

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE
LOCALIZACIÓN PARA DISTANCIAS CORTAS UTILIZANDO REDES
INALÁMBRICAS DE SENSORES.

JHON MAURICIO NOGUERA JIMENEZ
JUAN CAMILO VÉLEZ MUÑOZ

UNIDAD CENTRAL DEL VALLE DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA Y DE SISTEMAS
TULUA, VALLE
2019

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE
LOCALIZACIÓN PARA DISTANCIAS CORTAS UTILIZANDO REDES
INALÁMBRICAS DE SENSORES.

JHON MAURICIO NOGUERA JIMENEZ
JUAN CAMILO VÉLEZ MUÑOZ

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRONICO E
INGNEIERO DE SISTEMAS

DIRECTOR
IVÁN DARÍO ARISTIZABAL
INGENIERO ELECTRONICO

UNIDAD CENTRAL DEL VALLE DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA Y DE SISTEMAS
TULUA, VALLE
2019

Nota de aceptación

El trabajo de grado DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE LOCALIZACIÓN PARA DISTANCIAS CORTAS UTILIZANDO REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES elaborado por los estudiantes JHON MAURICIO NOGUERA JIMENEZ Y JUAN CAMILO VELEZ MUÑOZ cumple con los requisitos exigidos por la UNIDAD CENTRAL DEL VALLE DEL CAUCA UCEVA PARA OPTAR POR LOS TITULOS DE INGENIERO ELECTRONICO E INGENIERO DE SISTEMAS.

Firma presidente del jurado

Firma jurado

Firma jurado

Tuluá, Valle del Cauca, _____ de 2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado especialmente a mis padres, quienes han sido fundamentales en toda mi vida con sus grandes consejos, apoyo incondicional y empeño por brindarme una buena calidad de vida, que también fueron partícipes de todo mi proceso como estudiante y me verán (uno desde el cielo) por fin convertirme en un profesional.

A mi esposa por darme las fuerzas para lograr esta meta en mi vida y enseñarme a soñar todos los días.

A DIOS por brindarme la oportunidad de querer ser siempre una persona de bien y darme la bendición de estudiar y terminar con éxito el principio de mis títulos.

A mis hermanos por el acompañamiento constante y la atención brindada cuando lo necesite.

A mi compañero que gracias a nuestro gran trabajo en equipo y apoyo a lo largo de estos años lo hemos logrado.

Juan Camilo Velez Muñoz.

DEDICATORIA

A mis padres, por estar conmigo en todo momento, por brindarme apoyo durante mi crecimiento como profesional y como persona, por ser las bases que me impulsan a estar donde estoy.

A mis hermanos, por las grandes enseñanzas que me han dado, y me han ayudado en todos los momentos difíciles de mi vida.

A mi compañero de trabajo de grado, que con sus conocimientos brindo los aportes útiles para lograr culminar este proyecto.

Jhon Mauricio Noguera Jiménez.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo expresan su agradecimiento al asesor de este trabajo de grado al Ingeniero Iván Darío Aristizabal por su gran acompañamiento y motivación como guía en este proyecto.

A todos los docentes que durante nuestro proceso estudiantil ayudaron a lograr este título con su gran conocimiento, enseñanzas y dedicación para formar profesionales íntegros y de buena calidad.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag
INTRODUCCION	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.1 FORMULACION DEL PROBLEMA	22
1.2 ALCANCE	22
2. OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo general	23
2.2 Objetivos específicos	23
3. JUSTIFICACIÓN	24
4. DISEÑO METODOLOGICO	26
5. REDES INALAMBRICAS DE SENSORES	30
5.1 Administración de la energía de las WSN	32
5.2 Tecnologías de las redes inalámbricas de sensores.	32
5.3 Modos de operación de las redes inalámbricas de sensores bajo el estándar IEEE 802.15.4 ZigBee.	35
5.4 TOPOLOGIAS PARA LAS REDES INALAMBRICAS DE SENSORES.	38
5.4.1 Topología en estrella:	38
5.4.2 Topología en malla:	39
6. SISTEMAS DE LOCALIZACION	41
6.1 Técnicas de localización	41
6.1.1 Tiempo de llegada	41
6.1.2 Diferencia en el tiempo de llegada	42

6.1.3	ANGULO DE LLEGADA	43
6.1.4	Potencia de la señal recibida	44
6.1.5	Triangulación	47
6.1.6	Multilateración	48
6.1.7	Trilateración	48
7.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE LOCALIZACION EN LAS REDES INALAMBRICAS DE SENSORES	51
7.1	Simuladores de redes inalámbricas de sensores	51
7.1.1	J-SIM	52
7.1.2	GloMoSim	52
7.1.3	OMNeT++	52
7.1.4	TrueTime:	53
8.	SIMULACIÓN DEL ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN BAJO LA TECNOLOGÍA DE REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES	55
8.1	Uso de Matlab y Truetime en la simulación de la red inalámbrica de sensores y el algoritmo de trilateración.	55
8.2	TrueTime Wireless Network	56
8.3	Truetime Battery	57
8.4	Protocolo IEEE 802.15.4 (ZigBee) en TrueTime.	57
8.5	Diseño De La Red Prototipo De Localización En Truetime	58
		60
8.6	Simulación De La Red En Truetime	61
8.6.1	Configuración de los parámetros de la red	62
8.6.2	Superficie de localización	63
8.7	Funcionamiento de la red	66

8.8	Funcionalidad de cada nodo en la red de localización.	67
8.8.1	Nodo móvil (nodo desconocido).	67
8.8.2	Bases estáticas BS1, BS2 y BS3	69
8.8.3	Nodo coordinador	75
8.8.4	Algoritmo de trilateración en truetime	76
8.9	Resultados de la simulación del algoritmo de trilateración en truetime.	81
9.	IMPLEMENTACIÓN DE LA RED PROTOTIPO DE LOCALIZACIÓN UTILIZANDO REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES	88
9.1	Características generales de la red de localización.	88
9.2	Configuración de los dispositivos por medio del software XCTU	89
9.2.1	Nodo coordinador	91
9.2.2	Bases estáticas y nodo móvil	92
9.3	Comunicación de los nodos en la red.	94
9.4	Toma de datos del indicador de la potencia de la señal recibida (RSSI)	99
9.5	Graficas potencia (RSSI) vs distancia modelos logarítmicos, polinomial y potencial.	104
10.	RESULTADOS PROTOTIPO FINAL	116
10.1	Resultados para diferentes coordenadas de nodo móvil.	119
10.1.1	Resultados superficie de 200 metros cuadrados	121
10.1.2	Resultados superficie de 450 metros cuadrados	123
10.1.3	Resultados superficie de 800 metros cuadrados.	124
11.	RECOMENDACIONES	132
12.	CONCLUSIONES	133
	BIBLIOGRAFIA	135

LISTA DE IMÁGENES

Figura 1 Microcontrolador	31
Figura 2 ZigBee vs Wi-fi vs Bluetooth	34
Figura 3 Modo AT (TRANSPARENTE)	36
Figura 4 Modo API	37
Figura 5 Topología en estrella	39
Figura 6 Topología en malla	40
Figura 7 Localización utilizando tiempo de llegada.	42
Figura 8 Localización utilizando diferencia en el tiempo de llegada	43
Figura 9 Localización utilizando Angulo de llegada	44
Figura 10 Valor de potencia con RSSI con respecto a distancia en metros	46
Figura 11 Técnica de triangulación	48
Figura 12 Técnica de trilateración	49
Figura 13. Bloques de red en truetime.	56
Figura 14 Red inalámbrica de localización.	59
Figura 15. Red de localización en el software TrueTime	61
Figura 16. Configuración de los parámetros para la simulación de la red de localización	63
Figura 17. Área de localización.	64
Figura 18. Distribución de coordenadas de los nodos en la red de localización.	65
Figura 19. Diseño de la red de localización en el software TrueTime.	66
Figura 20. Comunicación del nodo móvil con las bases estáticas.	67
Figura 21. Bloque en TrueTime para la simulación del nodo móvil.	68
Figura 22. Algoritmo encargado de simular el comportamiento de nodo móvil.	69
Figura 23. Bloque en TrueTime para la simulación de las bases estáticas.	69
Figura 24. Algoritmo encargado de simular el comportamiento de la base estática 1.	71
Figura 25. Relación distancia potencia simulador TrueTime.	73

Figura 26. Relación de los radios de comunicación entre el nodo móvil y las bases estáticas.	74
Figura 27. Comunicación bases estáticas con el nodo coordinador.	75
Figura 28. Bloque de simulación para el nodo coordinador.	76
Figura 29. Elementos principales en el algoritmo de trilateración.	77
Figura 30. Algoritmo avanzado de trilateración.	79
Figura 31. Simulación 1, coordenadas del nodo móvil (33,60)	82
Figura 32. Resultados del algoritmo de trilateración para la coordenada (33,60)	82
Figura 33. Simulación 2, coordenadas del nodo móvil (87,46)	83
Figura 34. Resultados del algoritmo de trilateración para la coordenada (87,46)	83
Figura 35. Bloques <i>Uniform Random Number</i> de Simulink para generar un movimiento aleatorio del nodo móvil.	84
Figura 36. Representación gráfica de la simulación número 3.	85
Figura 37. Movimiento del nodo móvil y su relación entre las coordenadas reales y la simulación en Truetime	87
Figura 38. Módulos XBee PRO S2B con conector para antena externa RPSMA y antena incorporada.	89
Figura 39. placa de interfaz – XBee.	90
Figura 40. Configuración de parámetros para el nodo coordinador.	91
Figura 41. Configuración de parámetros para las bases estáticas y el nodo móvil.	93
Figura 42. Comunicación de los nodos que conforman la red de localización.	94
Figura 43. Distribución real de la red de localización.	95
Figura 44. Comando remoto AT-DB para obtener el valor RSSI.	97
Figura 45. Generador de tramas API para obtener el valor RSSI.	98
Figura 46. Medición del valor RSSI 1 metro de distancia.	100
Figura 47. Medición del valor RSSI 5 metros de distancia.	101
Figura 48. Transmisión y recepción de tramas en el nodo móvil.	102
Figura 49. Relación potencia distancia.	104
Figura 50. Modelo logarítmico para la aproximación de la potencia promedio.	105

