mejoras en los rangos de comunicación, poder de transmisión y sensibilidad de recepción. Utiliza todos los firmwares de sus versiones anteriores en uno solo (coordinador AT y API, Router AT y API, dispositivo final API y AT), en la Tabla 9 se muestran las principales características de estos módulos.

Tabla 9 Características del módulo XBEE

Fuente: Autor

CARACTERISTICAS	
Microprocesador	Ember EM357
Antena	Tipo Cable(whip)
Frecuencia	2.4Ghz
Rango en interiores	Máximo 60metros
Rango en exteriores	Máximo 1200metros con línea de vista
Sensibilidad	-102dBm
Corriente de recepción	31mA
Corriente de transmisión	45mA
Voltaje de alimentación	2.1a3.6V

- **XBEE EXPLORER USB**

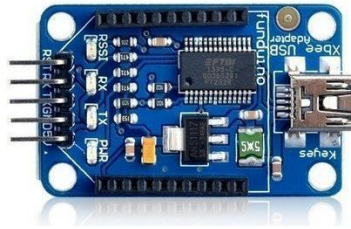


Figura 19 XBEE EXPLORER USB

fuentes: (majju, 2020)

En la Figura 19 nos muestra el adaptador USB Xbee que se utiliza para modificar los parámetros de configuración del módulo XBee facilita el uso del dispositivo como transmisión inalámbrica de datos. Se puede conectar fácilmente a una PC mediante un cable mini USB. Además, tiene el software de soporte de configuración XBee X-CTU. También se puede usar como un adaptador USB-TTL.

- **ARDUINO GENUINO UNO R3**



Figura 20 Arduino Uno

fuentes: (Arduino, 2020)

La tarjeta de desarrollo Arduino UNO R3 es una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega328 cuenta con 14 pines in/out digitales (de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM) las principales características se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10 Características del arduino Genuino Uno R3

Fuente: Autor

CARACTERISTICAS	
Microprocesador	ATMEGA 328p
Tensión de operación	5V
Tensión de entrada	7-12V
Pines de entrada y salida digital	14 (6 de PWM)
Entradas analógicas	6
Corriente máxima por cada pin de entrada y salida	40mA
Memoria Flash	32KB
SRAM	2KB
Frecuencia de reloj	16Mhz

3.7.2.3 Topología de red a emplear

Debido a los requerimientos del proyecto, el tipo de topología que más se adecua es la topología tipo estrella. En este tipo de red el dispositivo central es el coordinador y los demás dispositivos pueden ser dispositivos finales o routers.

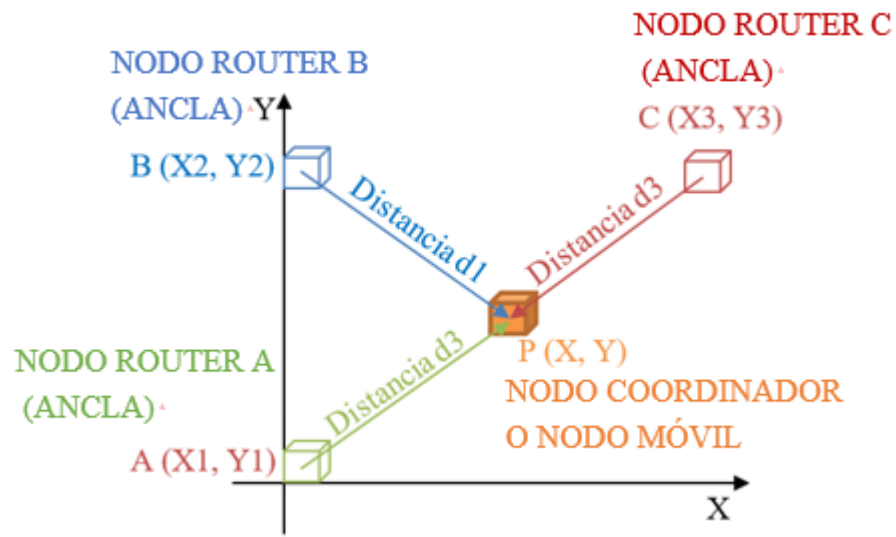


Figura 21 Topología estrella en la red WSN

fuelle: Autor

3.7.2.4 Configuración de los dispositivos

Para la configuración de los dispositivos se emplea una Pc donde tenga instalado el software XCTU, que sirve para configurar los dispositivos mediante una interfaz gráfica.

a) Conectar dispositivos Xbee a la PC

Se conecta el Xbee a la Pc mediante un adaptador Xbee explore USB tal y como se muestra en la Figura 22.

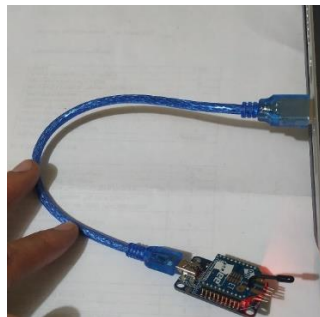


Figura 22 Conexión del Módulo Xbee al ordenador

fuelle: Autor

Luego se procede a abrir el programa XCTU y hacer clic en *discover devices* como se muestra en la Figura 23.

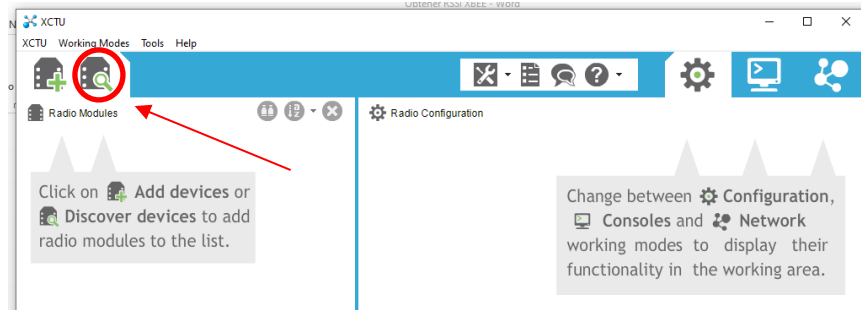


Figura 23 Búsqueda de Módulos Conectados

fuelle: Autor

Luego procedemos a dar Clic en *parámetros* y después en *Next* como se muestra en la Figura 24.

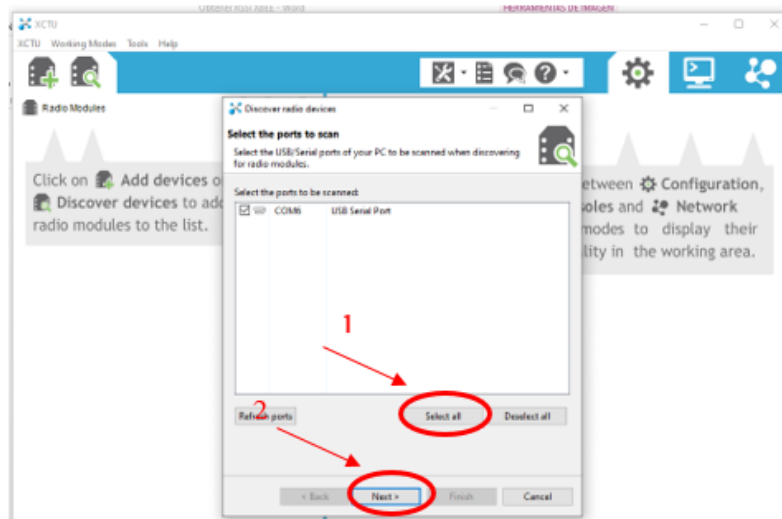


Figura 24 Selección de todos los módulos disponibles

fuelle: Autor

Procedemos a configurar el puerto USB y dar clic en Finish, seleccionando los parámetros de velocidad de conexión a 9600baudios a 8 bits como se muestra en la Figura 25.

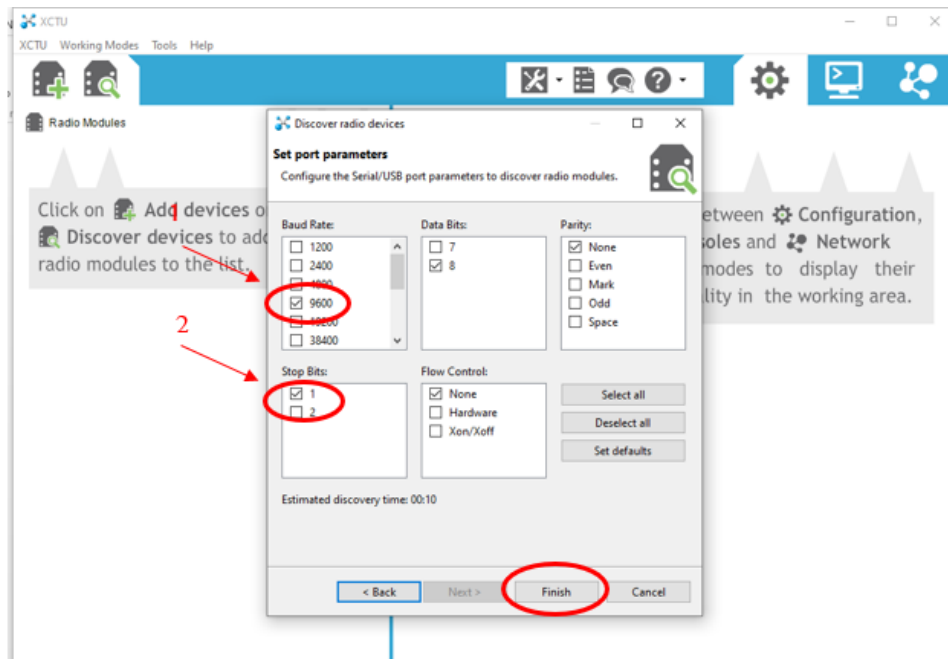


Figura 25 Configuración de la velocidad de conexión entre la computadora y el Xbee

Fuente: Autor

Procedemos a dar clic en *parámetros* para seleccionar todos los dispositivos y después clic en *Add selected devices* como se muestra en la Figura 26

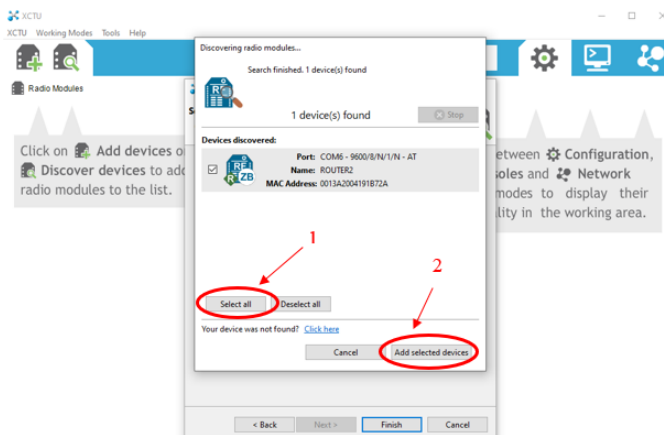


Figura 26 Selección de Módulos conectados

fuentes: Autor

Finalmente obtendremos la ventana de todos los dispositivos agregados como se muestra en la Figura 27.

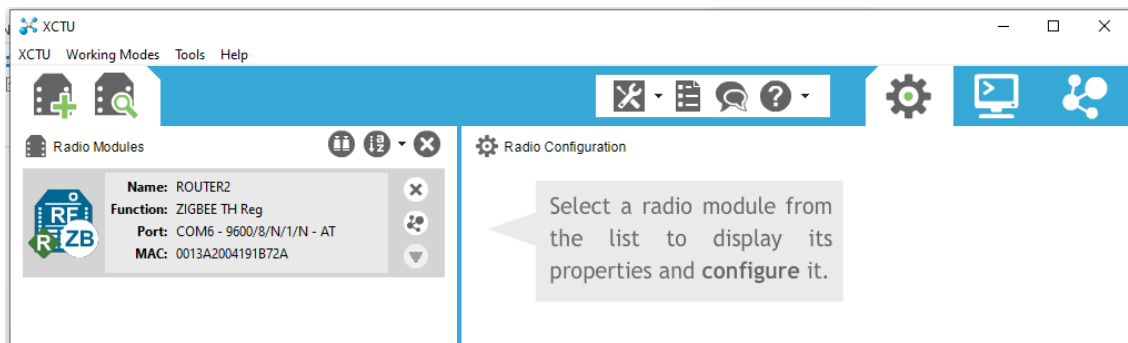


Figura 27 Ventana con los dispositivos agregados

fuelle: Autor

b) Configurar los parámetros de los dispositivos Xbee

Iniciamos dando doble clic sobre el dispositivo a configurar como se muestra en la Figura 28

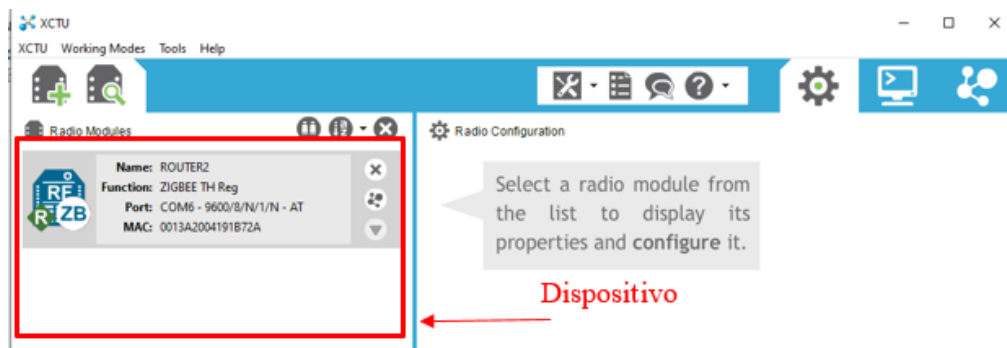


Figura 28 Modulo a configurar

fuelle: Autor

En la Figura 29 se muestra la ventana de configuración observaremos los siguientes parámetros:

- Read: Leer la configuración actual
- Write: Escribir o guardar configuración
- Default: Configuración de fábrica
- Update: Actualizar el firmware del Xbee

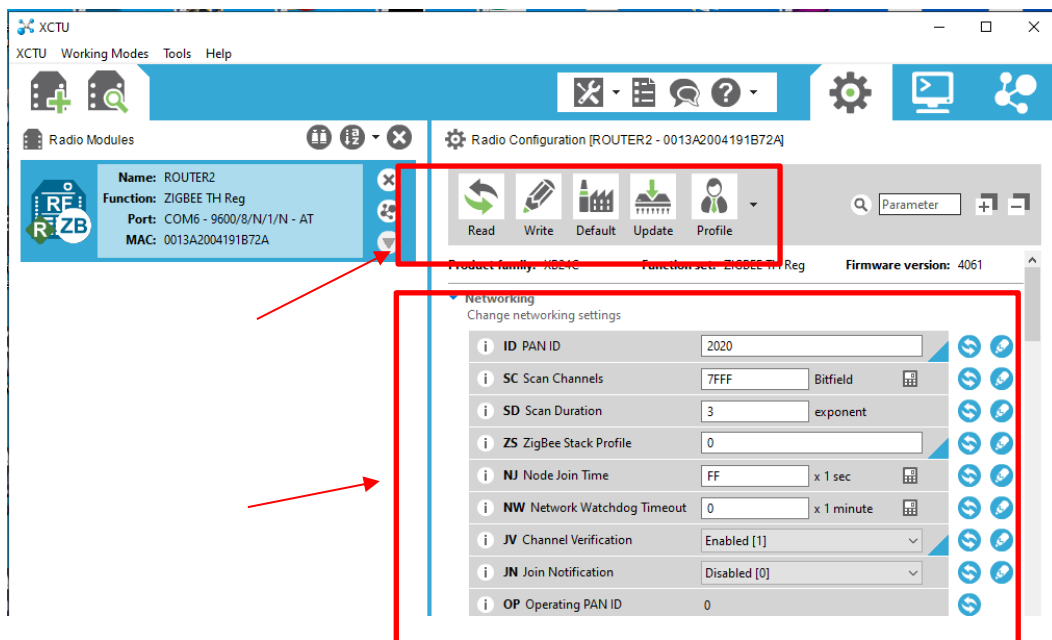


Figura 29 Parámetros de configuración de Módulos Xbee

fuelle: Autor

En la parte inferior tenemos los parámetros a configurar correspondientes al Networking los datos que tenemos que configurar son:

ID: 2020. Se configura un nombre para la red (todos los dispositivos deben tener el mismo nombre).