Figura 51. Modelo polinomial de grado 2 para la aproximación de la potencia promedio.	105
Figura 52. Modelo potencial para la aproximación de la potencia promedio.	106
Figura 53. Tasa relativa de la potencia con respecto a la distancia.	110
Figura 54. Comparación modelos real, aproximado e ideal.	115
Figura 55. Estructura para los nodos de la red de localización.	116
Figura 56. Secuencia de transmisión y recepción de los valores RSSI en la red de localización.	117
Figura 57. Interfaz gráfica desarrollada en el software Matlab.	119
Figura 58. Superficies de localización	120
Figura 59. Resultados algoritmo de trilateración para un área de 200 m^2 .	122
Figura 60. Resultados algoritmo de trilateración para un área de 450 m^2 .	124
Figura 61. Resultados algoritmo de trilateración para un área de 800 m^2 .	125
Figura 62. Resultados sistema de localización para un área de 200 metros cuadrados, coordenada real (10,0).	127
Figura 63. Resultados sistema de localización para un área de 450 metros cuadrados, coordenada real (15,0).	128

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Actividades alcanzadas para el trabajo de grado	27
Tabla 1 Mediciones distancia y potencia en el software Truetime.	72
Tabla 2 Resultados de la simulación para diferentes coordenadas del nodo móvil.	86
Tabla 3 Relación entre la distancia y la potencia del último mensaje recibido (RSSI)	103
Tabla 4 Comparación de los errores reales en la medición de la potencia con los modelos logarítmicos, polinomial y potencial.	107
Tabla 5 Cálculo de la tasa relativa de la potencia promedio en función de la distancia.	109
Tabla 6 Relación entre la distancia y la potencia del último mensaje recibido (RSSI)	114
Tabla 7. Coordenadas del nodo móvil y las bases estáticas para cada una de las superficies	120
Tabla 8 Resultados de la red de localización para la superficie de 200 m^2 .	121
Tabla 9 Error real de la coordenada del nodo móvil en una superficie de 200 m^2 .	123
Tabla 10 Resultados de la coordenada del nodo móvil superficie de 450 m^2 .	123
Tabla 11 Resultados de la coordenada del nodo móvil superficie de 800 m^2 .	124
Tabla 12. Error real de la coordenada del nodo móvil en una superficie de 800 m^2 .	125

TITULO

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE LOCALIZACIÓN PARA DISTANCIAS CORTAS UTILIZANDO REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES.

RESUMEN

Con el desarrollo de las tecnologías de redes inalámbricas de sensores, se han logrado suplir diferentes necesidades, avanzando en un campo sin límite para sorprender a un mercado mundial, llenando expectativas de sus compradores, de dichas compañías encargadas de su fabricación, y dando pie a estudiantes y profesionales en interesarse por la investigación en busca de nuevas aplicabilidades de las existentes y nuevas maneras de realizar tareas básicas y otras más complejas.

Cada paso que da este proyecto, es en busca de lo anterior, y de dar posibilidades de un proyecto novedoso, asequible y de buena escalabilidad, construyendo un prototipo base que se pueda adaptar a nuevos requerimientos de otros usuarios, y hasta estudiantes que deseen continuar con esta área en la elaboración de un proyecto de grado.

Es para resaltar de este trabajo de ingenierías diferentes (Ingeniería electrónica e ingeniería de sistemas), al poder adaptar un proyecto de acuerdo a necesidades distintas, y el valioso acompañamiento de un semillero, brindando recursos, información y tutorías para poder avanzar con éxito en este camino de investigación.

SUMMARY

With the development of wireless sensor network technologies, different needs have been met, advancing in an unlimited field to surprise a world market, filling expectations of its buyers, of said companies responsible for its manufacture, and giving rise to students and professionals interested in research in search of new applications of existing ones and new ways to perform basic and more complex tasks.

Each step that this project takes, is in search of the above, and to give possibilities of a new, affordable and good scalability project, building a base prototype that can be adapted to new requirements of other users, and even students who wish to continue with this area in the elaboration of a degree project.

It is to highlight this work of different engineering (electronic engineering and systems engineering), being able to adapt a project according to different needs, and the valuable accompaniment of a seedbed, providing resources, information and tutorials to be able to advance successfully in this research path

INTRODUCCION

Este proyecto nace a través de una investigación realizada en el semillero de la UCEVA GIGAE3D, de la necesidad de diseñar un sistema de redes de sensores inalámbricas capaz de interpretar un sistema de localización ideal para monitorear y ubicar un objeto en un campo determinado, dejando como objetivo principal de este proyecto, la búsqueda de la mejor adaptabilidad entre un sistema de localización y Wireless Sensor Network (WSN) o Redes Inalámbricas de Sensores, tomando como punto de partida una gran escalabilidad y las puertas abiertas para investigaciones y modificaciones futuras. Por otro lado, y no menos importante estará el diseño y prototipo de dicho sistema integrado, capaz de localizar objetos en un campo abierto.

Para alcanzar dicho objetivo se trazaron cuatro acciones a realizar: 1) Revisar el estado de arte sobre las técnicas de localización basadas en cálculo de distancias basado en redes inalámbricas de sensores para redes de área local con el fin de comparar diferentes técnicas, y escoger la más adecuada, al mismo tiempo analizar qué tipo de WSN existen, y elegir el más apropiado. 2) Diseño de la red inalámbrica de sensores basado en las condiciones de la red inalámbrica escogida y el algoritmo seleccionado. 3) Implementar la red inalámbrica de sensores elegida y el algoritmo seleccionado.

Como resultado de la acción uno, se encuentran varias técnicas de localización, y los algoritmos que se utilizan en ellas. Se encontraron técnicas basadas en el tiempo de llegada, ángulo de llegada, la potencia de señal recibida o Received Signal Strength Indicator (RSSI), y se encuentra entre los algoritmos analizados, que el algoritmo de trilateración cumple con los requerimientos para ser utilizado en el proyecto. También se identifica la tecnología ZigBee como la red de sensores inalámbrica más adecuada para adaptar el modelamiento de dicho algoritmo, destacándose entre otras tecnologías como la Wi-Fi y Bluetooth.

Como resultados de las acciones tres y cuatro se modela el algoritmo de trilateración, basado en las técnicas de la potencia de señal recibida en Matlab apoyado con el FrameWork TrueTime para el diseño y configuración de la red inalámbrica de sensores.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el desarrollo de las tecnologías electrónicas digitales y telemáticas, entre ellas el Internet de las Cosas, en inglés la sigla (IoT), se ha presentado la oportunidad de dar solución a una problemática que abarca diferentes campos de aplicación, y que tiene como componente principal la necesidad de rastrear, monitorear y localizar diferentes objetos, animales o personas con el fin de llevar un control de la ubicación y el desplazamiento de estos individuos u objetos. Entre los diferentes campos de aplicación que poseen esta problemática se encuentran:

El campo de la salud, en donde se encuentran casas o centros de cuidado de personas de la tercera edad con diferentes enfermedades, que no les permite valerse por sus propias fuerzas, y con la necesidad de saber en tiempo real su ubicación y así poder conocer los niveles vitales básicos de temperatura, presión y oxigenación que se van debilitando y requieren de una atención urgente para solucionar una emergencia.

Otro campo de aplicación es el de la agricultura, donde es común la llegada de plagas que alteran los niveles de crecimiento o desarrollo de las plantaciones, por lo tanto, se ve la necesidad de tener un constante monitoreo del progreso que tienen estas plantas y su ubicación en un área geográfica con el fin de poder actuar lo más rápido posible.

En el campo de la producción animal, que abarca el sector avícola, el ganado vacuno o bovino, el ganado porcino, el ganado ovino y otras especies, se ve la necesidad de mantenerlas totalmente monitoreadas, puesto que el deterioro de un solo espécimen, puede significar la pérdida de un gran número de ellas, lo que afecta directamente las ganancias y la producción. En estas mismas especies se puede presentar fácilmente la pérdida o el robo de estos animales, por lo tanto, la

ubicación de los mismos se convierte en una variable que se debe monitorear constantemente, para que no se afecten los ingresos.

Estos ejemplos son una muestra de la necesidad de llevar un monitoreo parcial o total de diferentes objetos o especies en un entorno. Es por esto que se buscan alternativas tecnológicas que permitan resolver estas necesidades puntuales, las cuales irán siendo identificadas de acuerdo al contexto donde se encuentren. Por lo anterior se utilizan sistemas de localización basados en redes inalámbricas de sensores con la construcción de un prototipo que es capaz de localizar en tiempo real dispositivos, objetos, animales o personas en una distancia predeterminada. En la actualidad para lograr esto existen tecnologías que tienen la capacidad de cubrir todas estas problemáticas a costos elevados, debido a que las tecnologías que se conocen hoy por hoy de monitoreo, requieren equipos tecnológicos avanzados de muy alto costo.

Con el desarrollo del proyecto se pretende equilibrar la relación efectividad-escalabilidad y costo económico para poder contrarrestar los inconvenientes antes mencionados de una manera más conveniente, con los beneficios de la escalabilidad y el bajo costo, utilizando la menor cantidad de hardware y software y suprimiendo a la necesidad de utilizar tecnologías cableadas. Es así como surge un proyecto prototipo para localización de objetos o animales basado en la unión de los conocimientos y campos de dos ingenierías (Ingeniería de sistemas e Ingeniería Electrónica), además de incentivar la parte investigativa de cada ingeniería involucrada con el fin de cumplir los objetivos planteados.

1.1 FORMULACION DEL PROBLEMA

De acuerdo a lo planteado anteriormente, la pregunta que guía este trabajo es: ¿Cómo lograr la exitosa implementación de un sistema de localización y las redes de sensores inalámbricas con el fin de crear un prototipo basado en distancias cortas para la demostración de dicha unificación de tecnologías?

1.2 ALCANCE

El proyecto se realiza bajo la sinergia de los conocimientos entre dos ingenierías, combinando búsquedas a nivel de software y hardware que se adapten de la mejor manera para conseguir los objetivos principales del proyecto, queriendo resolver una problemática evidente, la cual es la localización de un objeto en un contexto determinado. Es por este motivo que se utilizará software licenciado en combinación con software libre para modelar un algoritmo matemático, para programar los dispositivos hardware de la red inalámbrica de sensores y así poder adaptar el hardware según lo necesitado. Para alcanzar esto se realizarán diferentes actividades que permitan alcanzar los objetivos del proyecto. Para alcanzar esto se parte del estudio de diferentes alternativas tecnológicas y telemáticas que permitan el diseño de una red autónoma, también se estudiarán diferentes procedimientos matemáticos que puedan ser utilizados como sistemas de localización en redes inalámbricas de sensores. Seguidamente se modelará el sistema bajo una herramienta software, que luego será programado en los equipos utilizados para el proyecto. También se tendrá una interfaz de software básica que permitirá el fácil entendimiento de las tareas y actividades realizadas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

DISEÑAR E IMPLEMENTAR UN SISTEMA PROTOTIPO DE LOCALIZACIÓN BASADO EN EL CALCULO DE DISTANCIAS UTILIZANDO REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES.

2.2 Objetivos específicos

- Revisar el estado de arte sobre las redes inalámbricas de sensores y los sistemas de localización en dos dimensiones, con el fin de comparar diferentes técnicas y escoger la más adecuada.
- Diseñar y simular la red inalámbrica de sensores basada en las condiciones de la red inalámbrica escogida y el algoritmo de localización seleccionado.
- Implementar el sistema prototipo de localización utilizando una red inalámbrica de sensores ZigBee.
- Realizar pruebas o correcciones a la red inalámbrica de sensores con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del algoritmo de localización.

3. JUSTIFICACIÓN

El mundo ha ido evolucionando tecnológicamente de una manera creciente, lo que antes se realizaba de forma manual, intuitiva y rudimentaria, se ha ido reemplazando con el uso de herramientas tecnológicas que permiten realizar estas actividades de una manera más rápida y eficaz. El uso de nuevas tecnologías ha generado un gran impacto positivo en la sociedad, es así como las redes inalámbricas de sensores, permiten realizar tareas simultáneas como rastrear, localizar, monitorear y brindar alarmas para eventualidades presentadas en un proceso determinado.

El gran potencial que posee las redes inalámbricas de sensores, en donde se tiene como características principales gran escalabilidad, fácil configuración, ahorro de energía y bajos costos. Con el uso de estas redes inalámbricas de sensores se propone un proyecto que permite localizar en tiempo real objetos o animales, utilizando todo el potencial que esta tecnología ofrece, además de brindar bajos costos y una gran escalabilidad que es necesaria para un proyecto que incursiona en un ámbito tecnológico que va creciendo cada día. Con este proyecto se alcanzan las competencias para simular redes inalámbricas de sensores utilizando software de libre distribución como NS-2, Truetime y omnet++, los cuales son utilizados en diferentes proyectos de investigación en prestigiosas universidades a nivel mundial, estas simulaciones también permiten comparar los resultados con los resultados en la implementación hardware del proyecto y así poder encontrar el grado de aproximación del modelo simulado y el modelo aplicado realmente.

Con este proyecto se crea un prototipo de sistema de localización utilizando las redes de sensores inalámbricas, que permite escalar desde una pequeña red a una gran red inalámbrica de sensores con las características de poder monitorear, localizar, y rastrear diferentes objetos, animales o personas en ambientes de campo

abierto, utilizando un algoritmo matemático que mediante la obtención de datos controlando la potencia se logra la localización aproximada de dicho ente, a un bajo costo, con bajo consumo de energía y el uso de poco hardware para su implementación.

4. DISEÑO METODOLOGICO

Teniendo en cuenta los factores estructurales de la investigación a desarrollar a fin de cumplir con los objetivos propuestos se realizará un método de investigación cualitativa en el objetivo específico número uno, debido a que se basa únicamente en la investigación del estado del arte de las redes inalámbricas de sensores y los sistemas de localización, dando pie para elegir las mejores opciones para el éxito del proyecto.

Según el libro de “metodología de la investigación de Roberto Hernández Sampieri & Calos Fernández Callado & Pilar Baptista Lucio.¹ El tipo de estudio cualitativo permitirá la recolección y el análisis de los datos, y así poder concluir que red inalámbrica de sensores y que sistema de localización serán los más adecuados para pasar al desarrollo de los siguientes objetivos del proyecto.

Para los objetivos específicos número dos, tres y cuatro, se realizará un método de investigación cuantitativa, la cual está basada en objetivos, en donde se realizan pruebas empíricas para así obtener resultados y posteriormente sacar conclusiones. Según el libro de “metodología de la investigación de Roberto Hernández Sampieri & Calos Fernández Callado & Pilar Baptista Lucio.²

El tipo de estudio cuantitativo permitirá proponer una alternativa de solución a la problemática presentada mediante el diseño y la implementación de un sistema prototipo de localización utilizando redes inalámbricas de sensores.

Esto implica explorar las diferentes técnicas de localización, describiendo sus características de funcionamiento, de igual manera explorar las redes inalámbricas de sensores aplicadas a los sistemas de localización y explicar la

¹ HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNANDEZ COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Metodología de la investigación ed 6. Disponible en. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>

² HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNANDEZ COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Metodología de la investigación ed 6. Disponible en. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>

ventaja que tiene la tecnología seleccionada frente a las que se utilizan en la actualidad.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación se pretende diseñar e implementar un sistema prototipo de localización con una perspectiva de ampliación para la monitorización de ganado bovino en ganadería extensiva.

Tabla 1 Actividades alcanzadas para el trabajo de grado

No.	Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
1	Realizar el estado del arte de las tecnologías actuales que se han desarrollado en este campo.	X					
1.1	Revisión bibliográfica sobre sistemas de localización, redes de sensores inalámbricos y la posición ganadera en el país.	X					
1.2	Revisar propuestas de universidades y empresas en Colombia		X				

	relacionadas en Colombia.						
2	Elegir la tecnología adecuada para la elaboración del prototipo de acuerdo a la revisión del estado del arte.		X				
2.1	Resumir las diferentes tecnologías que se utilizan según el estado del arte			X			
2.2	Analizar y comparar las diferentes tecnologías			X			
2.3	Escoger la tecnología que vamos a utilizar en el proyecto			X			
3	Realizar las implementaciones correspondientes para el funcionamiento del prototipo desarrollado				X		

3.1	Implementación de las redes de sensores, y circuitos eléctricos					X	
4	Realizar pruebas a la red implementada					X	
5	Análisis y conclusiones						X

5. REDES INALAMBRICAS DE SENSORES

Las redes inalámbricas de sensores serán unas palabras nombradas a lo largo del documento, las cuales vamos a definir con las siglas (WSN), por su definición en inglés “Wireless sensor network”. Estas se definen según Chio Cho Nayibe, Diego³, entre otros, como sistema de red inalámbrica diseñada entre varios dispositivos ubicados en un campo determinado, los cuales mediante diferentes sensores son capaces de medir diversos entornos como la temperatura, movimiento, entre otros. Teniendo en cuenta su definición y el auge que se está presentando en este tipo de tecnologías, en diferentes campos, como el automotriz, las construcciones, el monitoreo ambiental, rastreo de objetos, entre otros, se puede decir que se está tratando con tecnología de punta que se puede prestar para proyectos a pequeña y gran escala.

Dicha red de sensores está compuesta por dos simples actuadores que se definen de la siguiente manera: Un nodo base-móvil que se encarga de la recolección de datos para así enviarlos a un nodo coordinador para obtener, guardar y administrar los datos que se desean registrar. En algunos casos se encuentra un tercer nodo (enrutador), el cual sirve de intermediador entre el nodo coordinador y el nodo servidor, con el fin de ampliar la distancia mínima que se permite entre módulos para su comunicación.

Así mismo, Chio Cho Nayibe, Diego, Laura y Luis⁴ ilustran las capacidades de un sensor, siendo este artefacto físico capaz de interpretar propiedades físicas, biológicas y químicas en su entorno De esta manera el nodo base-móvil se

³ CHIO CHO, Nayibe; TIBADUIZA BURGOS, Diego; APARICIO ZAFRA, Laura y CARO ORTIZ, Luis. Redes de sensores inalámbricos [En línea],, 1 p. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Diego_Tibaduiza_Burgos/publication/267214014_Red_de_sensores_i_nalambricos/links/5451077a0cf24884d886f4e9/Redes-de-sensores-inalambricos.pdf

⁴ *Ibíd.*, p 1.

encargará de enviar al nodo coordinador los datos suficientes para obtener la posición certera de un ente en movimiento en un campo determinado.

Figura 1 Microcontrolador



Fuente: CHIO CHO, Nayibe; TIBADUIZA BURGOS, Diego; APARICIO ZAFRA, Laura y CARO ORTIZ, Luis. Redes de sensores inalámbricos [En línea]., 1 p. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Diego_Tibaduiza_Burgos/publication/267214014_Redde_s_ensores_inalambricos/links/5451077a0cf24884d886f4e9/Redes-de-sensores-inalambricos.pdf

De lo que la imagen señala como un microcontrolador, Chio Cho Nayibe, Diego, Laura y Luis⁵ es un chip de bajo costo y autónomo que es empleado para controlar la funcionalidad y la circulación de datos para ser interpretados y guardados.

Dicho de esta forma, esta composición nos revela la importancia de utilizar estos dispositivos para administrar una red, resaltando el bajo costo en el mercado de un módulo ajustable a las WSN en comparación a la utilidad que se le puede llegar a dar.

Otro aspecto importante de la utilización de estos, son las técnicas que existen para la optimización y bajo consumo de energía, para poder obtenerla de diferentes fuentes además de las baterías.

⁵ *Ibíd.*, p 1.

5.1 Administración de la energía de las WSN

Como nos expresan Chio Cho, tibaduiza,⁶ entre otros, existen algunas técnicas que sirven para la optimización del uso de la energía, y obtenerla así de otras fuentes además de las baterías.

“La primera es la transformación de las vibraciones en electricidad a través de efectos de inducción piezoeléctricos, electrostáticos y magnéticos, con la cual se puede proporcionar hasta 300uW/cm³.