JV: 1, Se activa la detección de canales

Dados estos parámetros en la Figura 30 se puede apreciar cómo se configuran en la ventana de XCTU.

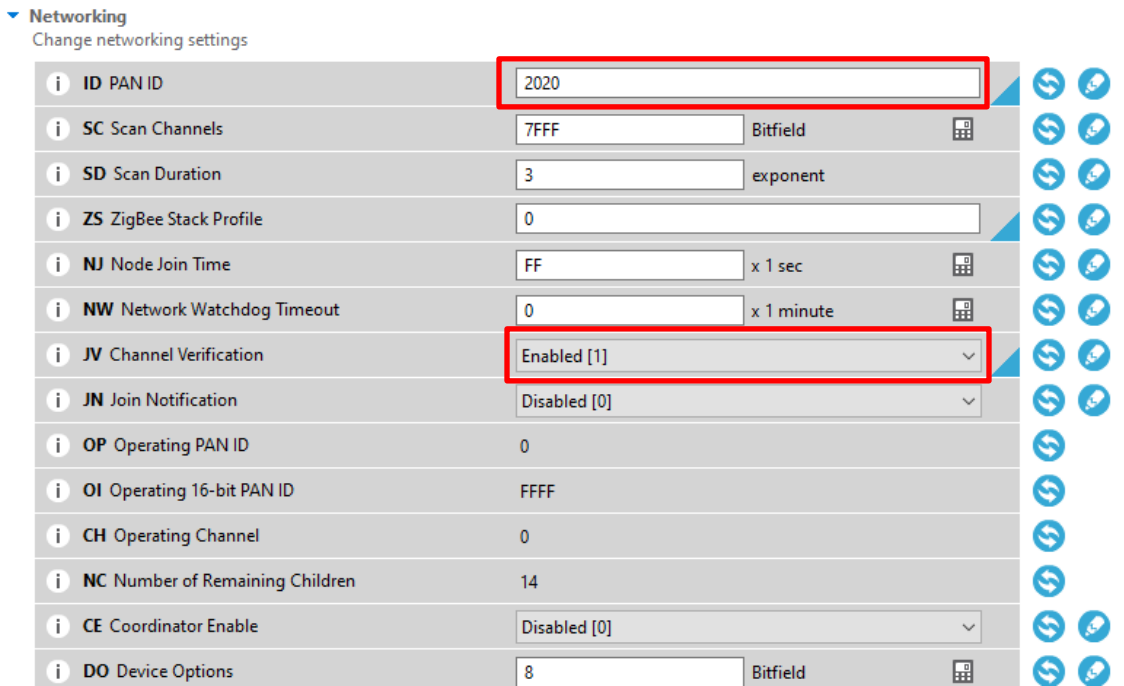


Figura 30 Parámetros a configurar en dispositivos Router

fuelle: Autor

Dados los parámetros procedemos a configurar el direccionamiento como se observa en la Figura 31

DH y DL: 0 Se configura en 0 para que se comunique solo con el coordinador

NI: Se configura un nombre al dispositivo para diferenciarlo que los demás



Figura 31 Detalles de red

Fuelle: Autor

Una vez configurado se pulsa clic en *Write* y listo, esto lo convierte automáticamente en un dispositivo Router o dispositivo final por defecto.

Ahora procedemos a configurar los parámetros para que el dispositivo funcione como Coordinador en la Figura 32 se muestra como configurar

ID: 2020. Se configura un nombre para la red

CE: 1. Se configura el dispositivo como coordinador

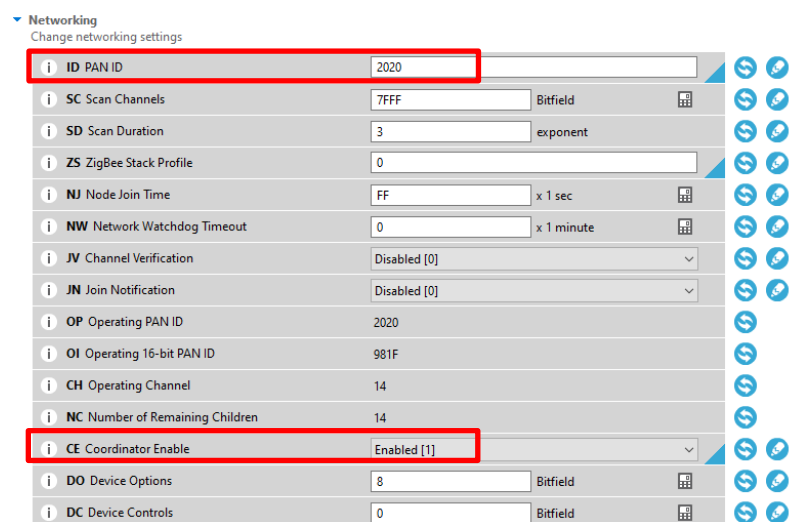


Figura 32 Configuración del Módulo Coordinador

Fuente: Autor

Después se procede a la configuración de los parámetros de direccionamiento como se muestra en la figura Figura 33.

DH y DL: 0 Y FFF. Se configura DH como 0 y DL como FFFF para realizar broadcast.

NI: CORDINAROR. Se configura un nombre al dispositivo para diferenciarlo que los demás.

▼ Addressing
Change addressing settings

i	SH Serial Number High	13A200	
i	SL Serial Number Low	41895FEF	
i	MY 16-bit Network Address	0	
i	MP 16-bit Parent Address	FFFE	
i	DH Destination Address High	0	
i	DL Destination Address Low	FFFF	
i	NI Node Identifier	CORDINADOR	
i	NH Maximum Hops	1E	
i	BH Broadcast Radius	0	
i	AR Many-to-One Route Broadcast Time	FF	x 10 sec
i	DD Device Type Identifier	A0000	
i	NT Node Discovery Backoff	3C	x 100 ms
i	NO Node Discovery Options	0	
i	NP Maximum Number of Transmission Bytes	FF	
i	CR PAN Conflict Threshold	3	

Figura 33 Configuración de red del Coordinador

fuelle: Autor

Por último, se procede a la activación del modo api como se muestra en la Figura 34

AP: Se activa el modo API en el dispositivo para proporcionar mayores funcionalidades.

▼ Serial Interfacing
Change modem interfacing options

i	BD Baud Rate	9600 [3]	
i	NB Parity	No Parity [0]	
i	SB Stop Bits	One stop bit [0]	
i	RO Packetization Timeout	3	x character times
i	D6 Pin 16 - DIO6/nRTS Configuration	Disable [0]	
i	D7 Pin 12 - DIO7/nCTS Configuration	nCTS flow control [1]	
i	AP API Enable	API enabled [1]	
i	AO API Output Mode	Native [0]	

Figura 34 Direccionamiento del coordinador

fuelle: Autor

procedemos a pulsar clic en *Write* y listo tendremos el dispositivo configurado.

Una vez configurados todos los dispositivos obtenemos las siguientes direcciones de los módulos y el modo en el que se encuentra trabajando, en la Tabla 11 se muestra la información.

Tabla 11 Tabla resumen de configuración de los módulos

fuelle: Autor

ID dispositivo	Dirección MAC	Modo
Router A	00:13:A2:00:41:9B:4D:ED	Modo Transparente
Router B	00:13:A2:00:41:91:B7:2 ^a	Modo Transparente
Router C	00:13:A2:00:41:9C:4 ^a :3C	Modo Transparente
Coordinador	00:13:A2:00:41:9B:51:D4	Modo API

3.7.2.5 Obtener el valor RSSI

Para la obtención del valor de RSSI necesitamos generar una trama API con información del comando AT correspondiente a la petición de dicho valor, el comando que realiza la petición del valor es el comando ATDB.

Para generar las tramas se emplea el software XCTU, en la Figura 35 se observa la herramienta para generar las tramas el cual procedemos a hacer clic.

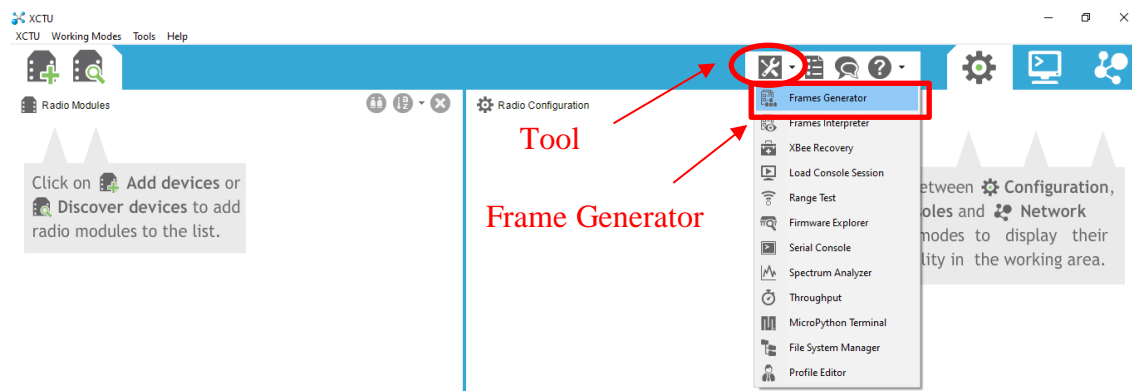


Figura 35 Generación de tramas API

fuelle: Autor

Una vez en abierta la herramienta procedemos a configurar los parámetros como se observa en la Figura 36, colocamos la dirección MAC del Router A, B, C respectivamente en la dirección de destino de 64bit y el comando ATDB.

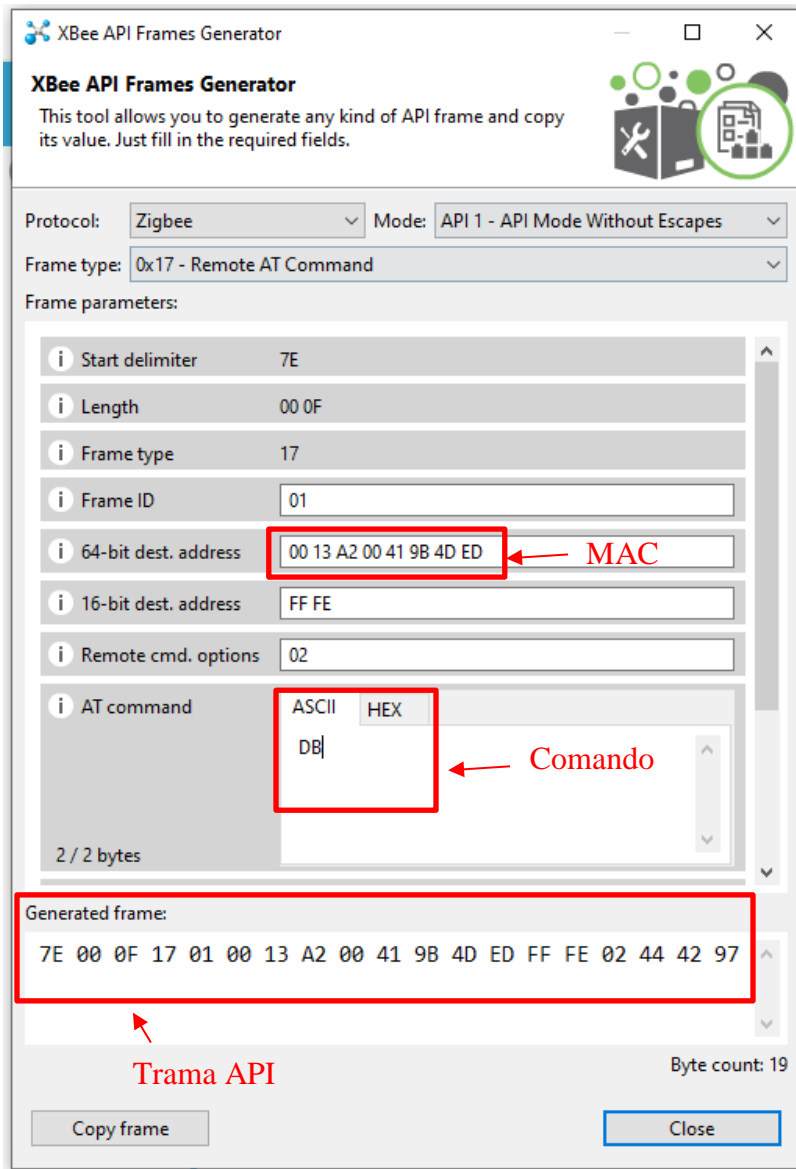


Figura 36 Construcción de la trama API

Fuente: Autor

Se genera la siguiente trama de bits **7E 00 0F 17 01 00 13 A2 00 41 9B 4D ED FF FE 02 44 42 97** la cual se describe en la Tabla 12:

Tabla 12 Trama API para adquisición de RSSI

Fuente: Autor

bits	DESCRIPCIÓN
7E	Delimitador: Indica comienzo del paquete
00 0F	Largo: Numero de bytes
17	Tipo de mensaje: 0x17 Remote AT Command Request
01	Frame ID: 0x01 solicitamos respuesta
00 13 A2 00 41 9B 4D ED	Dirección de destino 64-bits: MAC de cada dispositivo
FF FE	Dirección de destino 16-bits
02	Opción del comando remoto: 0x02 para guardar cambios
44 42	Nombre del comando AT: DB en ASCII
97	Checksum: calculada por el software, sirve para verificar la trama

Para los otro routers se deberá reemplazar la dirección MAC obteniendo la siguiente información como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13 Tabla resumen de peticiones RSSI

Fuente: Autor

DISPOSITIVO	TRAMA
Router A	7E 00 0F 17 01 00 13 A2 00 41 9B 4D ED FF FE 02 44 42 97
Router B	7E 00 0F 17 01 00 13 A2 00 41 91 B7 2ª FF FE 02 44 42 FA
Router C	7E 00 0F 17 01 00 13 A2 00 41 9C 4ª 3C FF FE 02 44 42 98

Envío de tramas API

Una vez generadas las tramas en el software XCTU se procede a enviarlas mediante un arduino uno el cual está conectado a un XBee configurado como coordinador, debido a que arduino uno tiene un puerto serial se emplea la librería Software serial como se muestra en la Figura 37, para crear un puerto serial virtual el cual se usa para comunicar el arduino con el Xbee, luego se inicializaran los puertos como se muestra en la Figura 38.

```
//Librerias
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial Xbee(11,10);
```

Figura 37 Inclusión de la librería en Arduino

Fuente: Autor

```
//Configuracion
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  Xbee.begin(9600);
  delay(2000);
}
```

Figura 38 Configuración de los puertos serial

Fuente: Autor

Para el envío de las tramas se crea una función para cada Router y enviar los datos mediante el comando Xbee.write(“parámetro”) como se muestra en la Figura 39.

```

void RouterA() {
  Serial.print("A, ");
  Xbee.write(0x7E);
  Xbee.write((byte)0x0);
  Xbee.write(0x0F);
  Xbee.write(0x17);
  Xbee.write(0x01);
  Xbee.write((byte)0x0);
  Xbee.write(0x13);
  Xbee.write(0xA2);
  Xbee.write((byte)0x0);
  Xbee.write(0x41);
  Xbee.write(0x9B);
  Xbee.write(0x4D);
  Xbee.write(0xED);
  Xbee.write(0xFF);
  Xbee.write(0xFE);
  Xbee.write(0x02);
  Xbee.write(0x44);
  Xbee.write(0x42);
  Xbee.write(0x97);
}

```

Figura 39 Función para envío de trama en el Router A

Fuente: Autor

Una vez enviada la trama debemos esperar la respuesta del Xbee remoto con el cual obtenemos la siguiente información correspondiente a la trama API, en la Figura 40 se observa la respuesta del Router A.