La segunda es la transformación de un flujo de calor en electricidad y puede proporcionar hasta 40uW/cm³.

La tercera recupera la energía de la luz - a niveles de hasta 15000uW/cm³ al aire libre y de interior a 10uW/cm³ - o de la radiación de RF de hasta decenas de milivatios en el caso de una fuerte fuente como un lector de etiquetas RFID”.⁷

Por consiguiente, vemos la gran ventaja que tenemos en utilizar las redes inalámbricas de sensores al contar con métodos de obtención y ahorro de energía, cumpliendo con uno de los objetivos del proyecto.

5.2 Tecnologías de las redes inalámbricas de sensores.

Existen diferentes tipos de tecnologías las cuales se podían ajustar a la implementación del proyecto, como lo son Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, siendo las más conocidas y utilizadas en el campo de la domótica y aplicación de las WSN. Pero no todas cumplirían con los objetivos principales del proyecto, como lo son, el bajo consumo de energía, bajo costo y escalabilidad.

⁶ *Ibíd.*, p 2.

⁷ *Ibíd.*, p 2.

Como lo expresa Gary Elinoff ⁸ en su publicación sobre una comparación entre estas tecnologías en una revista de productos electrónicos, sobre las ventajas y desventajas de cada una de estas tecnologías, veamos:

Gary explica claramente como Bluetooth será el camino más económico para la transmisión de datos, puesto que todos los celulares inteligentes de hoy en día traen consigo integrada dicha tecnología, dando pie para que se pueda utilizar sobre los sistemas operativos más utilizados como Android o iOS, pero teniendo en su contra la corta distancia en la que se hace efectiva su comunicación. Por otro lado, Wi-Fi surge como una gran oportunidad de transmisión de datos, pues este permite monitorear el sistema desde cualquier parte del mundo puesto que este está conectado a internet, pero su consumo de energía y costo sería superior al que se buscan en este proyecto. Dejándonos como la mejor oportunidad de cumplir los objetivos de ganar escalabilidad en el proyecto, bajo consumo de energía y considerando que un módulo ZigBee⁹ se encuentra en un mercado a bajo costo, ahorraríamos recursos en su obtención. Teniendo en cuenta que, con una red de comunicación correcta, estos dispositivos tendrán una comunicación sin pérdida de paquetes y literalmente a larga distancia.

En la figura 2 se hace una comparación entre algunas de las tecnologías de redes inalámbricas de sensores que existen, donde se puede evidenciar los beneficios que se reciben de ZigBee con respecto a las otras visualizadas.

⁸ ELINOFF, Gary. Bluetooth vs Wi-Fi vs ZigBee [En línea] 2017. Disponible en https://www.electronicproducts.com/Computer_Peripherals/Communication_Peripherals/Bluetooth_vs_Wi-Fi_vs_ZigBee.aspx

⁹ GIROD FORTUÑO, Antón. Desarrollo e implementación de una red de sensores Zigbee mediante el dispositivo Xbee de digi. [En línea]. 2012., Disponible en. <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1957pub.pdf>

Figura 2 ZigBee vs Wi-fi vs Bluetooth



	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Velocidad	<50 Mbps	1 Mbps	<250 kbps
Núm. nodos	32	8	255 / 65535
Duración batería	Horas	Días	Años
Consumo transm.	400 ma	40 ma	30 ma
Consumo reposo	20 ma	0.2 ma	3 µa
Precio	Caro	Medio	Barato
Configuración	Compleja	Compleja	Simple
Aplicaciones	Internet en edificios	Informática y móviles	Domótica y monitorización

Fuente: GIROD FORTUÑO, Antón. Desarrollo e implementación de una red de sensores Zigbee mediante el dispositivo Xbee de digi. [En línea]. 2012., p 18. Disponible en. <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1957pub.pdf>

Se puede concluir de esta imagen, como lo indica Girod Fortuño¹⁰ que ZigBee se ajusta de manera óptima, brindando algunos aspectos esenciales para cumplir los objetivos del proyecto, como lo son, una gran escalabilidad en su número de nodos disponibles y programados para la red, la durabilidad de su batería y el bajo consumo de la misma, economía en el mercado y de simple configuración.

¹⁰ GIROD FORTUÑO, Antón. Desarrollo e implementación de una red de sensores Zigbee mediante el dispositivo Xbee de digi. [En línea]. 2012., Disponible en. <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1957pub.pdf>

5.3 Modos de operación de las redes inalámbricas de sensores bajo el estándar IEEE 802.15.4 ZigBee.

Después de nombrar las tecnologías utilizadas en las redes inalámbricas de sensores y seleccionar la tecnología ZigBee como la más apropiada para el desarrollo del proyecto, se presentan los modos de operación de ZigBee bajo el estándar IEEE 802.15.4.

Para explicar estos modos de operación se utiliza en un módulo físico (Hardware) con el fin de poder implementar el algoritmo diseñado; por esta razón se usan módulos Xbee los cuales poseen dos modos de funcionamiento, como son el modo AT (Modo Transparente) y el modo API (Interfaz de Programación de Aplicación). “Los módulos Xbee poseen dos modos de funcionamiento, AT y API. Ambos modos pueden trabajar en Unicast (punto a punto) y Broadcast (multipunto). El modo AT envía los datos en forma transparente y para configurar el módulo se debe enviar una secuencia característica (+++) que lo coloca en modo comando. En el modo API (no transparente) se deben armar las tramas con un encabezado y una suma de control.”¹¹

- MODO AT: El modo transparente según el manual de Aprendiendo Arduino¹² trae consigo alcances cortos en cuanto a transmisión de datos, ya que para enviar los datos de un módulo a otro se debe configurar la dirección del destino con anticipación, sin embargo, este modo de transmisión de datos es ideal cuando solo se desea la comunicación entre dos módulos lo que también se conoce como punto a punto. Y es así como este modo limitaría la entrega de las tramas enviadas de un nodo a otro, ilustrando de una mejor manera en la figura 3, donde se evidencia el mensaje enviado por el

¹¹ MOYA, Telmo; GOGGINO, Javier y HOYOS, Daniel. Red de sensores y control inalámbrica para un sistema de generación de vapor solar térmico [En línea]. Argentina. 2010., p 5. Disponible en <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2010/2010-t008-a021.pdf>

¹² Aprendiendo Arduino. 2017. <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/16/zigbeexbee/>

dispositivo A al B, se envía por un carácter a su vez, esperando que el otro lo reciba para enviar el siguiente, hasta poder completar la trama enviada.

Figura 3 Modo AT (TRANSPARENTE)



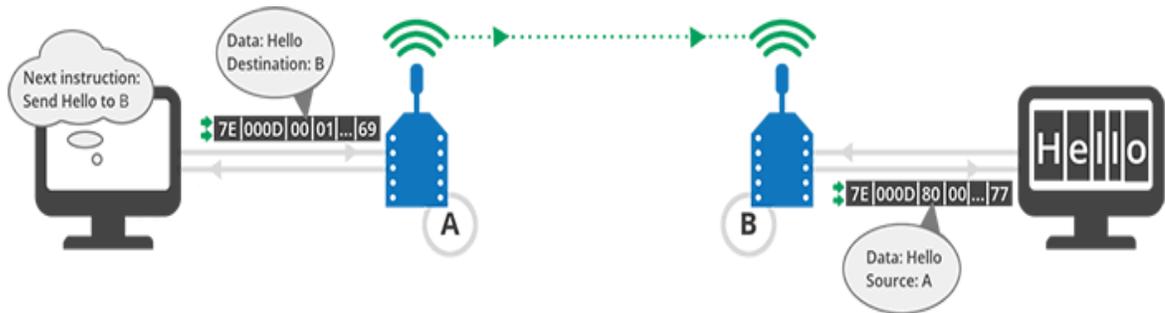
Fuente: Aprendiendo Arduino. 2017.

<https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/16/zigbeexbee/>

- MODO API: “El modo de operación de la Interfaz de programación de aplicaciones (API) es una alternativa al modo transparente. En el modo API, un protocolo determina la forma en que se intercambia la información. Los datos se comunican en paquetes. Este modo le permite formar redes más grandes y es más apropiado para crear redes de sensores para realizar tareas como recopilar datos de múltiples ubicaciones, controlar dispositivos de forma remota o automatizar su hogar.”¹³. En la figura 4 se logra destacar el envío del paquete con el mensaje deseado desde el nodo transmisor, y de la misma manera el nodo receptor recibe la trama completa, haciendo un proceso de recolección de datos más rápido que en el modo visto anteriormente.

¹³ DIGI. <https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90001456-13/Default.htm#concepts/c transparent and api mode.htm%3FTocPath%3DHow%2520XBee%2520devices%2520work%7CWireless%2520communication%7CSerial%2520communication%7C> 1

Figura 4 Modo API



Fuente: Aprendiendo Arduino. 2017.

<https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/16/zigbeexbee/>

Por lo tanto, es importante decir que, a la hora de programar los módulos, estos vienen predeterminados en modo AT, por lo que en este caso se aprovechan las ventajas del funcionamiento en modo API y se cambia su modo en el simulador, para permitir la comunicación entre los módulos sin la necesidad de tener que definir su protocolo.

- “El modo API se utiliza generalmente cuando un dispositivo:
- Envía datos de RF a múltiples destinos.
- Envía comandos de configuración remota para administrar dispositivos en la red.
- Recibe paquetes de datos de RF de múltiples dispositivos, y la aplicación necesita saber cuál dispositivo enviado qué paquete.
- Debe admitir varios puntos finales de Zigbee, ID de clúster y / o ID de perfil.
- Utiliza los servicios de perfil del dispositivo Zigbee.”¹⁴

Por estos motivos expuestos anteriormente, se estudian estos modos de programación y así mismo se encuentra el modo API como el ideal para la

¹⁴ Digi International Inc. Standards and Technologies, Zigbee Wireless Standard: Zigbee Wireless Mesh Networking. Internet: <https://www.digi.com/resources/standards-and-technologies/zigbee-wireless-standard>

configuración de los dispositivos, brindándonos ventajas que ya vimos y acoplándose a las necesidades del proyecto.

5.4 TOPOLOGIAS PARA LAS REDES INALAMBRICAS DE SENSORES.

Para la implementación del proyecto, y lograr una efectiva comunicación entre los dispositivos se debe definir una topología de red, la cual se ajuste mejor a las necesidades del proyecto. Teniendo en cuenta uno de los objetivos principales que se tienen como lo es la escalabilidad del proyecto; es así como podemos encontrar diferentes topologías como lo son, en estrella, en malla, entre otras, definidas así:

5.4.1 Topología en estrella:

“Una topología en estrella es un sistema donde la información enviada sólo da un salto y donde todos los nodos sensores están en comunicación directa con la puerta de enlace, usualmente a una distancia de 30 a 100 metros. Todos los nodos sensores son idénticos, nodos finales, y la puerta de enlace capta la información de todos ellos. La puerta de enlace también es usada para transmitir datos al exterior y permitir la monitorización de la red. Los nodos finales no intercambian información entre ellos, sino que usan la puerta de enlace para ello, si es necesario”.¹⁵

Para una visualización de esta definición, podemos ver en la figura 5, como los nodos finales están conectados uno a uno al nodo coordinador, todo esto indicando que toda la información será recolectada por el nodo central.

¹⁵ FERNANDEZ MARTINEZ, Roberto; ORDIEREZ MERÉ, Joaquín; MARTINEZ, Francisco; GONZALES, Ana; ALBA, Fernando; LOSTADO LORZA, Rubén y PERNIA ESPINOSA, Verónica. Redes inalámbricas de sensores: Teoría y aplicación práctica [En línea]: Universidad de la Rioja. 2009., p 24. Disponible en <file:///D:/Universidad/Trabajo%20de%20Grado/Documentos/Dialnet-RedesInalambricasDeSensores-377564.pdf>

Figura 5 Topología en estrella



Fuente: 247 Tecno. Topología de red – Que es, tipos y características. <http://247tecno.com/topologia-de-red-tipos-caracteristicas/> .

En este caso, se evidencia que es una topología de red bastante limitada en el tema de escalabilidad y distancia obtenida entre los nodos finales, puesto que todos dependerán directamente de su nodo coordinador para la comunicación, y al tener un único canal de transmisión, si esta falla, la información obtenida por este nodo se perderá.

5.4.2 Topología en malla:

Como manifiesta Fernandez Roberto, Joaquin¹⁶, entre otros, la topología en malla se denomina de esta manera pues es un sistema en el cual todos los dispositivos que hacen parte de esta red, tendrán el beneficio de ser configurados como routers, siendo cada uno idéntico al otro. Es así como cada nodo puede ser el receptor de información de otro sin importar su ubicación, solo teniendo la dirección de la puerta de enlace del transmisor podrán intercambiar mensajes entre sí. De esta manera

¹⁶ *Ibíd.*, p 25.

este tipo de red, brindara una gran ventaja en, pues programando nodos enrutadores en el camino, cumplirá con dos grandes beneficios siendo ilimitada su distancia en cuanto a escalabilidad concierne, y a su vez será tolerante a fallos, puesto que si un nodo falla, la red se reconfigurara de tal manera de buscar otro camino hasta poder llegar a su destino; teniendo en cuenta así, que el tiempo de llegada de los mensajes, será directamente dependiente del número de nodos en la red, es decir, a más nodos, más tiempo de espera en recibir los datos.

De este modo en la figura 6 se evidencia como todos los nodos pueden estar en conexión entre sí, haciendo a su vez de enrutadores y poder a su vez recolectar información para ser transmitida.

Figura 6 Topología en malla



Fuente: Aculturación. Topologías de red. <https://culturacion.com/topologias-de-red/>

Es así como se llega a la conclusión que la mejor opción para la implementación de este sistema, es utilizar una topología en malla, resaltando la “ilimitada” escalabilidad que se tendría con los nodos enrutadores, y sin perder la información en tal caso que se dañe algún camino de transmisión de datos, cumpliendo así con los objetivos del proyecto.

6. SISTEMAS DE LOCALIZACION

Es primordial para la investigación, descubrir un sistema de localización que se ajuste mejor a las necesidades del proyecto, y se pueda implementar a la tecnología escogida anteriormente, es por esto que se descubren diferentes tipos de sistemas y algoritmos para la modelación del prototipo en los módulos Xbee.

Ahora bien, en este punto se presentan las técnicas de localización más utilizadas basadas en distancia y posteriormente la elección de una de ellas, dicho esto, se pueden agrupar en diferentes categorías como:

6.1 Técnicas de localización

A continuación, se nombrarán en breve, algunas de las técnicas de localización que se conocen, o bien sean las más utilizadas, explicando un poco de cada una y finalmente concluyendo con la elección de la más apropiada para el proyecto.

6.1.1 Tiempo de llegada

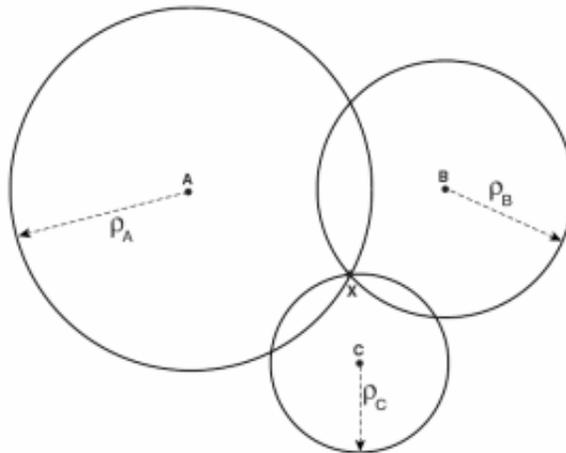
El Tiempo de llegada (ToA) según Eva Garcia Polo¹⁷ se usa para calcular distancias de un nodo a otro mediante la velocidad de transmisión de los datos. Por ejemplo, “las ondas sonoras viajan a una velocidad aproximada de 344 metros/segundo con una temperatura de 21°C. Así, un pulso de ultrasonido enviado por un nodo y que llega a otro 14’5 milisegundos después, nos permite concluir que la distancia entre ellos es de 5 metros”.¹⁸

¹⁷ GARCIA POLO, Eva. Técnicas de localización en redes inalámbricas de sensores [En línea]. Universidad de Castilla – La mancha., p 3. Disponible en <http://www.dsi.uclm.es/personal/EvaMariaGarcia/docs/2008-Curso%20Verano.pdf>

¹⁸ *Ibíd.*, p 3.

Es así como en la figura 7, se muestra una circunferencia que marca un radio desde cada nodo, las cuales hacen referencia a ondas emitidas por cada nodo, dando a entender visualmente como se calcula la distancia en su punto de intercepción.

Figura 7 Localización utilizando tiempo de llegada.



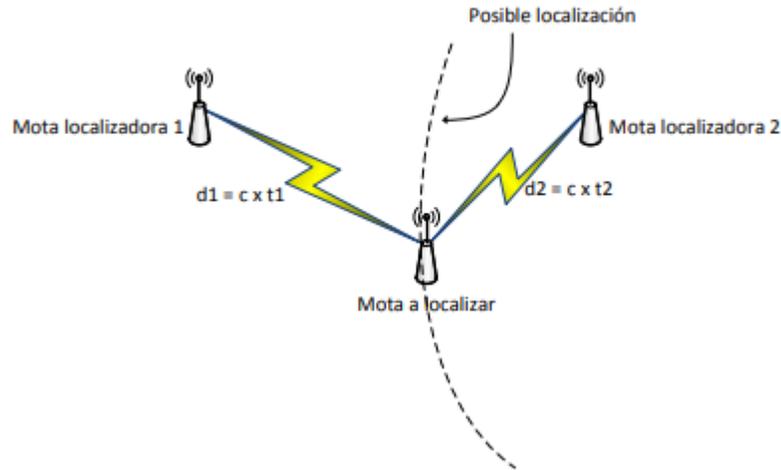
Fuente: GARCIA POLO, Eva. Técnicas de localización en redes inalámbricas de sensores [En línea]. Universidad de Castilla – La mancha., p 3. Disponible en <http://www.dsi.uclm.es/personal/EvaMariaGarcia/docs/2008-Curso%20Verano.pdf>

6.1.2 Diferencia en el tiempo de llegada

Para el cálculo de la diferencia en el tiempo de llegada (TDoA) como se evidencia en la figura 8, “Utiliza la medición de la diferencia de tiempos que tarda en llegar una señal radiada desde un nodo móvil hasta cada una de las estaciones fijas o los tiempos que tardan en llegar las señales enviadas desde las estaciones hasta el nodo móvil.”¹⁹.

¹⁹ RUGELES, José y LEON, Deiby. Técnicas de localización de nodos inalámbricos mediante redes de sensores [En línea] Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada., p 3. Disponible en http://www.iiis.org/CDs2013/CD2013SCI/CISCI_2013/PapersPdf/CA150PJ.pdf

Figura 8 Localización utilizando diferencia en el tiempo de llegada



Fuente: JIMENEZ SANTANA, Juan. Localización en interiores con redes de sensores mediante técnicas fingerprinting [En línea]. España. Universidad de Murcia., p 12. Disponible en <http://www.webs.um.es/ocanovas/miwiki/lib/exe/fetch.php?id=docencia&cache=cache&media=lbs-zigbee.pdf>

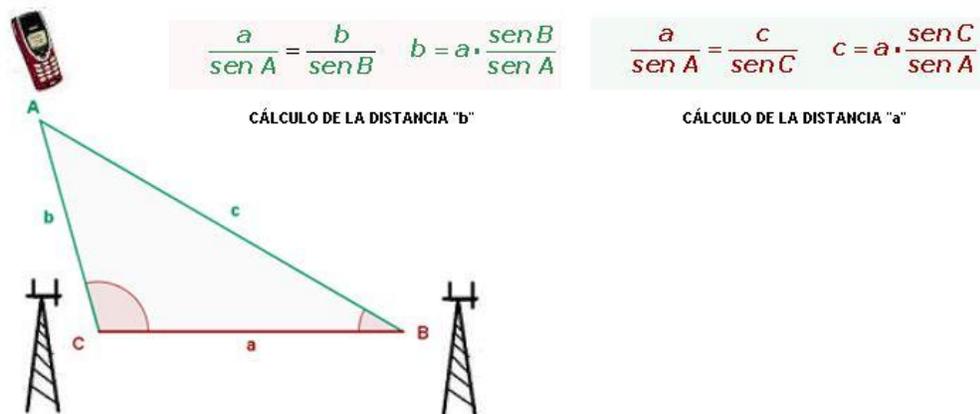
6.1.3 ANGULO DE LLEGADA

Para encontrar el ángulo de llegada (AoA), también conocido como dirección de llegada, se utilizan como mínimo dos medidas angulares que permiten determinar la posición aproximada de la fuente. Este método necesita de un grupo de antenas directivas o un conjunto de receptores, separados uniformemente. En algunos casos se utilizan un sistema de rotación para las antenas en los nodos de referencia o se utiliza un arreglo de antenas fijas con un hardware de conmutación electrónica que se sincroniza con el sistema de adquisición de datos y permite determinar el ángulo de llegada de las señales. Esta técnica se utiliza en sistemas de localización

de direcciones, empleados en los sistemas militares que utilizan bandas de frecuencia HF, VHF y UHF".²⁰

En la figura 9 se representa el cálculo de la distancia con la técnica de Angulo de llegada, resaltando la medición de esta distancia con la fórmula de los senos para triángulos oblicuángulos.