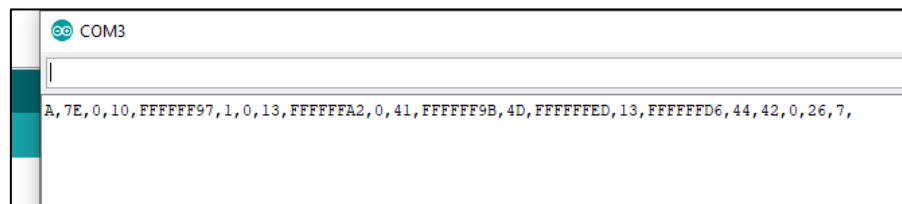


Figura 40 Trama de respuesta del Router A

Fuente: Autor

La trama está conformada de la siguiente manera 7E 00 10 97 01 00 13 A2 00 41 9B 4D ED 13 D6 44 42 00 26 07 la cual se describe en la Tabla 14:

Tabla 14 Trama API con el comando DB

Fuente: Autor

Nº bit	BITS	DESCRIPCION
1	7E	Delimitador: Indica comienzo del paquete
2-3	00 10	Largo: Numero de bytes
4	97	Tipo de mensaje: 0x97 Remote AT Command Response
5	01	Frame ID: 0x01 solicitamos respuesta
6-13	00 13 A2 00 41 9B 4D ED	Dirección de destino 64-bits: MAC de cada dispositivo
14-15	13 D6	Dirección de destino 16-bits
16-17	44 42	Nombre del comando AT: DB en ASCII
18	00	Codigo de estado: 0x00 OK
19	26	Valor del comando AT: DB
20	07	Checksum: calculada por el dispositivo, sirve para verificar la trama

De la trama de respuesta nuestro byte de interés es el byte 19 que contiene el valor del parámetro DB en hexadecimal.

Procedemos a realizar mediciones a diferentes distancias como se muestra en la tabla Tabla 15, en la Figura 41 se muestra una prueba de medición de distancia.

Tabla 15 Mediciones de Distancia

Fuente: Autor

Distancia (m)	RSSI (dBm)
1	-36
2	-40
3	-45
4	-48
5	-50

Con estos valores y utilizando la Ecuación 4 procedemos a obtener los valores de n los cuales observamos en la Tabla 16

Tabla 16 Calculo de la constante de perdidas en el espacio libre

Fuente: Autor

Distancia (m)	N
2	1.33
3	1.88
4	1.99
5	2

Realizando una toma de 4 muestras significativas se estima que en promedio es: $n=1.8$.

```

Editor - C:\Users\JALEJO\Desktop\Proyectos\Matlab\MedirDistancia.m
MedirDistancia.m x EnviarDatoXbee.m x +
1 - K=36;
2 - n=1.8;
3 - s = serialport("COM3",9600,"Timeout",1);
4 - configureTerminator(s,"CR/LF");
5 - flush(s);
6 - disp('Inicio');
7 - writeline(s,"A");
8 - pause(2)
9 - for i=1:20
10 -     disp('Router A');
11 -     writeline(s,"A");%Solicitar Valor Xbee
12 -     pause(0.5)

Command Window
>> MedirDistancia
Inicio
Router A

A =

    40

    1.6681
    
```

Figura 41 Prueba de medición de distancia

fuelle: Autor

En la Figura 42 se muestra una prueba del sistema y visualización en Matlab.

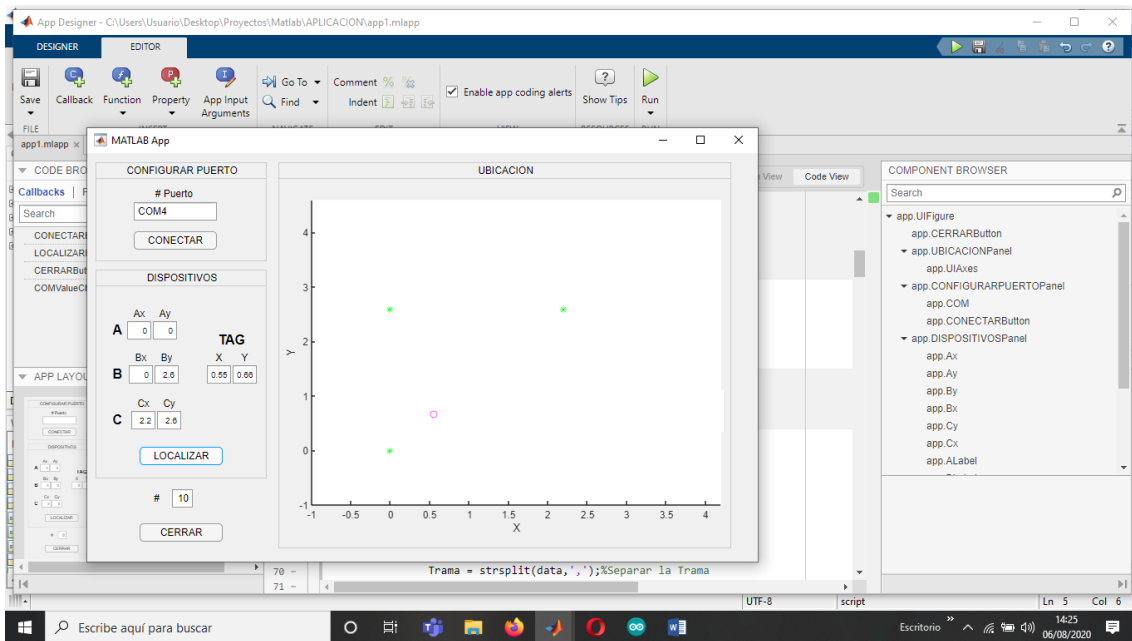


Figura 42 Localización del nodo mediante 3 anclas

fuelle: Autor

3.7.2.6 Obtener el valor de la distancia entre dispositivos

Para obtener el valor de distancia entre dispositivos se desarrolló una programación en MatLab el cual me permite conocer la distancia entre el nodo móvil y los nodos ancla en la Figura 43 se muestra dicha programación.

```

MedirDistancia.m x MedirDistanciaB.m x MedirDistanciaC.m x EnviarDatoXbee.m x +
1 - clear all;
2 - clc;
3
4 - K=34;
5 - n=1.8;
6 - s = serialport("COM4",9600,"Timeout",1);
7 - configureTerminator(s,"CR/LF");
8 - flush(s);
9 - disp('Inicio');
0 - writeline(s,"B");
1 - pause(2)
2 - for i=1:5
3 -     disp('Distancia al router A');
4 -     writeline(s,"A");%Solicitar Valor Xbee
5 -     pause(0.2)
6 -     data = readline(s);%Recibir Dato Xbee
7 -     Trama = strsplit(data,',');%Separar la Trama
8 -     DB_A=Trama(20);%Seleccionar valor DB
9 -     A=hex2dec(DB_A);%Convertir a Decimal
0 -     dl=10^((A-K)/(10*n));%Obtener la Distancia desde Xbee A hasta PC
1 -     pause(0.1);
2 -     disp(dl);
3 -     pause(0.5);
4 - end
5 - flush(s);

```

Figura 43 Programación para la medición de distancia entre el nodo móvil y el Router A

fuelle: Autor

Según la programación está diseñada para una toma de 5 muestras las cuales arrojan los siguientes resultados como se muestra en la Figura 44.

```

Command Window
Inicio
Distancia al router A en metros
    1.1365

Distancia al router A en metros
    1.1365

Distancia al router A en metros
    1.1365

Distancia al router A en metros
    1.1365

Distancia al router A en metros
    1.1365

```

Figura 44 Distancia al Router A

Fuelle: Autor

Luego procedemos a realizar el mismo procedimiento para los demás routers arrojando los siguientes resultados representando en la Figura 45 y la Figura 45.

```
Command Window
Inicio
Distancia al router B en metros
0.7743

Distancia al router B en metros
0.7743

Distancia al router B en metros
0.7743

Distancia al router B en metros
0.7743

Distancia al router B en metros
0.7743
```

Figura 45 Distancia al Router B

fuelle: Autor

```
Command Window
Inicio
Distancia al router C en metros
2.1544

Distancia al router C en metros
2.1544

Distancia al router C en metros
2.1544

Distancia al router C en metros
2.1544

Distancia al router C en metros
2.1544
```

Figura 46 Distancia al Router C

fuelle: Autor

En la Tabla 17 observamos los valores medidos de distancia

Tabla 17 Tabla de mediciones de distancia

fuelle: Autor

		Nodos Ancla		
		Router A	Router B	Router C
Nodo móvil		1.13m	0.77m	2.15m

3.7.2.7 Obtener la ubicación del nodo móvil mediante la técnica RSSI y AOA

Para determinar la ubicación del nodo móvil se aplicó las técnicas de trilateración en RSSI y la técnica de ubicación AOA para luego combinarlas mediante un promedio de ambas técnicas para mejorar la exactitud de la ubicación en la Figura 47 se muestra la posición de los nodos ancla y el móvil.

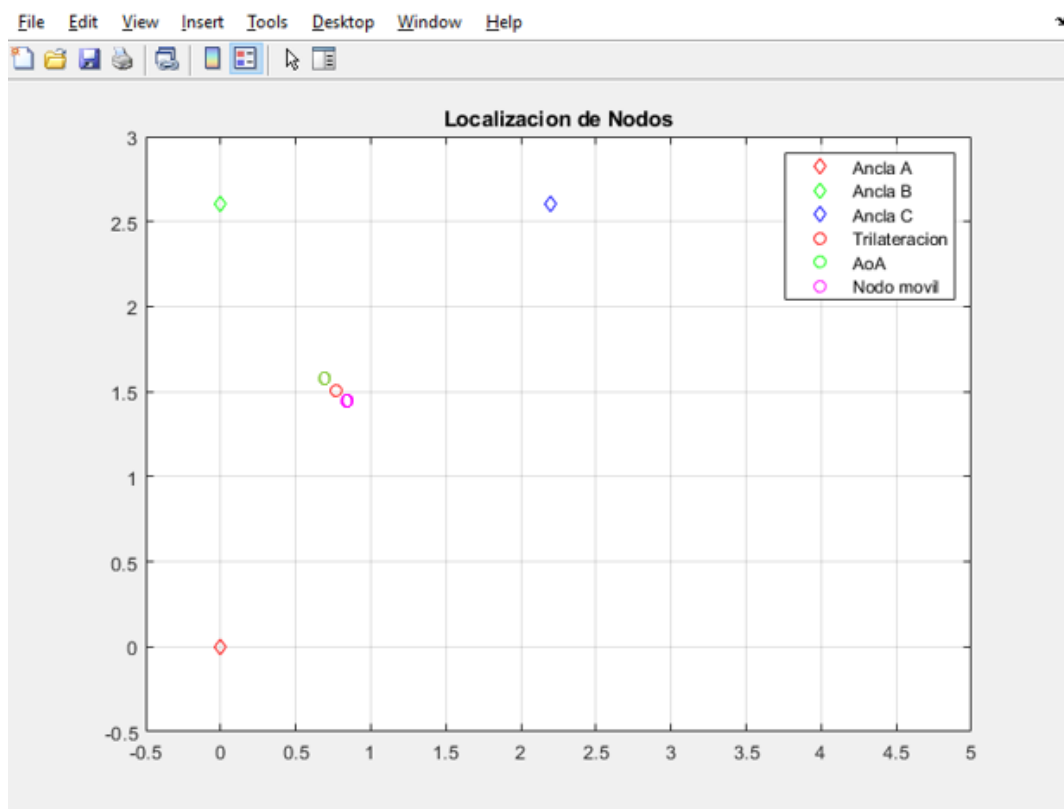


Figura 47 Localización de nodo móvil

fuelle: Autor

Según la estimación de ubicación con los parámetros conocidos del nodo ancla A que se encuentra en la posición (0,0) del plano, el nodo ancla B (0,2.6) del plano y el nodo ancla C en la posición (2.2,2.6) del plano, el nodo móvil se encuentra en la posición (0.75,1.5) del plano.

Para comprar con la ubicación estimada se procede a realizar el proceso matemático con las medidas antes tomadas en la Tabla 17.

Primero se con el nodo A como se muestra en la Figura 48.

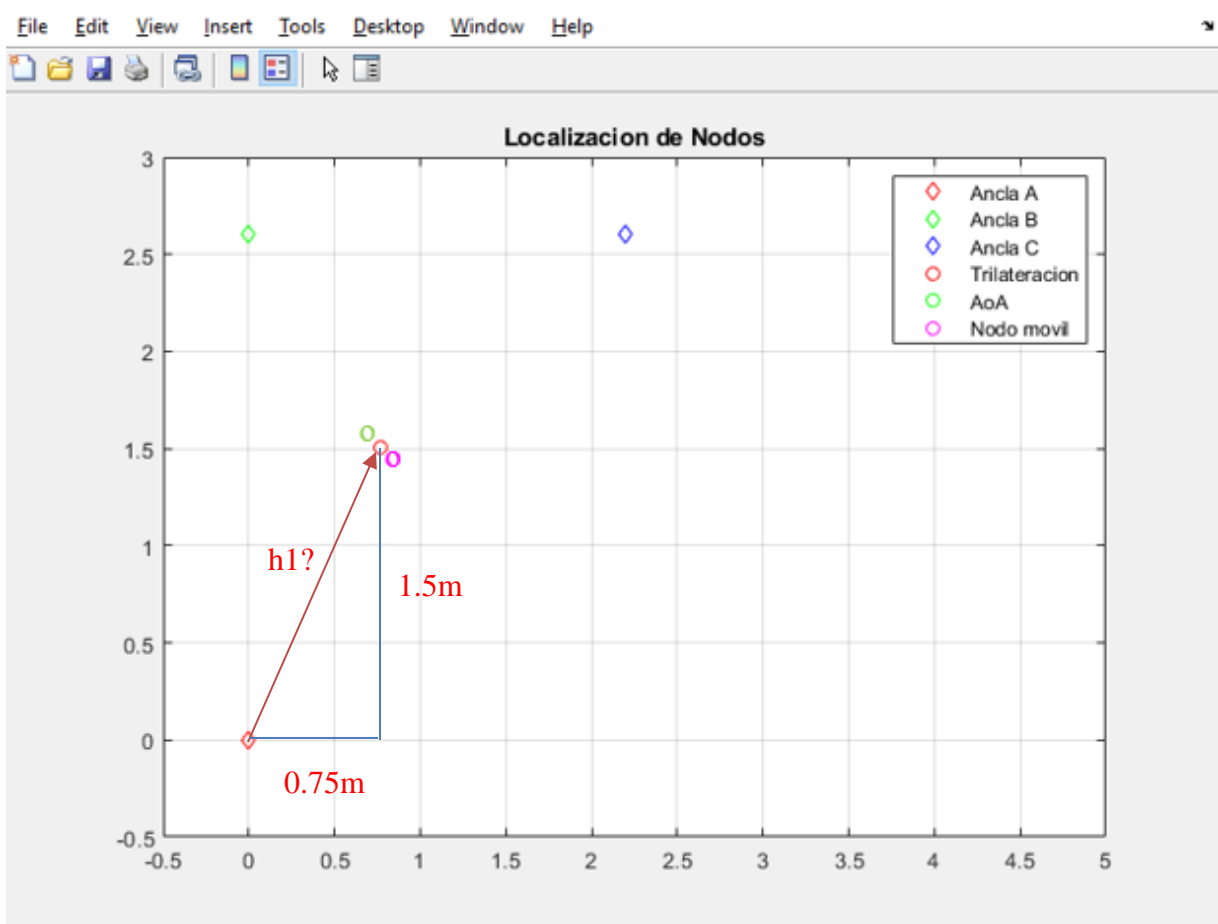


Figura 48 Calculo de distancia en el nodo ancla A

fuelle: Autor

Con el teorema de Pitágoras Ecuación 14, se encuentra la distancia entre el nodo ancla A y el nodo móvil.