Figura 9 Localización utilizando Angulo de Llegada



Fuente: [Blog de Telefonía del CIFP Tartanga](http://telefonía.blog.tartanga.eu/2013/05/20/la-localizacion-de-los-telefonos-moviles-un-problema-mas-dificil-de-lo-que-parece/). La localización de los teléfonos móviles: Un problema más difícil de lo que parece. <http://telefonía.blog.tartanga.eu/2013/05/20/la-localizacion-de-los-telefonos-moviles-un-problema-mas-dificil-de-lo-que-parece/>

6.1.4 Potencia de la señal recibida

Las dos técnicas anteriores (ToA y TDoA) usan como parámetro principal de medición el tiempo para calcular la distancia. Para el cálculo de la Potencia de la señal Recibida (RSSI) se utiliza la potencia de la fuente o para este caso la

²⁰ *Ibíd.*, p 3.

paquete recibido y es cuantificada obteniendo el indicador de potencia de señal recibida (RSSI del inglés received signal strenght indicator). El valor del RSSI en el momento en el que el paquete fue recibido está disponible para las capas MAC, red y aplicación, para cualquier tipo de análisis. Con este valor puede crearse un sencillo método de localización, que no necesita de ningún hardware extra para poderse implementar. Hay cuatro parámetros asociados con el RSSI:

- Rango dinámico, es especificado en dB e indica la energía mínima y máxima recibida que el receptor es capaz de medir.
- Exactitud, indica el error promedio asociado con cada medida de la potencia de señal recibida.
- Linealidad, indica la desviación máxima de la gráfica del valor de RSSI con respecto a una línea recta, frente a la señal recibida actualmente (en escala logarítmica).
- Periodo promedio, la potencia de la señal recibida es medida en un periodo de tiempo (periodo promedio) y entonces promediada para generar el valor del RSSI”.²¹

Dicho de esta forma, Juan Jiménez²² nos explica el método que por medio de una señal enviada por un nodo es la manera más simple de localizar, y así entre los estos nodos se elegirá el que haya obtenido el valor más alto de RSSI; y también añade que para calcular una localización de un nodo con mayor precisión, se debe calcular dicha distancia “la intersección de las circunferencias que representan la

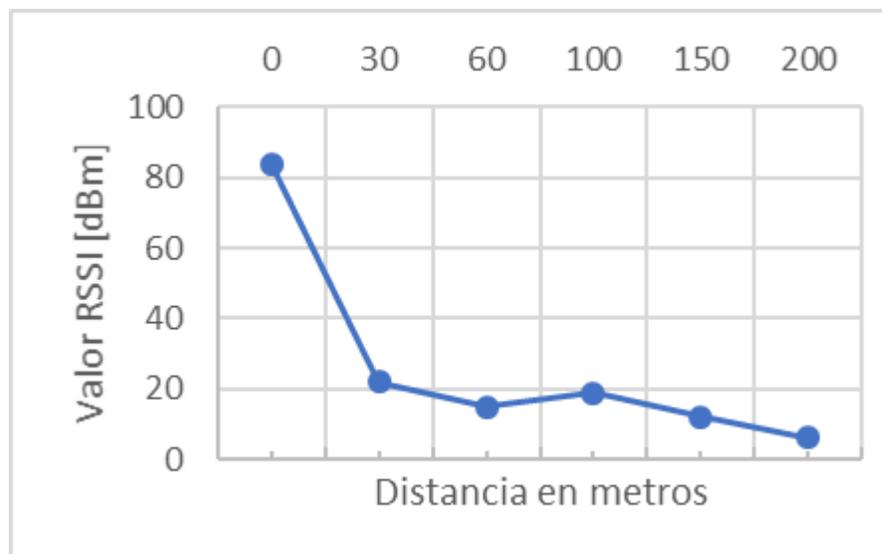
²¹ JIMENEZ SANTANA, Juan. Localizacion en interiores con redes de sensores mediante técnicas fingerprinting [En línea]. España. Universidad de Murcia., p 12. Disponible en <http://www.webs.um.es/ocanovas/miwiki/lib/exe/fetch.php?id=docencia&cache=cache&media=lbs-zigbee.pdf>

²² *Ibíd.*, p 12.

cobertura de los nodos localizadores que han recibido la señal del nodo a localizar.”²³

Como se ilustra en la figura 10, donde nos muestra una gráfica entre el valor de la potencia y la distancia a la que se calcula, se puede concluir que a mayor distancia, la potencia de la señal recibida ira en decaída, lo que solo afectara las mediciones en distancias largas.

Figura 10 Valor de potencia con RSSI con respecto a distancia en metros



Fuente: Fer Otori. Parte 4: Potencia RSSI en Freakduino.

<https://ferotori.wordpress.com/2018/09/25/parte-4-potencia-rssi-en-freakduino/>

Ahora bien, después de analizar el sistema de localización RSSI, podemos concluir que esta técnica nos brinda un aspecto importante como lo es el ahorro de hardware para el proyecto, pues no se necesitaran tantos sensores como en las otras técnicas

²³ *Ibíd.*, p 13.

encontradas, y como lo demuestran Nahuel, German, Manuel y Arturo J. Busso²⁴ brindan la posible comunicación entre módulos Xbee, los cuales con su composición, hacen posible la medición de la potencia de la señal recibida desde la antena integrada del módulo receptor . Y a continuación, se debe estudiar y escoger una técnica de estimación de posición para continuar con el objetivo de calcular distancias cortas mediante un sistema de localización utilizando las redes inalámbricas de sensores, para esto se investigan algunas de estas técnicas, y así poder elegir la que cumpla con los requerimientos de la red diseñada; en este camino se encuentran las siguientes:

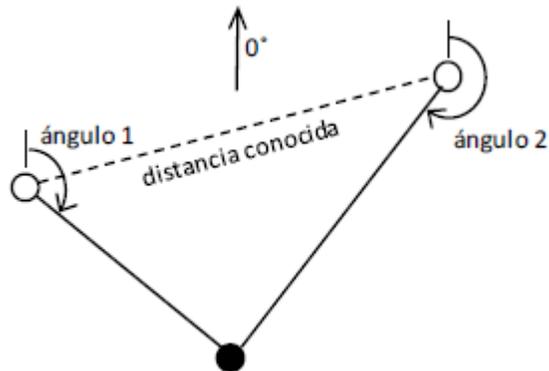
6.1.5 Triangulación

En la figura 11, se puede plasmar el método de triangulación, definido de la siguiente manera por Eva García Polo: “Este método utiliza una estimación basada en la reducción del área objetivo mediante la superposición de triángulos. Requiere de una red con nodos transmisores de referencia. Combina la información conocida de los nodos de referencia con el tamaño de las áreas estimadas hasta llegar a una estimación del área con mayor probabilidad de contener el nodo que se quiere localizar.”²⁵

²⁴ VARA, Nahuel; POLETTO, German; CACERES, Manuel; BUSSO, Arturo. Calculo de distancia entre los nodos de una red inalámbrica ZigBee en función del parámetro RSSI. [En Línea]., p 2. Disponible en <http://revistas.unne.edu.ar/index.php/eitt/article/view/275/241>

²⁵ RUGELES Y LEON. Óp. Cit., p 4.

Figura 11 Técnica de triangulación



Fuente: GARCIA POLO, Eva. Técnicas de localización en redes inalámbricas de sensores [En línea]. Universidad de Castilla – La mancha., p 6. Disponible en <http://www.dsi.uclm.es/personal/EvaMariaGarcia/docs/2008-Curso%20Verano.pdf>

6.1.6 Multilateración

“Al igual que en el método de triangulación, para la multilateración se necesitan las distancias a un número determinado de balizas para calcular la posición de un nodo, solo que en este caso, las distancias se determinan utilizando TDoA. En el caso tridimensional, serán necesarias cuatro balizas y en el caso bidimensional, serán suficientes tres balizas.”²⁶

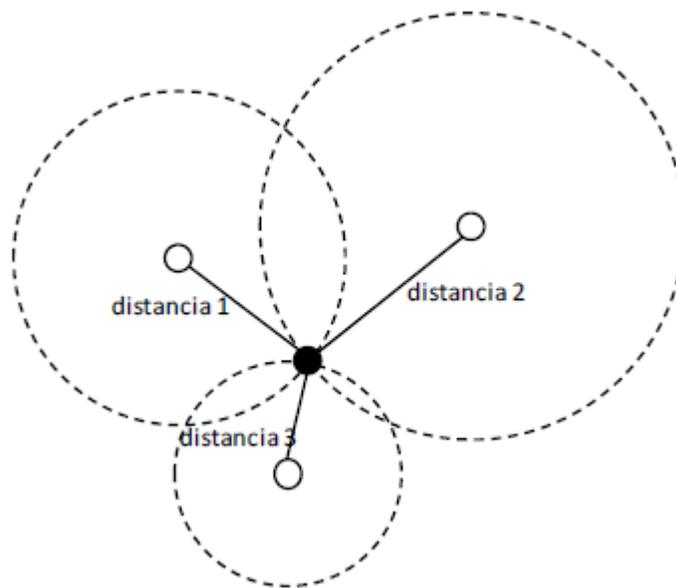
6.1.7 Trilateración

La figura 12 representa la técnica de estimación de distancia trilateración, en esta se puede evidenciar como los nodos estáticos mediante una señal enviada, dibuja su perímetro permitiendo notar una intercepción de todas las circunferencias (señales).

²⁶ GARCIA POLO. Óp. Cit., p 6.

Esta técnica es descrita de la siguiente manera: “Trilateración se refiere al proceso de calcular la posición de un nodo en función de las distancias medidas entre sí y una serie de puntos de anclaje con ubicaciones conocidas. Dada la ubicación de un ancla y la distancia de un sensor al ancla (por ejemplo, estimada a través de mediciones RSS), se sabe que el sensor debe colocarse en algún lugar a lo largo de la circunferencia de un círculo centrado en la posición del ancla con un radio igual al sensor –Anchor distancia. En el espacio bidimensional, se requieren mediciones de distancia de al menos tres anclajes no colineales para obtener una ubicación única (es decir, la intersección de tres círculos). En tres dimensiones, se requieren mediciones de distancia de al menos cuatro anclajes no colineales”²⁷.

Figura 12 Técnica de trilateración



²⁷ Jyoti; YADAV, Rekhan; SINGH, Neha. Localization in WSN Using Modified Trilateration Based on Fuzzy Optimization. [En Línea]. P 2., Disponible en. https://www.researchgate.net/publication/309589454_Localization_in_WSN_Using_Modified_Trilateration_Based_on_Fuzzy_Optimization

Fuente: GARCIA POLO, Eva. Técnicas de localización en redes inalámbricas de sensores [En línea]. Universidad de Castilla – La Mancha., p 5. Disponible en <http://www.dsi.uclm.es/personal/EvaMariaGarcia/docs/2008-Curso%20Verano.pdf>

Teniendo en cuenta el objetivo principal del proyecto, el cual es el bajo costo y reducir el uso de hardware, la técnica idónea en este caso será la de trilateración, pues en las dos anteriores se necesitará el uso de más hardware, puesto que necesitan mayores cálculos para su localización y en el caso de multilateración se necesitarían ultrasonidos para recibir las ondas de señal.

7. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN EN LAS REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

Para este punto, es necesario el estudio de diferentes entornos de programación que permitan modelar y simular el algoritmo elegido de trilateración, en los módulos Xbee que se desean utilizar. Por un lado, será necesario un entorno de programación que permita hacer modelamientos matemáticos y a su vez el desarrollo de un software con interfaz gráfica amigable para la programación del algoritmo y su visualización, y seguido de este, un simulador potente el cual nos deje programar en todas sus funciones los módulos Xbee.

Para el desarrollo del modelamiento se utiliza el entorno de programación del software Matlab (MATrix LABoratory), el cual es una herramienta muy utilizada para el modelamiento matemático, debido a la gran cantidad de funciones matemáticas y su amigable uso para la simulación de problemas complejos de ingeniería, siendo esto último el punto determinante que se necesita para el modelamiento y simulación del algoritmo de Trilateración. Matlab combina un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices directamente.”²⁸

Para el segundo paso, se encuentran diferentes simuladores de wsn como:

7.1 Simuladores de redes inalámbricas de sensores

A continuación, se describirán algunos de los simuladores capaces de diseñar una WSN y permitir su simulación, concluyendo con la elección del más acertado para las necesidades del proyecto.

²⁸ MathWorks. Matlab. 1994, <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. 2019

7.1.1 J-SIM

J-Sim (anteriormente conocido como JavaSim), según Tibaduiza y otros²⁹ es un simulador en lenguaje Java orientado a objetos, que brinda como ventaja el agregar y eliminar módulos de forma sencilla de manera plug and play, esto quiere decir que los usuarios no necesitan instalar controladores para utilizar un dispositivo, este se conectara y de forma automática quedara listo para utilizar, lo cual es muy útil para la simulación de sensores reales.

7.1.2 GloMoSim

“GloMoSim (Global Mobile Information Simular sistema) es un entorno de simulación escalable escrito en C y Parsec, es capaz de simular en forma paralela el evento de simulación discreta. GloMoSim es una colección de módulos de biblioteca, cada uno de los cuales simula un protocolo de comunicación inalámbrica en la pila de protocolos GloMoSim es ampliamente utilizado para simular ad hoc y las redes inalámbricas móviles.”³⁰

7.1.3 OMNeT++

“OMNeT ++ (Red Objetivo modulares de lecho de prueba en C ++) es un simulador de red de sensores inalámbricos que se basa en el evento de simulación. Como el modelo OMNeT++ recoge la jerarquía de los módulos, es posible captar la complejidad del sistema. Estos módulos están separados en dos tipos que son simples y compuestos. Los módulos Simple están programados en C++, mientras que los módulos Compuestos se componen de módulos que se programan en un lenguaje de alto nivel (NED). OMNeT ++ ayuda a los usuarios para estudiar el efecto

²⁹ CHIO CHO; TIBADUIZA BURGOS; APARICIO ZAF A Y CARO ORTIZ. Óp. Cit., p 7.

³⁰ CHIO CHO; TIBADUIZA BURGOS; APARICIO ZAF A Y CARO ORTIZ. Óp. Cit., p 8.

de escala, la arquitectura a nivel de nodo, la eficiencia energética, la arquitectura de las comunicaciones, la arquitectura del sistema, protocolos, etc.”³¹

7.1.4 TrueTime:

TrueTime es un simulador basado en Matlab / Simulink para sistemas de control en tiempo real. TrueTime facilita la simulación conjunta de la ejecución de tareas del controlador en núcleos en tiempo real, transmisiones de red y dinámica continua de la planta. Las características del simulador incluyen:

- Simulación de la temporización del controlador complejo debido a la ejecución del código, la programación de tareas y la comunicación de red cableada / inalámbrica.
- Posibilidad de escribir tareas como archivos M o funciones C ++. También es posible llamar a los diagramas de bloques de Simulink desde dentro de las funciones de código.
- Bloque de red (Ethernet, CAN, TDMA, FDMA, Round Robin, Ethernet onmutada, FlexRay y PROFINET).
- Bloqueo de red inalámbrica (802.11b WLAN y 802.15.4 ZigBee).
- Dispositivos alimentados por batería, escalamiento dinámico de voltaje y relojes locales.³²

Basado en los aspectos anteriores y las ventajas de utilizar TrueTime en redes ZigBee, se llega a la conclusión que esta herramienta es la mejor opción para la simulación de los módulos Xbee, debido a que fue construido para el entorno de Matlab donde se modeló el algoritmo de Trilateración.

³¹ CHIO CHO; TIBADUIZA BURGOS; APARICIO Zafa Y CARO ORTIZ. Óp. Cit., p 8.

³² CERVIN, Anton; HENRIKSSON, Dan; LINCOLN, Bo; EKER, Jhoan, ARZEN, Karl. How Does Control Timing Affect Performance? [En línea] Suiza: Lund University., p 23. Disponible en. <https://lup.lub.lu.se/search/ws/files/4367396/625629.pdf>

Después de finalizar el estudio del estado del arte de las redes inalámbricas de sensores, el estudio de los sistemas de localización y la selección de Matlab y TrueTime para simular la red inalámbrica de sensores, se procede a la implementación en el software del modelo y la simulación de la red aplicada al sistema de localización.

8. SIMULACIÓN DEL ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN BAJO LA TECNOLOGÍA DE REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

En este capítulo se mostrará la simulación del sistema de localización utilizando las redes inalámbricas de sensores (WSN) con el objetivo de probar el algoritmo de trilateración. Para esta simulación se utiliza el software MATLAB definido en el capítulo 7, según lo establece Moore, “MATLAB es una de las muchas sofisticadas herramientas de computación disponibles en el comercio para resolver problemas de matemáticas”³³. Para la simulación de las redes WSN sobre MATLAB se utilizó el framework llamado Truetime, como lo expone Cervin, Henriksson y Ohlin “es un simulador que trabaja bajo el entorno Simulink para sistemas de control en tiempo real”³⁴.

8.1 Uso de Matlab y Truetime en la simulación de la red inalámbrica de sensores y el algoritmo de trilateración.

Como afirman Cervin, Henriksson ,Lincoln, Eker, Årzén³⁵ dentro las características más importantes del framework truetime están, manejo de Bloque de red (Ethernet, CAN, TDMA, FDMA, Round Robin, Ethernet conmutado, FlexRay y PROFINET), bloque de red inalámbrica (802.11b WLAN y 802.15.4 ZigBee), Dispositivos con batería, escala dinámica de voltaje y relojes locales, además es importante mencionar que es posible llamar diagramas de bloques de Simulink desde las funciones de código.