(Ec.14)
$$h = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Con la Ecuación 14 calculamos la distancia 1:

$$h_1 = \sqrt{0.75^2 + 1.5^2}$$

$$h_1 = 1.6$$

Repetimos los pasos con el nodo ancla B como se muestra en la Figura 49

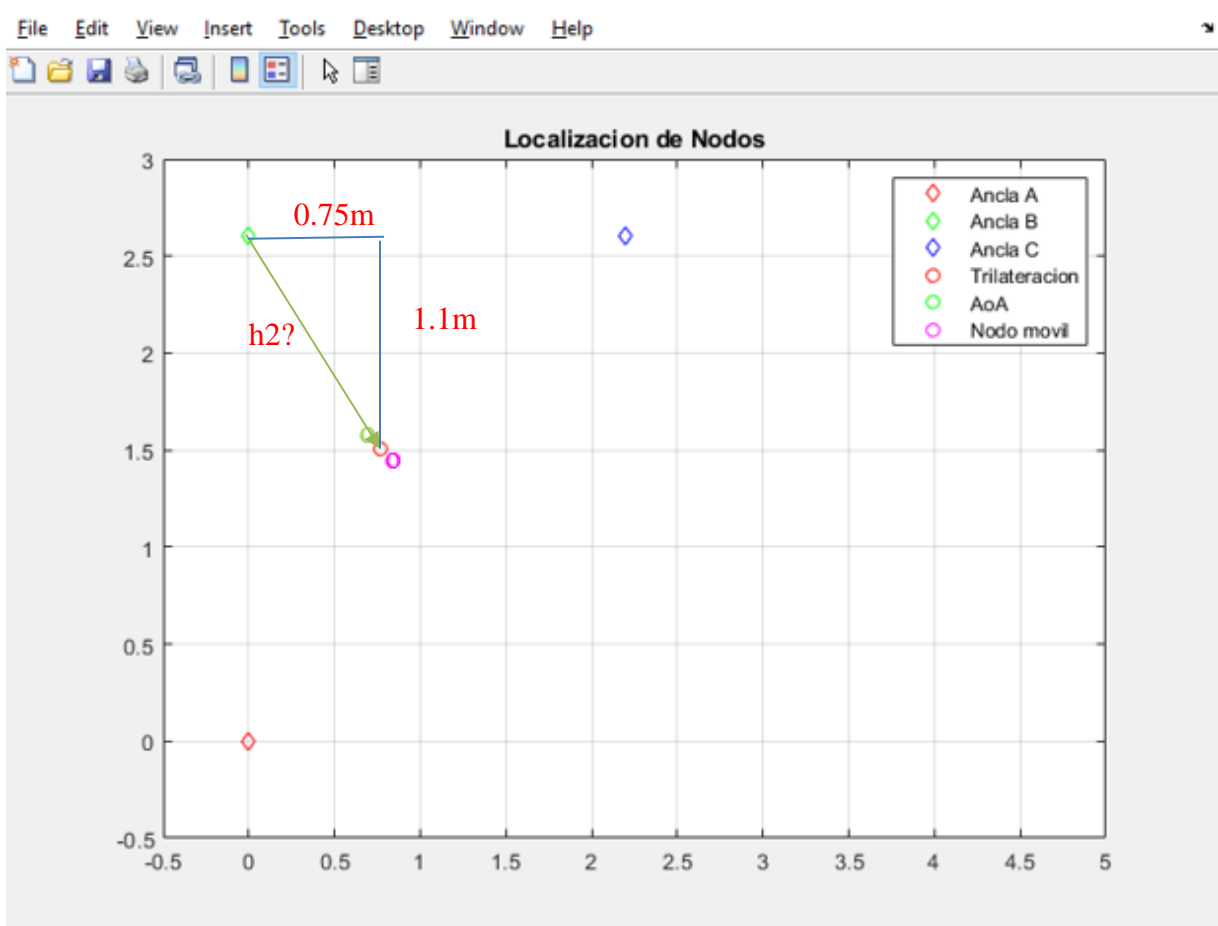


Figura 49 Calcula de la distancia el nodo ancla B

fuelle: Autor

De acuerdo a la Ecuación 14 estimamos la distancia 2

$$h_1 = \sqrt{0.75^2 + 1.1^2}$$

$$h_1 = 1.3$$

Repetimos los pasos con el nodo ancla C como se muestra en la Figura 50

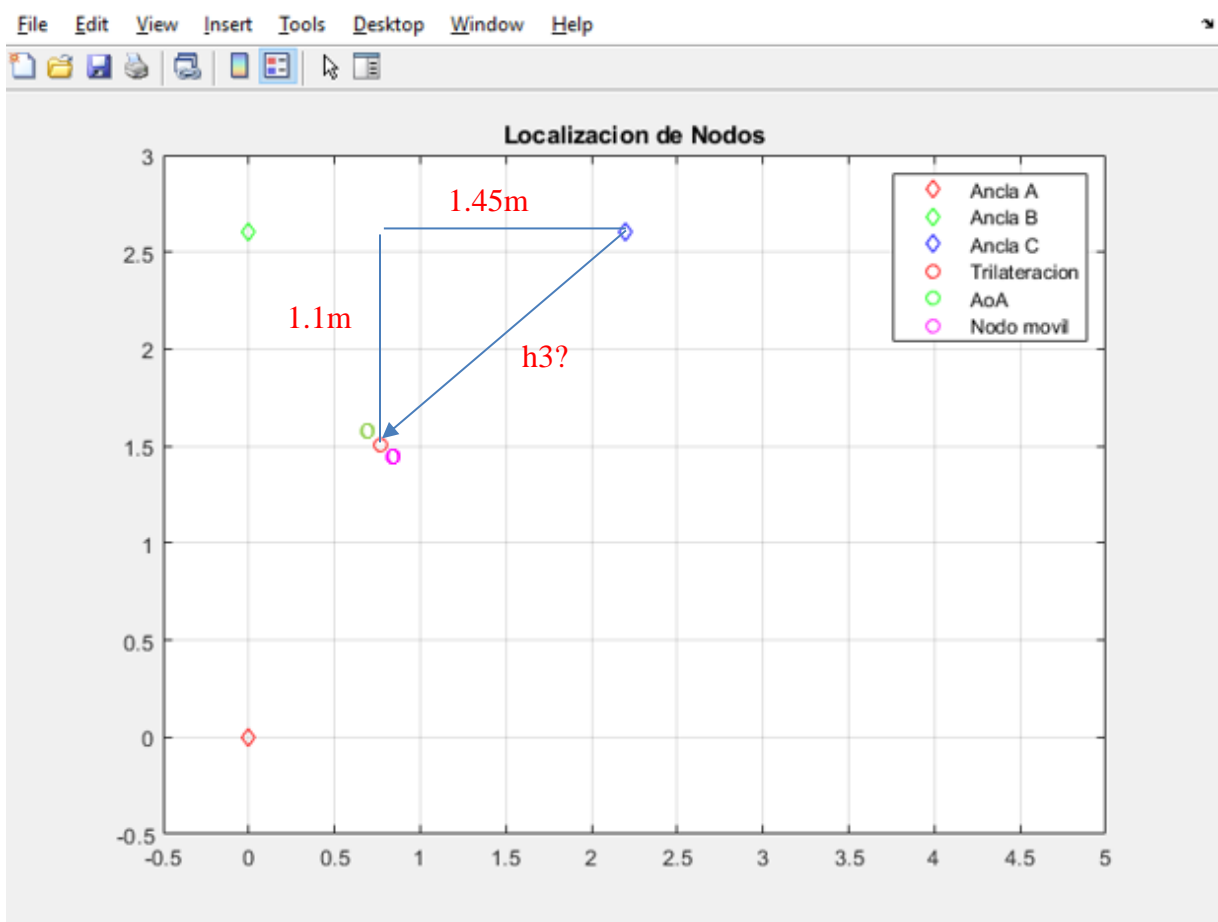


Figura 50 Calcula de la distancia el nodo ancla C

fuelle: Autor

De acuerdo a la Ecuación 14 estimamos la distancia 3.

$$h_1 = \sqrt{1.45^2 + 1.1^2}$$

$$h_1 = 1.8$$

Tabla 18 Comparación de resultados

fuelle: Autor

	Nodos Ancla		
	Router A	Router B	Router C
Nodo móvil estimado	1.13m	0.77m	2.15m
Nodo móvil calculado	1.6m	1,3m	1.8m
Nodo móvil medido	1.26m	1.4m	1.9m

A partir de la tabla 15 se puede establecer el margen de error de las medidas de acuerdo a la formula del error relativo como se muestra en la Ecuación 15.

$$(Ec.15.) \quad \%Error.relalivo = \frac{|(valor\ aprox-valor\ exacto)|}{(valor\ exacto)} \times 100\%$$

Donde

Aplicando la ecuación 15 se obtiene el % en el RA, RB Y RC respectivamente:

$$\%errorRA = \frac{|(1.13 - 1.26)|}{1.26} \times 100\%$$

$$\%errorRA = 10.3\%$$

$$\%errorRB = \frac{|(0.77 - 1.4)|}{1.4} \times 100\%$$

$$\%errorRB = 45\%$$

$$\%errorRC = \frac{|(1.9 - 2.15)|}{2.15} \times 100\%$$

$$\%errorRC = 11.6\%$$

Estos valores de error se encuentran muy próximos según lo establecido por (Garcia, 2008) para distancias menores a 20m obtengan un porcentaje de error permisible del 10%.

CAPITULO IV

4 RESULTADOS

Para la evaluación de los resultados el nodo móvil se ubicó en diferentes posiciones para ser localizado en un eje de coordenadas determinado por nuestro algoritmo, se tomaron un total de 10 muestras como se observa en la Tabla 19 dando como resultados las siguientes ubicaciones en el plano,

Tabla 19 Ubicación del nodo móvil

fuelle: Autor

<i>Nº de Muestra</i>	<i>Posición estimada del nodo en un eje de coordenadas (X, Y)</i>	<i>Posición medida del nodo en un eje de coordenadas (X, Y)</i>
1	$P_1(0.4,1.1)$	$P_1(0.6,0.90)$
2	$P_2(0.6,1.5)$	$P_2(0.9,1.45)$
3	$P_3(1.10,2.01)$	$P_3(1.6,2.2)$
4	$P_4(1,50,80)$	$P_4(1.22,0.89)$
5	$P_5(1.55,1.90)$	$P_5(1.85,2.3)$

En las siguientes figuras se muestran las ubicaciones reales y las estimadas del nodo móvil dentro de la WSN.

La Figura 51 y Figura 52 corresponden a la posición 1(P_1).

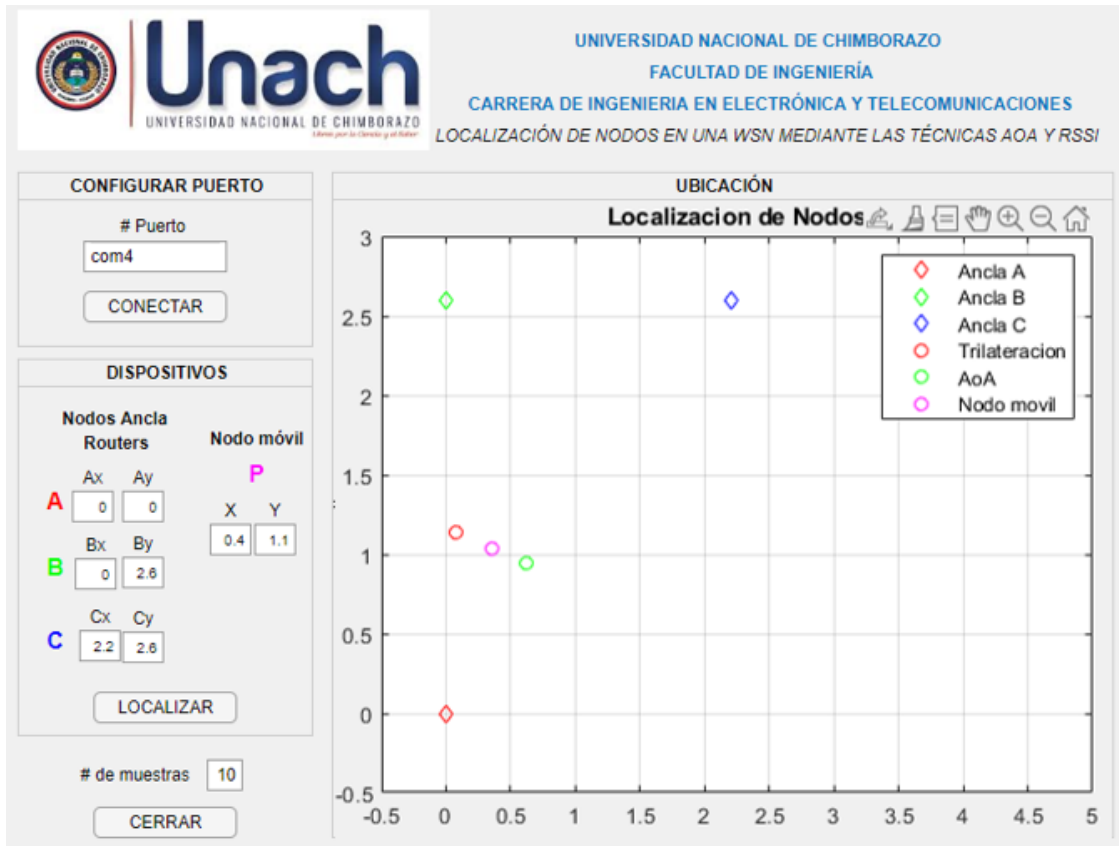


Figura 51 Ubicación del nodo móvil mediante el programa

fuelle: Autor

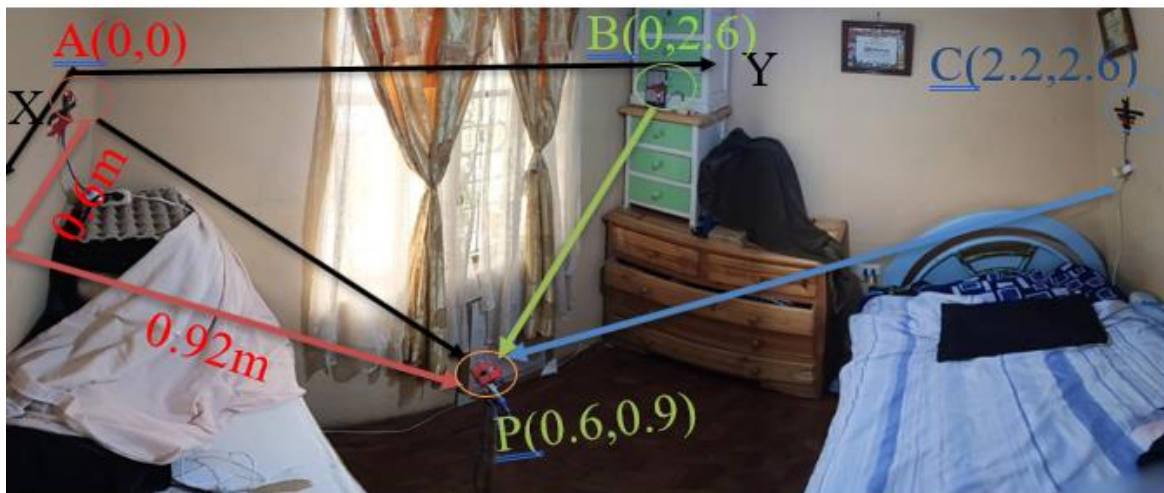


Figura 52 Ubicación del nodo móvil mediante medición

Fuente: Autor

La Figura 53 y Figura 54 corresponden a la posición 2 (P_2).

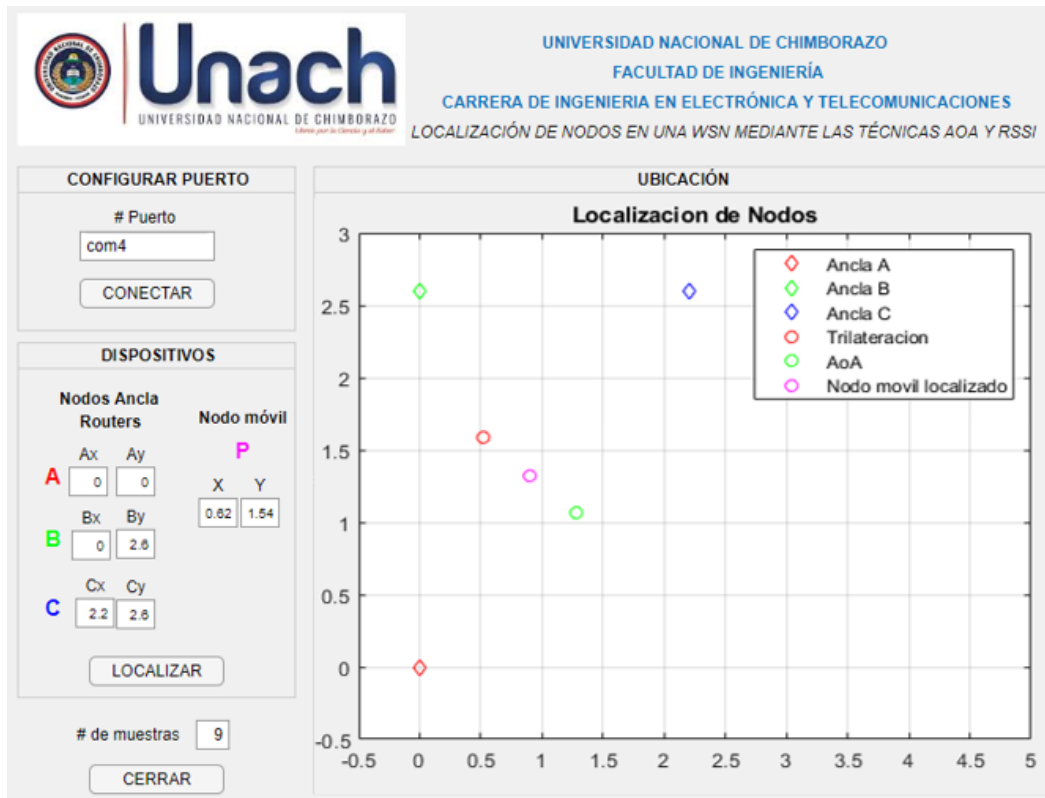


Figura 53 Ubicación del nodo móvil mediante el programa

fuelle: Autor



Figura 54 Ubicación del nodo móvil mediante la medición

fuelle Autor

La Figura 55 y Figura 56 corresponden a la posición 3(P_3).

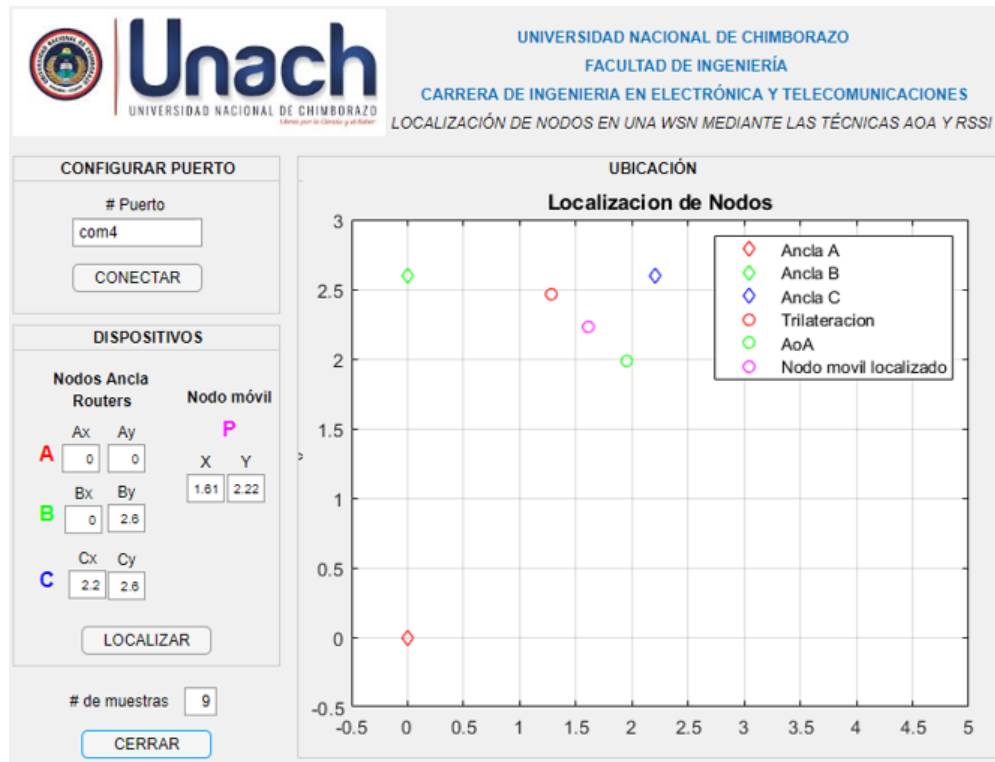


Figura 55 Ubicación del nodo móvil mediante el programa

fuelle Autor



Figura 56 Ubicación del nodo móvil mediante medición

fuelle: Autor

La Figura 57 y Figura 58 corresponden a la posición 4(P_4).

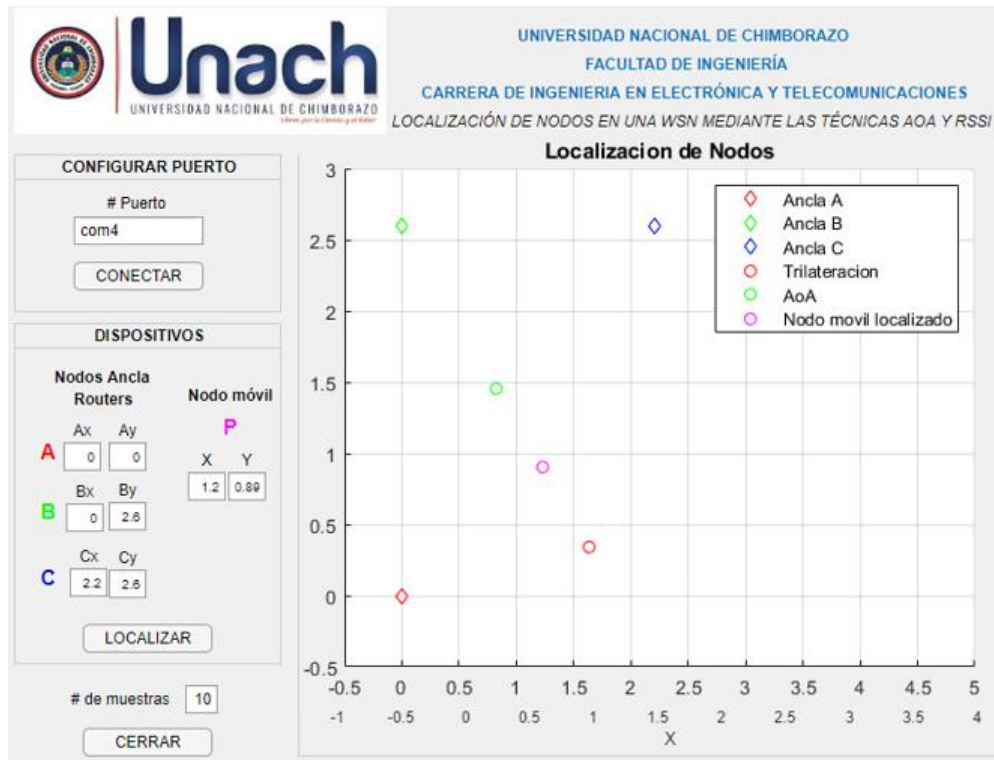


Figura 57 Ubicación del nodo móvil mediante el programa

fuelle: Autor

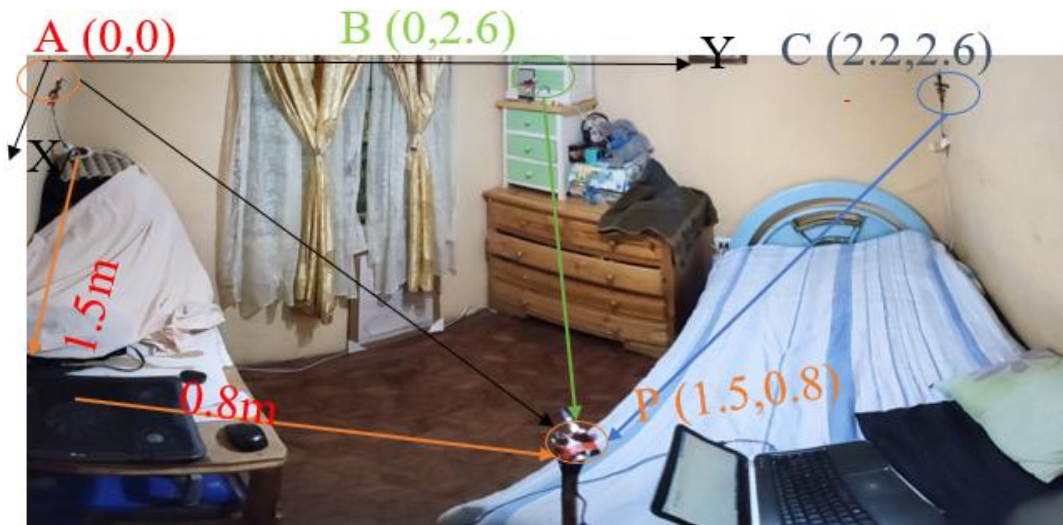


Figura 58 Ubicación del nodo móvil mediante medición

fuelle: Autor

La Figura 59 y Figura 60 corresponden a la posición 5 (P_5).

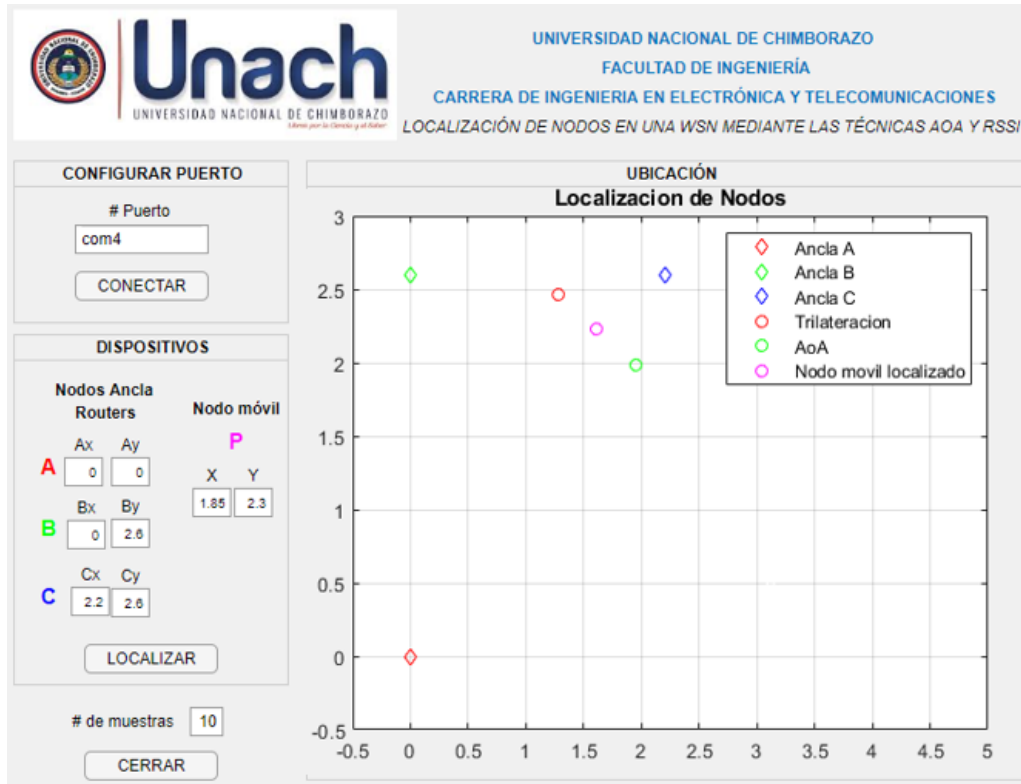


Figura 59 Ubicación del nodo móvil mediante el programa

fuelle: Autor



Figura 60 Ubicación del nodo móvil mediante medición

fuelle: Autor

Para evaluar el parámetro de exactitud del algoritmo de localización se utiliza la Ecuación 15 permitiendo dibujar la Tabla 20 a partir de los datos de la Tabla 19.

Tabla 20 Estimación de la Exactitud

fuelle: Autor

Nº Ubicación	Error cuadrático medio
P₁	0.28
P₂	0.30
P₃	0.53
P₄	0.29
P₅	0.5

A partir del porcentaje de valor del error cuadrático medio podemos decidir que los valores que más se acercaron a el 0 son los más exactos siendo que los valores estimados en la posición 1 y posición 4 son los más exactos sin embargo los demás valores no se alejan mucho del objetivo siendo también exactos, pero en un valor grado menor.

Después se procede a evaluar la precisión en base al valor real medido de la ubicación del nodo como resultado nos muestra en la Tabla 21 en donde utiliza la fórmula de la media, Ecuación 16, la desviación estándar muestral (s), Ecuación 17 y el error relativo para establecer la precisión.

(Ec.16)
$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{n}$$

(Ec.17)
$$s^2 = \frac{\sum_i^n x_i^2 - n(\bar{x})^2}{n-1}$$

Tabla 21 Estimación de la precisión

fuelle: Autor

Nº de Muestras	Posición real	Posiciones estimadas	Media (\bar{x})	Desviación estándar muestral (s)	Error relativo
10	$P_1(0.6,0.90)$	$-P_1(0.4,0.11)$ $-P_1(0.7,0.90)$ $-P_1(0.4,0.80)$ $-P_1(0.6,0.90)$ $-P_1(0.35,1.0)$ $-P_1(0.35,1.0)$ $-P_1(0.6,0.90)$ $-P_1(0.7,0.90)$ $-P_1(0.6,0.90)$ $-P_1(0.7,0.90)$	$P_1(0.54,0.83)$	$-S_X(0.14)$ $-S_Y(0.25)$	0.09
10	$P_2(0.9,1.45)$	$-P_2(0.9,1.32)$ $-P_2(0.6,1.50)$ $-P_2(0.6,1.50)$ $-P_2(0.9,1.32)$ $-P_2(0.6,1.50)$ $-P_2(0.9,1.32)$ $-P_2(0.4,1.70)$ $-P_2(0.6,1.50)$ $-P_2(0.4,1.70)$ $-P_2(0.6,1.32)$	$P_2(0.65,1.4)$	$-S_X(0.19)$ $-S_Y(1.14)$	0.9
10	$P_3(1.1,2.01)$	$-P_3(1.6,2.2)$ $-P_3(1.6,2.2)$ $-P_3(1.6,2.2)$ $-P_3(1.6,2.2)$ $-P_3(1.6,2.2)$ $-P_3(1.6,2.2)$ $-P_3(1.6,2.2)$ $-P_3(1.6,2.2)$ $-P_3(1.6,2.2)$ $-P_3(1.6,2.2)$	$P_3(1.6,2.2)$	$-S_X(0)$ $-S_Y(0)$	0.53
10	$P_4(1.5,0.80)$	$-P_4(1.2,0.89)$ $-P_4(1.2,0.89)$ $-P_4(1.5,0.90)$ $-P_4(1.2,0.89)$	$P_4(1.5,0.89)$	$-S_X(0.15)$ $-S_Y(0.05)$	0.09

		$-P_4(1.5,0.90)$ $-P_4(1.2,0.89)$ $-P_4(1.5,0.90)$ $-P_4(1.2,0.89)$ $-P_4(1.5,0.90)$ $-P_4(1.2,0.89)$			
10	$P_5(1.55,1.90)$	$-P_5(1.85,2.3)$ $-P_5(1.85,2.3)$ $-P_5(1.85,2.3)$ $-P_5(1.85,2.3)$ $-P_5(1.58,2.3)$ $-P_5(1.85,2.3)$ $-P_5(1.85,2.3)$ $-P_5(1.85,2.3)$ $-P_5(1.85,2.3)$ $-P_5(1.85,2.3)$	$P_4(1.79,2.3)$	$-S_X(0.08)$ $-S_Y(0)$	0.46

Los resultados demuestran que los algoritmos de localización son muy precisos como se puede observar en la Tabla 18 el dato de la desviación estándar muestral, en las muestras en la posición P3 y P5 se nota una clara precisión a una exactitud considerablemente buena.

En las Figura 61 se muestran los ejemplos de localización en la posición P1 del nodo móvil

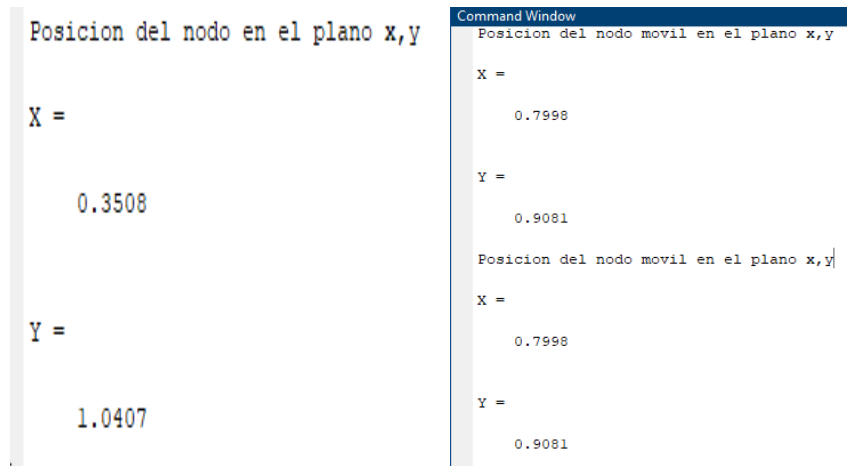


Figura 61 Muestras 1,5,10

fuelle: Autor

En las Figura 62 se muestran los ejemplos de localización en la posición P2 del nodo móvil

Command Window	Command Window
Posicion del nodo movil en el plano x,y	X =
X =	0.4951
0.9002	Y =
Y =	1.7819
1.3247	Posicion del nodo movil en el plano x,y
Posicion del nodo movil en el plano x,y	X =
X =	0.6258
0.9002	Y =
Y =	1.5442
1.3247	

Figura 62 Muestras 1,3,6,10

Fuente: Autor

En la Figura 63 se muestran los ejemplos de localización en la posición P3 del nodo móvil

Command Window	Command Window
Posicion del nodo movil en el plano x,y	Posicion del nodo movil en el plano x,y
X =	X =
1.6161	1.6161
Y =	Y =
2.2278	2.2278
Posicion del nodo movil en el plano x,y	Posicion del nodo movil en el plano x,y
X =	X =
1.6161	1.6161
Y =	Y =
2.2278	2.2278

Figura 63 Muestras 1,3,6,10

Fuente: Autor

En la Figura 64 se muestran los ejemplos de localización en la posición P4 del nodo móvil

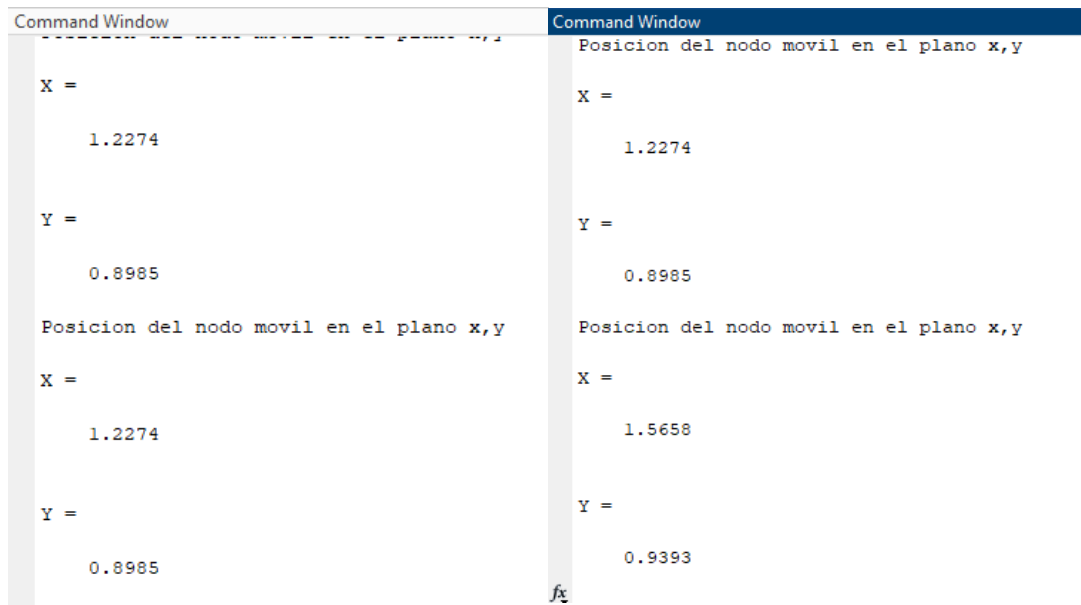


Figura 64 Muestras 1,3,6,10

fuelle: Autor

En la Figura 65 se muestran los ejemplos de localización en la posición P5 del nodo móvil

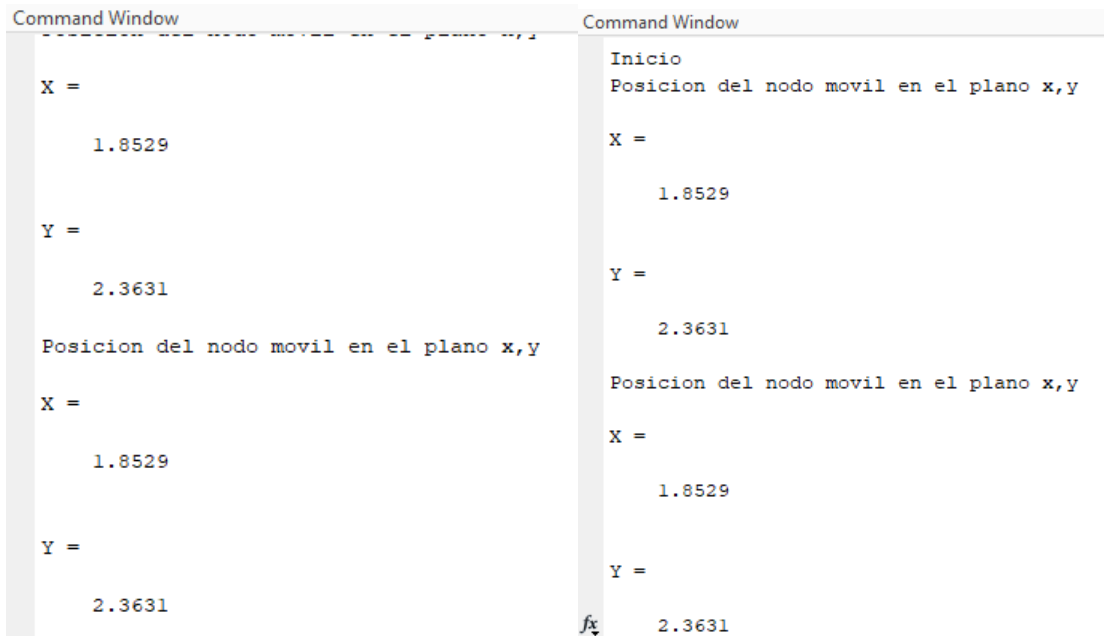


Figura 65 Muestras 1,3,6,10

fuelle: Autor

Luego se procede evaluar el costo de hardware la cual se especifican todos los materiales utilizados en la investigación en la Tabla 22.

Tabla 22 Materiales utilizados en el proyecto

fuelle: Autor

COSTO DEL PROYECTO			
Material	cantidad	Costo por unidad	Costo total
Arduino Genuino Uno R3	1	\$12	\$12
Modulo Zigbee ZB S2C TH	4	\$38.90	\$155.60
Explorador Regulador USB para módulos Zigbee	3	\$10	\$30
Fuente de alimentación de 5v	3	\$5	\$15
Computadora básica	1	\$600	\$600
Total			\$812.60

En la investigación presentada por Rozadilla Luis titulado “Evaluación de dispositivos UWB para localización en interiores con medidas de distancia” demuestra la eficiencia del sistema de localización con una precisión de 10 cm en entornos espacio libre en interiores, su costo estimado de producción se muestra en la Tabla 23 (Rozadillas, 2017).

Tabla 23 Costo de producción

fuelle: Autor

COSTO DEL PROYECTO			
Material	Cantidad	Costo por unidad	Costo total
Placa 873-EVB1000	2	\$107.6	\$215.22
Arreglo de antenas	4	\$15.50	\$162.0
Cables USB	1	\$1.0	\$1.0
Fuente de alimentación regulable de 20v	3	\$10	\$30
Computadora básica	1	\$600	\$600
Total			\$1008.22

En comparación al análisis de costo de hardware se verifica que el costo es mucho menor además presenta mayores funcionalidades por ser una red de sensores en comparación a la red dedicada únicamente para localización.

El comportamiento del algoritmo en espacios exteriores es diferente debido a factores como las condiciones climáticas, las pérdidas ocasionadas por la reflexión de las ondas electromagnéticas, etc. Para observar dicho comportamiento se definió un área de trabajo sin obstáculos de 20m x 40m, dicha área corresponde a una cancha de cemento de fútbol.

Para comprobar el funcionamiento del algoritmo se obtuvieron 4 muestras como lo indica la Tabla 24.

Tabla 24 Posición Real de los nodos en exteriores

Fuente: Autor

Posición de nodo	Distancia del nodo móvil al punto de origen	Posición real del nodo(m)
P1	7.07metros	P1(5,5)
P2	14.14metros	P1(10,10)
P3	21.21metros	P1(15,15)
P4	44.7metros	P1(20,40)

En las siguientes figuras se muestran las ubicaciones reales y las estimadas del nodo móvil dentro de la WSN en exteriores.

La Figura 66 y Figura 67 corresponden a la posición 1(P_1).

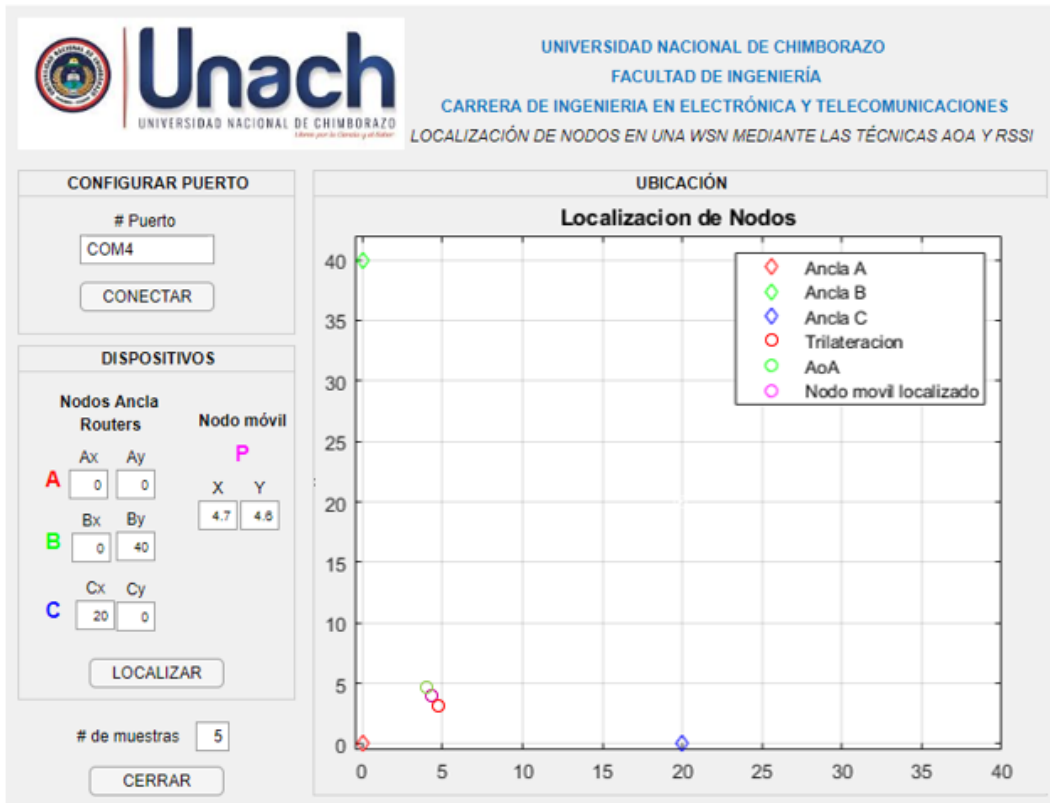


Figura 66 Posición 1 calculada

Fuente: Autor

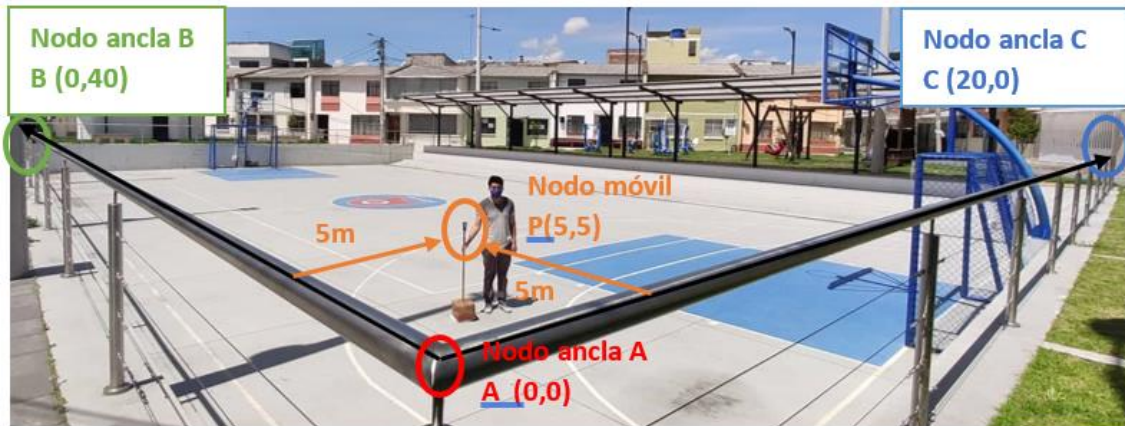


Figura 67 Posición 1

Fuente: Autor

La Figura 68 y Figura 69 corresponden a la posición 2(P_2).

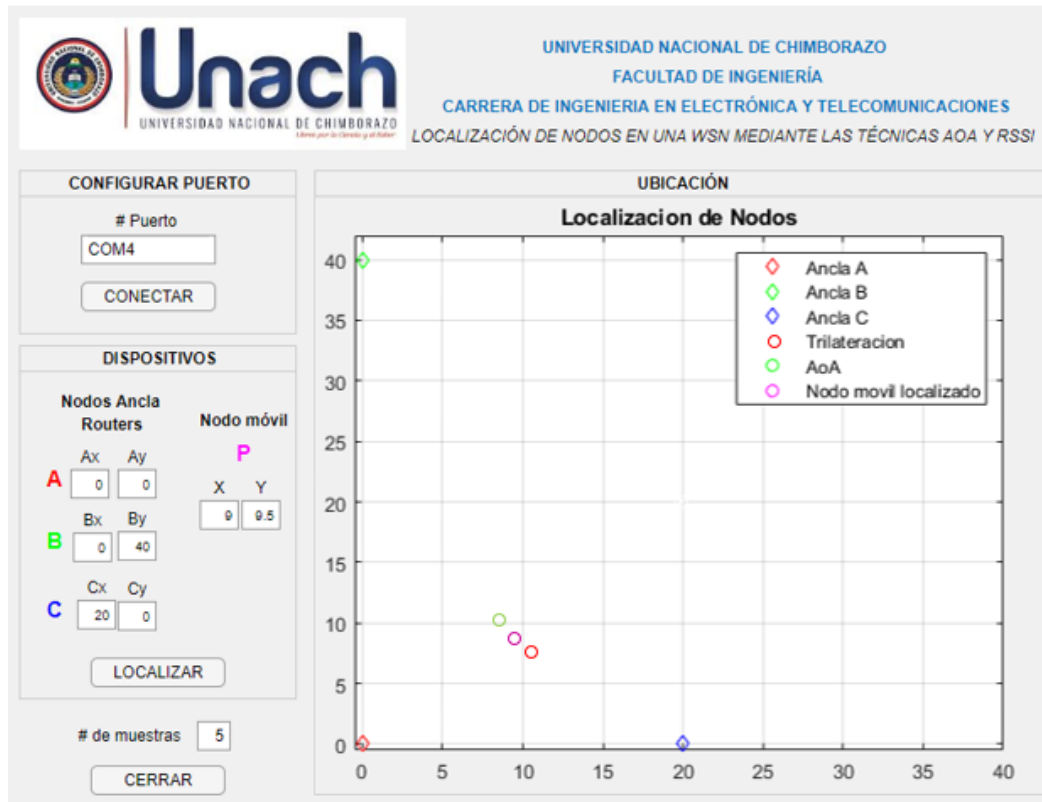


Figura 68 Posición 2 calculada

Fuente: Autor

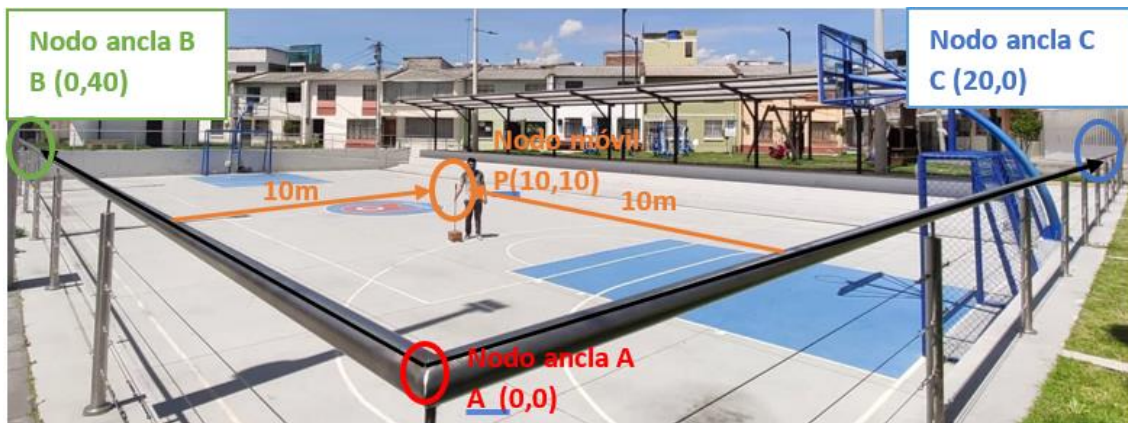


Figura 69 Posición 2

Fuente: Autor

La Figura 70 y Figura 71 corresponden a la posición 3(P_3).

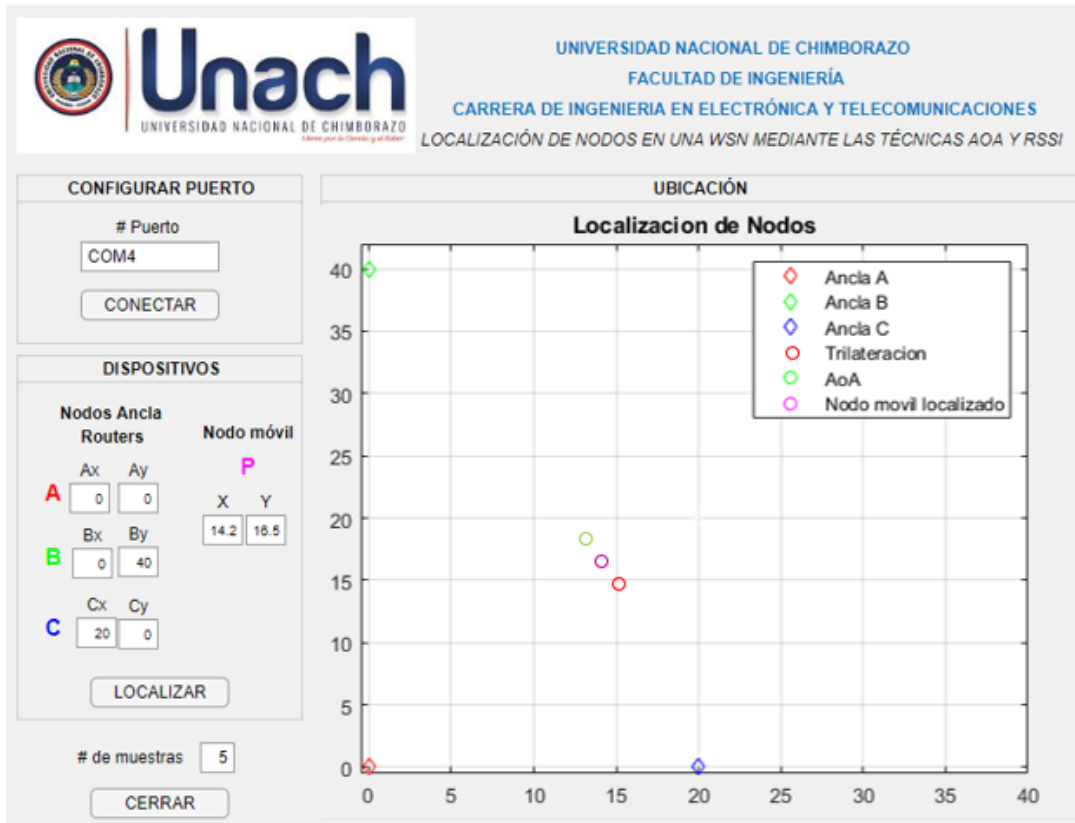


Figura 70 Posición 3 calculada

Fuente: Autor



Figura 71 Posición 3

Fuente: Autor

La Figura 72 y Figura 73 corresponden a la posición 4(P_4).

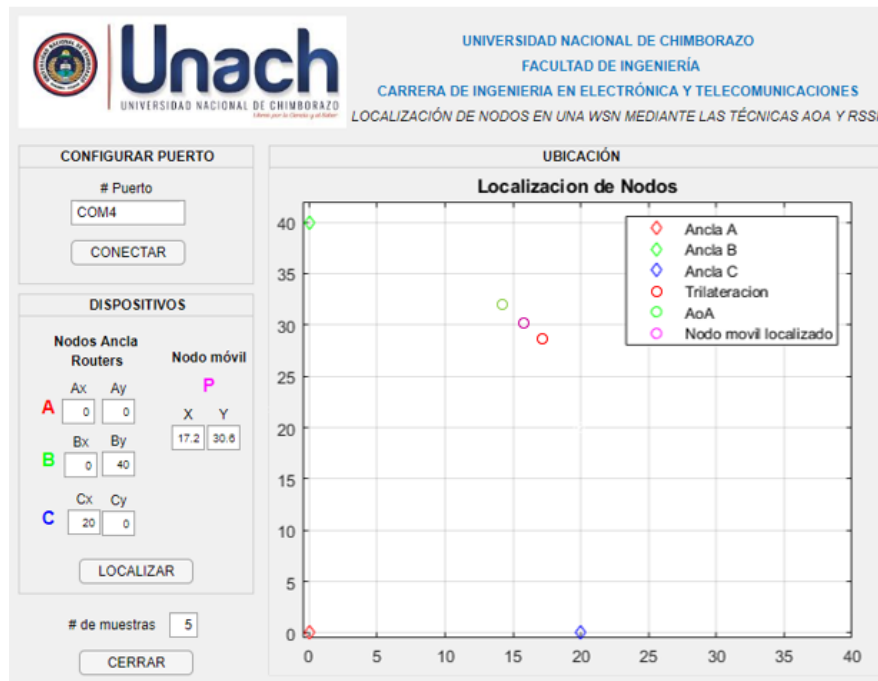


Figura 72 Posición 4 Calculada

Fuente: Autor



Figura 73 Posición 4

Fuente: Autor

Para analizar el comportamiento del algoritmo se procede a realizar el análisis estadístico como se muestra en la Tabla 25 tal como se hizo en la Tabla 21.

Tabla 25 Estimación de la precisión y exactitud en exteriores

Fuente: Autor

Nº de Muestras	Posición real	Posiciones estimadas	Media (\bar{x})	Desviación estándar muestral (s)	Error relativo	Error cuadrático medio
5	$P_1(5,5)$	$P_1(4.7,4.6)$ $P_1(5.1,4.9)$ $P_1(4.7,5.3)$ $P_1(4.9,5.0)$ $P_1(5.1,4.9)$	$P_1(4.9,4.94)$	$-S_X(0.49)$ $-S_Y(0.49)$	0.02	0.16
5	$P_2(10,10)$	$P_2(9,9.5)$ $P_2(9.7,9.4)$ $P_2(9.1,9.2)$ $P_2(9.4,10.1)$ $P_2(10.5,9.3)$	$P_2(9.54,9.5)$	$-S_X(1.6)$ $-S_Y(1.6)$	0.05	0.5
5	$P_3(15,15)$	$P_3(14.2,16.5)$ $P_3(15.6,14.8)$ $P_3(13.9,15.2)$ $P_3(14.5,14.7)$ $P_3(15.2,15.8)$	$P_3(14.68,15.4)$	$-S_X(1.54)$ $-S_Y(1.7)$	0.1	0.42
5	$P_4(20,40)$	$P_4(17.2,30.6)$ $P_4(19.7,25.4)$ $P_4(18.3,33.5)$ $P_4(15.2,38.6)$ $P_4(17.6,32.9)$	$P_4(17.6,32.2)$	$-S_X(4.7)$ $-S_Y(11.8)$	0.19	2.06

De acuerdo a los valores del error cuadrático medio podemos establecer que para las posiciones 1,2,3 son muy exactos por su acercamiento al valor de 0, mientras que para la posición 4 resultaron ser inexactas debido a que su valor supera la unidad, por consiguiente el máximo alcance del algoritmo estable 16 metros desde su punto de origen.

De acuerdo a la columna del error relativo de acuerdo a la Tabla 25 observamos que únicamente la posición 4 obtiene un porcentaje error del 19% lo que significa que se encuentra fuera del rango del error permisible dándonos valores no válidos, no obstante, las posiciones 1,2,3 obtuvieron un error igual o menor al 10% estableciéndose dentro del rango de error permisible concluyendo que los valores son correctos por lo que el algoritmo se consideran precisos a distancias menores a 16 metros.

CAPITULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se ha implementado una red de sensores inalámbricos basado en Zigbee el cual nos permitió aplicar la combinación de algoritmos de localización basados en AOA y RSSI con el fin de encontrar la ubicación de un nodo móvil, se concluye que los valores de posicionamiento del algoritmo tienen una tasa de error del 13% viéndose reducidos en ciertos casos de hasta el 9 % la posición real y la estimada. La relación entre la distancia y la potencia recibida (RSSI) no es clara de definir, varía dependiendo del escenario donde se instale el sistema por lo tanto requiere calibración, el sistema al emplear el valor RSSI para obtener las distancias es susceptible a errores debido a que cualquier obstáculo entre los dispositivos puede variar el valor del RSSI y alterar el resultado de manera drástica.
- Al estudiar los diferentes algoritmos de localización como se muestra en la Tabla 6 se determinó que las técnicas basadas en AOA y RSSI tienen sistema sencillo de implementar a una exactitud considerablemente buena con costos tanto computacionales como de hardware relativamente bajas en comparación a las demás técnicas, esto se obtiene gracias a que se requiere un mínimo de tres nodos anclas con posiciones conocidas para localizar al nodo móvil, con tal precedente, se seleccionaron dichas técnicas para combinarlas y lograr una mejor exactitud en comparación a las técnicas individuales.
- Se diseño una aplicación de usuario utilizando el Software MatLab el cual permite localizar los nodos móviles a partir de 3 nodos ancla mediante un sistema de coordenadas, dicha aplicación es de fácil uso, muy liviano y de código libre que puede ser instalado en cualquier computadora con sistema operativo Windows, para ejecutar dicha aplicación se necesita tener previamente instalado MatLab el cual le permitirá editarlo y ejecutarlo según las especificaciones de cada usuario.

- Los parámetros de desempeño cumplen un rol fundamental para conocer si el algoritmo de localización es confiable, para la investigación se presentan parámetros de desempeño bastante buenos en cuanto a la exactitud del algoritmo se evidencio un porcentaje de error del 9% en comparación al 10% de error que presentan los algoritmos de localización basadas en métricas de rango, en cuanto a la exactitud en ciertos casos se obtuvieron desviaciones de 0 valor que demuestra el alto índice de confiabilidad del algoritmo, además, los costos de hardware resultaron económicos en comparación a otros sistemas de localización que utilizan dispositivos y software especializados para dicha aplicación.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para evitar errores, se recomienda que los dispositivos anclas (Routers fijos) se coloque a una altura adecuada para evitar obstáculos entre el dispositivo ancla y el dispositivo móvil.
- Para hacer al sistema más robusto, se puede agregar un sin número de nodos ancla para mejorar la exactitud de la ubicación, sin embargo, incrementaría considerablemente los costos de implementación y el costo de hardware del proyecto.
- Para el despliegue de las WSN basados en ZigBee se recomienda realizarlo en interiores ya que las condiciones ambientales en el exterior afectan gravemente la medida del parámetro RSSI lo que conlleva a afectar gravemente la exactitud del algoritmo.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M. (2006). *Estudio del estándar IEEE 802.15.4 ZIGBEE para comunicaciones inalámbricas de área personal de bajo consumo de energía y su comparación en el estándar IEEE 802.15.1 BLUETOOTH*(Tesis de Pregrado). Quito-Ecuador. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/55>
- Americo, O. (2011). *Redes de Sensores*(Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires.
- Anup, P., & Takuro, S. (2017). Localization in Wireless Sensor Networks: A Survey on Algorithms, Measurement Techniques, Applications and Challenges. (I. d. Multidisciplinario, Ed.) *Sensor and Actuator Network*.
- Arduino. (2020). Obtenido de <https://arduino.cl/arduino-uno/>
- Bravo, B., & Belmuda, L. (2017). *Diseño de una red de sensores para el monitoreo del tránsito vehicular y la contaminación de CO2 dentro de un sector urbano* (Tesis de grado). UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALECIANA, CUENCA. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14153/1/UPS-CT006969.pdf>
- Coluccia, A., & Ricciato, F. (2014). RSS-Based Localization via Bayesian Ranging and Iterative Least Squares Positioning. *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS*, 873-876. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6787152>
- Copa, D., Carducci, L., & Rey, L. (2015). Técnicas de Refinamiento para Localización en Redes de Sensores Inalámbricas. *XVI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*, (pág. 6). Buenos Aires-Argentina.
- Crespo, E. (2020). *aprendiendoarduino*. Obtenido de <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/16/zigbeexbee/>
- Diana, A., & Santamaria, F. (2013). Estado del Arte de las redes de sensores inalambricos. *Tecnología, Investigacion y Academica*, 14.
- didacticaselectronicas. (2020). Obtenido de <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/zigbee/modulos/modulo-xbee-zb-s2c-3444-zigbee-inalambrico-wireless-digi-detail>
- Digi. (2020). XBee-PRO S2C Zigbee.

- Dignami, J. (2011). *Análisis del protocolo ZigBee*. Rio de la Plata, Argentina.
- Fernandez, R., Ordines, J., Martinez, F., Gonzales, A., & Alba, F. (2020). *Redes Inalambricas de Sensores: Teoria y aplicacion Practica*. Universidad de la Rioja.
- Flores, E. (2012). *Redes de Sensores Inalambricas aplicadas a la medicina (Tesis de Postgrado)*. . Universidad de Cantabria , Santander, España.
- Garcia, E. (2008). *Tecnicas de Localización en Redes de Sensores Inalambricos*.
- Haro, C. (2020). *DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA DETERMINAR LA POSICIÓN DE NODOS BASANDOSE EN RSSI EN UNA RED WSN (Tesis de Posgrado)*. Escuela Politécnica Nacional , Quito, Ecuador. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20735>
- Inga, R., & Pozo, E. (2019). *Diseño, desarrollo e Implementación de un operador WSN en la nube (Tesis de Pregrado)*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca., Cuenca,Ecuador.
- Kim, S., & Chong, J. (2017). A Novel TDOA-Based Localization Algorithm Using Asynchronous Base Stations. *Springer Science and Busines*.
- Li, G., Geng, E., Ye , Z., Xu, Y., Lin, J., & Pang, Y. (2018). Indoor Positioning Algorithm Based on the Improved RSSI Distance Model. *Sensor*.
- Lopez, J. (2015). *Evaluación de desempeño de algoritmos de localización a un salto en escenarios reales (Tesis de Pregrado)*. Instituto Tecnológico de Sonara, Sonora,Mexico. Obtenido de <https://www.itson.mx/oferta/mci/Documents/AlfredoTesis2.pdf>
- Lopez, J., Ruiz, E., Berumen, A., Gonzales , A., & Espinoza, A. (2016). *Comparación de Desempeño de Algoritmos de Localización en Escenarios Exteriores Reales*. Instituto Tecnológico de Sonora, Sonora,Mexico. Obtenido de <https://www.itson.mx/oferta/mci/Documents/AlfredoPublicacionv2.pdf>
- MacLean, S., & Datta, S. (04 de Noviembre de 2013). Reducing the Positional Error of Connectivity-Based Positioning Algorithms Through Cooperation Between Neighbor. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 1868 - 1882. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6654168>

- majju. (2020). Obtenido de <https://www.majju.com/product/xbee-adapter-xbee-explorer-usb-adapter-module-for-zigbee/>
- Mao, G., & Fidan, B. (2009). *Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks*. New York: Information Science Reference.
- Muñoz, C., & Molales, G. (2018). *Diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos para las condiciones ambientales físicas de un ambiente de trabajo industrial (Tesis de Pregrado)*. Universidad de Cauca, Cauca, Colombia.
- Nazir , U., Arshad, M., Shahid, N., & Raza, S. (2012). Classification of Localization Algorithms for Wireless Sensor Network: A Survey. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPEN SOURCE SYSTEMS AND TECHNOLOGIES*. doi:10.1109/ICOSST.2012.6472830
- Nguyen, T., Shin, Y., & Tuan, v. (Mayo de 2019). An Efficient Hybrid RSS-AoA Localization for 3D Wireless Sensor Networks. *Sensor*, 1-16. doi:<https://doi.org/10.3390/s19092121>
- Nuñez, S. (2009). *ESTUDIO DE TÉCNICAS DE MAPEO PARA LOCALIZACIÓN EN INTERIORES MEDIANTE REDES DE SENSORES CON TECNOLOGÍA UWB (Tesis de Pregrado)*. Universidad de Sevilla, Sevilla, España. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11815>
- Park, J., Lee, Y., & An, Y. (2010). Localization algorithm design and implementation to utilization RSSI and AOA of Zigbee. *IEEE Explorer*.
- Roca, D. (2012). *Diseño , Implementación y Validación de un Sistema de Localización Híbrido basado en una red de sensores inalámbricos (WSN)(Tesis de Pregrado)*. Universidad Autonoma de Barcelona, Barcelona, España.
- Rozadillas, L. (2017). *Evaluación de dispositivos UWB para localización en interiores con medidas de distancia(Tesis de pregrado)*. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Rueda, J., & Tabalera, J. (2017). Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora. *Revista Colombiana de computacion*, 58-74.
- Rugeles, J., & Leon, D. (2013). Técnicas de localización de nodos inalámbricos mediante redes de sensores. *Decimo Segunda Conferencia Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informatica*, (págs. 1-15). Bogota, Colombia.

- Salazar , J. (2020). *Redes Inalambricas*. Braga: TechPedia.
- Sparkfun Electronics. (2020). *Sparkfun.com*. Obtenido de <https://cdn.sparkfun.com/learn/materials/29/22AT%20Commands.pdf>
- Tomic, S., Beko, M., Dinis, R., & Bernardo, L. (9 de Abril de 2018). On Target Localization Using Combined RSS and AoA Measurements. *Sensor*. doi:<https://doi.org/10.3390/s18041266>
- Vera, C., Barbosa , J., & Pavon, D. (2017). La Tecnología ZigBee estudio de las características de la capa física. *Scientia et Technica Año XXII*, (págs. 238-245). Pereira, Colombia.
- Vera, C., Barbosa, J., & Pavon, D. (2015). Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO S2B ZB para medición de variables ambientales. *Tecnura*. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a11>
- Villalba, A. (2015). *Aplicación de una red inalámbrica de sensores para detección de presencia y conteo (Tesis de Postgrado)*. Universidad de Sevilla, Departamento de Teoría de Señal y Comunicaciones, Sevilla, España.
- Zigbee Alliance*. (27 de Junio de 2020). Obtenido de <https://zigbeealliance.org>

ANEXOS

Anexo 1

Código en arduino para la comunicación entre el módulo coordinador o móvil a la computadora.

```
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial Xbee(11,10);
char Data;
void RouterA();
void RouterB();
void RouterC();
void Dato_Xbee();
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Xbee.begin(9600);
  delay(1000);

}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  if (Serial.available(>0){
    Data=Serial.read();
    if (Data=='A'){
      digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
      RouterA();
      delay(150);
      Dato_Xbee();
    }
    if (Data=='B'){
      digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
      RouterB();
      delay(150);
    }
  }
}
```

```

    Dato_Xbee();
}
if (Data=='C'){
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    RouterC();
    delay(150);
    Dato_Xbee();
}
}
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
//*****FIN PROGRAMA*****
}
//*****
//Funciones
void Dato_Xbee(){
    if (Xbee.available()){
        Data=Xbee.read();
        Serial.print(Data,HEX);
        Serial.print(",");
        if(Data==0x7E){
            for (int i=0;i<19;i++){
                Data=Xbee.read();
                Serial.print(Data,HEX);
                Serial.print(",");
            }
            Serial.println();
        }
    }
}
}
void RouterA(){
    Serial.print("A,");
    Xbee.write(0x7E);
    Xbee.write((byte)0x0);
    Xbee.write(0x0F);
    Xbee.write(0x17);
    Xbee.write(0x01);
    Xbee.write((byte)0x0);
}
}

```

```

Xbee.write(0x13);
Xbee.write(0xA2);
Xbee.write((byte)0x0);
Xbee.write(0x41);
Xbee.write(0x9B);
Xbee.write(0x4D);
Xbee.write(0xED);
Xbee.write(0xFF);
Xbee.write(0xFE);
Xbee.write(0x02);
Xbee.write(0x44);
Xbee.write(0x42);
Xbee.write(0x97);
}
void RouterB(){
  Serial.print("B,");
  Xbee.write(0x7E);
  Xbee.write((byte)0x0);
  Xbee.write(0x0F);
  Xbee.write(0x17);
  Xbee.write(0x01);
  Xbee.write((byte)0x0);
  Xbee.write(0x13);
  Xbee.write(0xA2);
  Xbee.write((byte)0x0);
  Xbee.write(0x41);
  Xbee.write(0x91);
  Xbee.write(0xB7);
  Xbee.write(0x2A);
  Xbee.write(0xFF);
  Xbee.write(0xFE);
  Xbee.write(0x02);
  Xbee.write(0x44);
  Xbee.write(0x42);
  Xbee.write(0xFA);
}
void RouterC(){

```

```

Serial.print("C,");
Xbee.write(0x7E);
Xbee.write((byte)0x0);
Xbee.write(0x0F);
Xbee.write(0x17);
Xbee.write(0x01);
Xbee.write((byte)0x0);
Xbee.write(0x13);
Xbee.write(0xA2);
Xbee.write((byte)0x0);
Xbee.write(0x41);
Xbee.write(0x9B);
Xbee.write(0x51);
Xbee.write(0xD4);
Xbee.write(0xFF);
Xbee.write(0xFE);
Xbee.write(0x02);
Xbee.write(0x44);
Xbee.write(0x42);
Xbee.write(0xAC);
}

```

Anexo 2

Código en Matlab para medir las distancias entre los nodos ancla y el nodo móvil

Medición de distancia en el nodo A

```

clear all;
clc;

K=34;
n=1.8;
s = serialport("COM4",9600,"Timeout",1);
configureTerminator(s,"CR/LF");
flush(s);
disp('Inicio');
writeline(s,"B");
pause(2)

```



```

for i=1:5
    disp('Distancia al router A en metros');
    writeline(s,"A");%Solicitar Valor Xbee
    pause(0.2)
    data = readline(s);%Recibir Dato Xbee
    Trama = strsplit(data,',');%Separar la Trama
    DB_A=Trama(20);%Seleccionar valor DB
    A=hex2dec(DB_A);%Convertir a Decimal
    d1=10^((A-K)/(10*n));%Obtener la Distancia desde Xbee A hasta PC
    pause(0.1);
    disp(d1);
    pause(0.5);
end
flush(s);
clear s;

```

Medición de distancia en el nodo B

```

clear all;
clc;

K=32;
n=1.8;
s = serialport("COM4",9600,"Timeout",1);
configureTerminator(s,"CR/LF");
flush(s);
disp('Inicio');
writeline(s,"B");
pause(2)
for i=1:5
    disp('Distancia al router B en metros');
    writeline(s,"B");%Solicitar Valor Xbee
    pause(0.5)
    data = readline(s);%Recibir Dato Xbee
    Trama = strsplit(data,',');%Separar la Trama
    DB_B=Trama(20);%Seleccionar valor DB
    B=hex2dec(DB_B);%Convertir a Decimal

```

```

d2=10^((B-K)/(10*n));%Obtener la Distancia desde Xbee A hasta PC
pause(0.2);
disp(d2);
pause(0.5);
end
flush(s);
clear s;

```

Medición de distancia en el nodo C

```

clear;
clc;

K=37;
n=1.8;
s = serialport("COM4",9600,"Timeout",1);
configureTerminator(s,"CR/LF");
flush(s);
disp('Inicio');
writeline(s,"C");
pause(2)
for i=1:5
    disp('Distancia al router C en metros');
    writeline(s,"C");%Solicitar Valor Xbee
    pause(0.5)
    data = readline(s);%Recibir Dato Xbee
    Trama = strsplit(data,',');%Separar la Trama
    DB_C=Trama(20);%Seleccionar valor DB
    C=hex2dec(DB_C);%Convertir a Decimal
    d3=10^((C-K)/(10*n));%Obtener la Distancia desde Xbee A hasta PC
    pause(0.2);
    disp(d3);
    pause(0.5);
end
flush(s);
clear s;

```

Anexo 3

Programa para la localización

```
clear all;
clc;

K=32;
n=1.8;
x1=0; y1=0;
x2=0; y2=2.6;
x3=2.2; y3=2.6;
Xx=0; Yy=0;
XX=0; YY=0;
X=0; Y=0;

s = serialport("COM4",9600,"Timeout",1);
configureTerminator(s,"CR/LF");
flush(s);
disp('Inicio');
writeline(s,"A");
pause(2)
for i=1:5
    G=plot(X,Y,'ow');
    H=plot(Xx,Yy,'ow');
    I=plot(XX,YY,'ow');
    %disp('Router A');
    writeline(s,"A");%Solicitar Valor Xbee
    pause(0.5)
    data = readline(s);%Recibir Dato Xbee
    Trama = strsplit(data,',');%Separar la Trama
    DB_A=Trama(20);%Seleccionar valor DB
    A=hex2dec(DB_A);%Convertir a Decimal
    d1=10^((A-K)/(10*n));%Obtener la Distancia desde Xbee A hasta PC
    pause(0.2);
    %disp(d1);
    % *****
% disp('Router B');
```

```

writeline(s,"B");%Solicitar Valor Xbee
pause(0.5)
data = readline(s);%Recibir Dato Xbee
Trama = strsplit(data,',');%Separar la Trama
DB_B=Trama(20);%Seleccionar valor DB
B=hex2dec(DB_B);%Convertir a Decimal
d2=10^((B-K)/(10*n));%Obtener la Distancia desde Xbee A hasta PC
pause(0.2);
% disp(d2);
% *****
% disp('Router C');
% writeline(s,"C");%Solicitar Valor Xbee
% pause(0.5)
% data = readline(s);%Recibir Dato Xbee
% Trama = strsplit(data,',');%Separar la Trama
% DB_C=Trama(20);%Seleccionar valor DB
% C=hex2dec(DB_C);%Convertir a Decimal
% d3=10^((C-K)/(10*n));
% pause(0.1);
% disp(d3);
% *****Metodo Trilateracion*****
Yy=abs((d1^2-d2^2+y2^2)/(2*y2));
Xx=abs(sqrt(d1^2-Yy^2));
% *****Metodo AoA*****
theta=acosd((d2^2-d1^2-y2^2)/(-2*d1*y2));
XX=abs(d1*sin(theta));
YY=abs(d1*cos(theta));
% *****Valor promedio*****
disp('Posicion del nodo movil en el plano x,y');
X=(XX+Xx)/2
Y=(YY+Yy)/2
axis([-0.5 5 -0.5 3]);
hold on
title('Localizacion de Nodos');
A=plot(x1,y1,'dr');
B=plot(x2,y2,'dg');
C=plot(x3,y3,'db');

```

```
D=plot(Xx, Yy, 'or');
E=plot(XX, YY, 'og');
F=plot(X, Y, 'om');
legend([A,B,C,D,E,F], 'Ancla A', 'Ancla B', 'Ancla C', 'Trilateracion', 'AoA', 'Nodo movil
localizado');
drawnow;
grid on;
pause(0.5);
end
flush(s);
clear s;
```