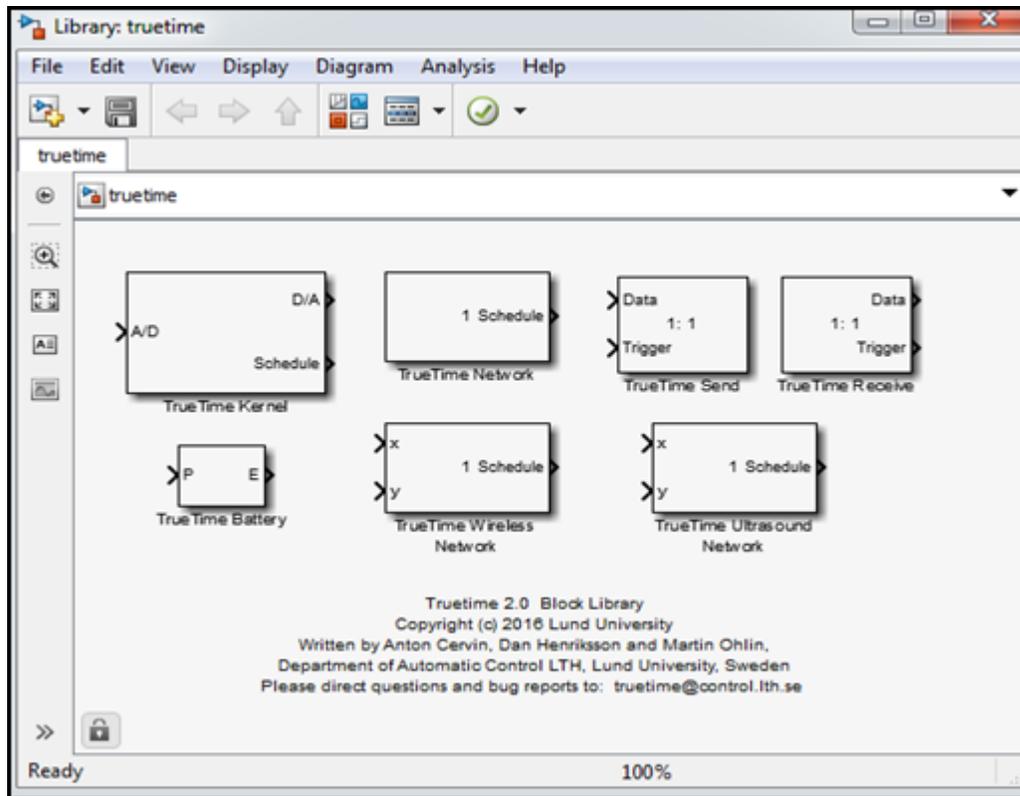
En la figura 13 se observan los bloques disponibles en Truetime.

³³ MOORE Holly. MATLAB para ingenieros. 1ra ed. Mexico.: Pearson Education, 2007. 1 p. ISBN 978-970-26-1082-3.

³⁴ CERVIN Anton, HENRIKSSON Dan, Ohlin Martin. TRUETIME 2.0 – Reference Manual. Internet: http://archive.control.lth.se/media/Research/Tools/TrueTime/report_2016-02-10.pdf

³⁵ CERVIN Anton, HENRIKSSON Dan, LINCOLN Bo, EKER Johan, ÅRZÉN Karl-Erik. How Does Control Timing Affect Performance? Control Systems Magazine. Control Systems Magazine, 2003. P. 16-30. <https://doi.org/10.1109/MCS.2003.1200240>.

Figura 13. Bloques de red en truetime.



Fuente: Cervin A, Henriksson D, Ohlin M. TRUETIME 2.0 – Reference Manual. Department of Automatic Control, Lund University. 2016. P. 8.

A continuación, se describen las funciones principales de los elementos utilizados en el diseño de la red.

8.2 TrueTime Wireless Network

Como afirman Cervin et al³⁶. TrueTime Wireless Network es el bloque encargado de simular la red inalámbrica, funciona de forma similar al bloque TrueTime Network. Cuenta con un modelo de atenuación de la señal en función de la distancia de separación de dos nodos, permite la ubicación de los nodos en un espacio

³⁶ Cervin. Op. Cit., p. 21.

geográfico de dos dimensiones (x,y) y soporta los protocolos IEEE 802.11b/g (WLAN) e IEEE 802. 15.4 (ZigBee). El modelo empleado en el simulador incluye:

- Redes inalámbricas Ad-hoc.
- Antena isotrópica.
- Simulador de interferencias con otros terminales.
- Pérdida de trayecto modelada por la ecuación $1/d^a$, donde d es la distancia entre dos nodos y a es un parámetro que se selecciona para simular el entorno.

8.3 Truetime Battery

El bloque TrueTime Battery simula el consumo de energía de cada nodo, es posible declarar por medio de instancias de código el consumo de potencia de cada mensaje enviado por un nodo inalámbrico. Cervin et al³⁷. La aplicación importante de este bloque consiste en verificar el tiempo que pueden aproximadamente durar las baterías de un nodo y así predecir futuros errores por falta de alimentación de los dispositivos.

8.4 Protocolo IEEE 802.15.4 (ZigBee) en TrueTime.

Según lo expuesto en Cervin et al “Truetime por medio de su bloque TrueTime Wireless Network permite simular el protocolo IEEE 802.15.4 (ZigBee), el proceso de transmisión de paquetes de datos es similar al de una red WLAN, pero el procedimiento MAC tiene ciertas diferencias”³⁸.

Un punto importante para el diseño del proyecto es la función de pérdida de trayecto definida por el usuario. Esta característica que brinda Truetime, permite simular la

³⁷ Cervin. Op. Cit., p. 27.

³⁸ *Ibíd.*, p. 23.

atenuación de la potencia transmitida por el trasmisor con respecto a la distancia a la cual se encuentra del receptor.

La ecuación (3.1) es el modelo que simula la atenuación de la potencia por la pérdida de trayecto.

$$P_{\text{receptor}} = \frac{P_{\text{trasmisor}}}{d^a} \quad (3. 1)$$

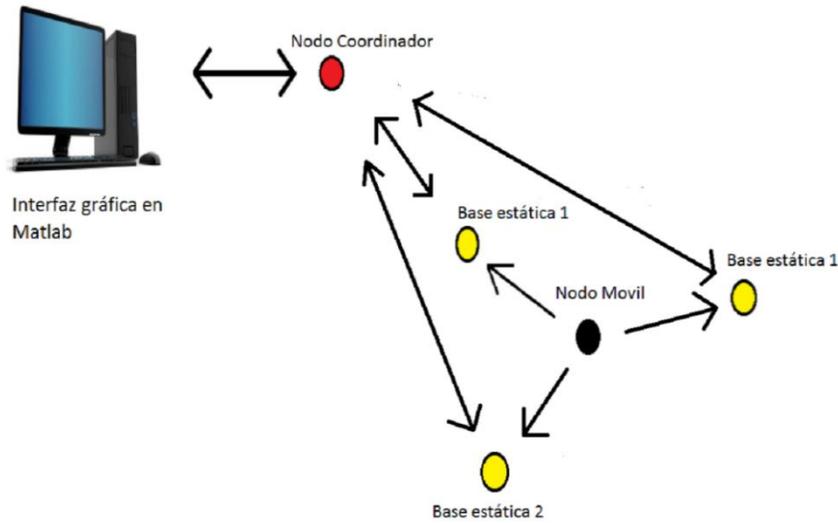
Donde a es un parámetro que se seleccionada para simular el entorno y d es la distancia medida en metros entre el nodo transmisor y el nodo receptor.

8.5 Diseño De La Red Prototipo De Localización En Truetime

La red diseñada consiste fundamentalmente en la utilización de una red WSN para encontrar la localización geográfica de un objeto, utilizado las propiedades de atenuación de la señal de radio frecuencia, para así modelar la distancia en función del indicador de la potencia de los mensajes transmitidos (RSSI) entre los nodos de la red, y, posteriormente, aplicar el algoritmo de localización para visualizar los resultados en una interfaz gráfica diseñada en el software Matlab.

Teniendo en cuenta el análisis presentado en el capítulo 5 se determinó que la red inalámbrica de sensores debe trabajar bajo el estándar de comunicación IEEE 802.15.4 ZigBee y el algoritmo de localización a implementar será el de trilateración. La figura 14 muestra la disposición de los nodos en la red.

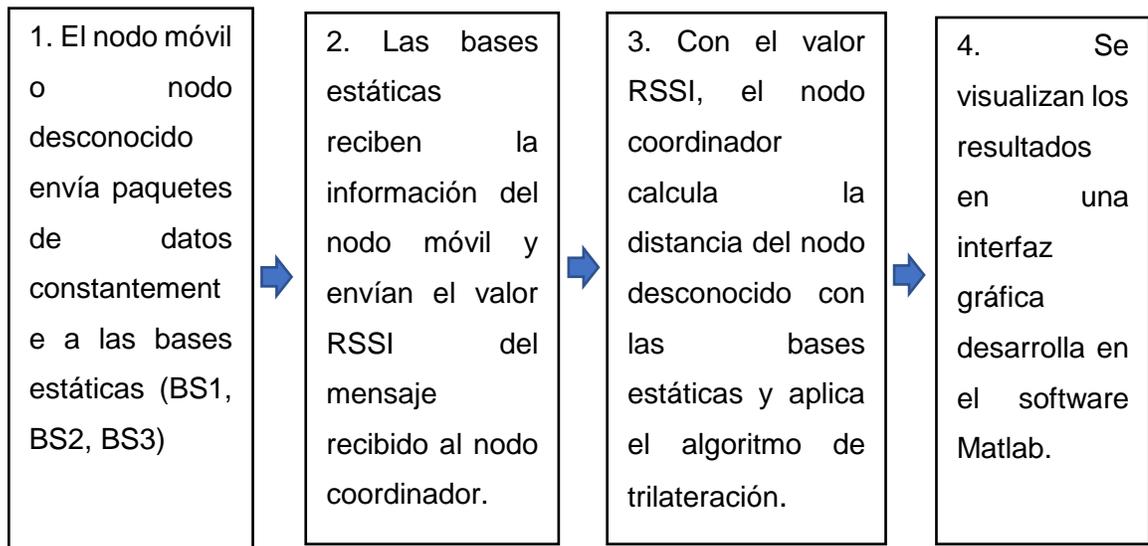
Figura 14 Red inalámbrica de localización.



Fuente: autor

La red de la figura 14 consta de 5 dispositivos de comunicación inalámbrica, el círculo negro corresponde al nodo móvil, los círculos de color amarillo a las bases estáticas y el círculo de color rojo corresponde al nodo coordinador. Para verificar el correcto funcionamiento de la red de localización diseñada es necesario realizar la simulación y analizar los diferentes factores que pueden alterar el sistema cuando se realice su implementación. El software utilizado en la simulación es Matlab con el framework Truetime, este último permite el manejo de módulos de comunicación inalámbrica bajo el protocolo de red IEEE 802.15.4 (ZigBee), además de la integración de herramientas matemáticas que permite utilizar Matlab para el modelamiento y la simulación del algoritmo de trilateración.

El siguiente diagrama de bloques muestra el proceso que realiza el sistema para encontrar las coordenadas de la posición geográfica de un objeto desconocido en un área determinada.



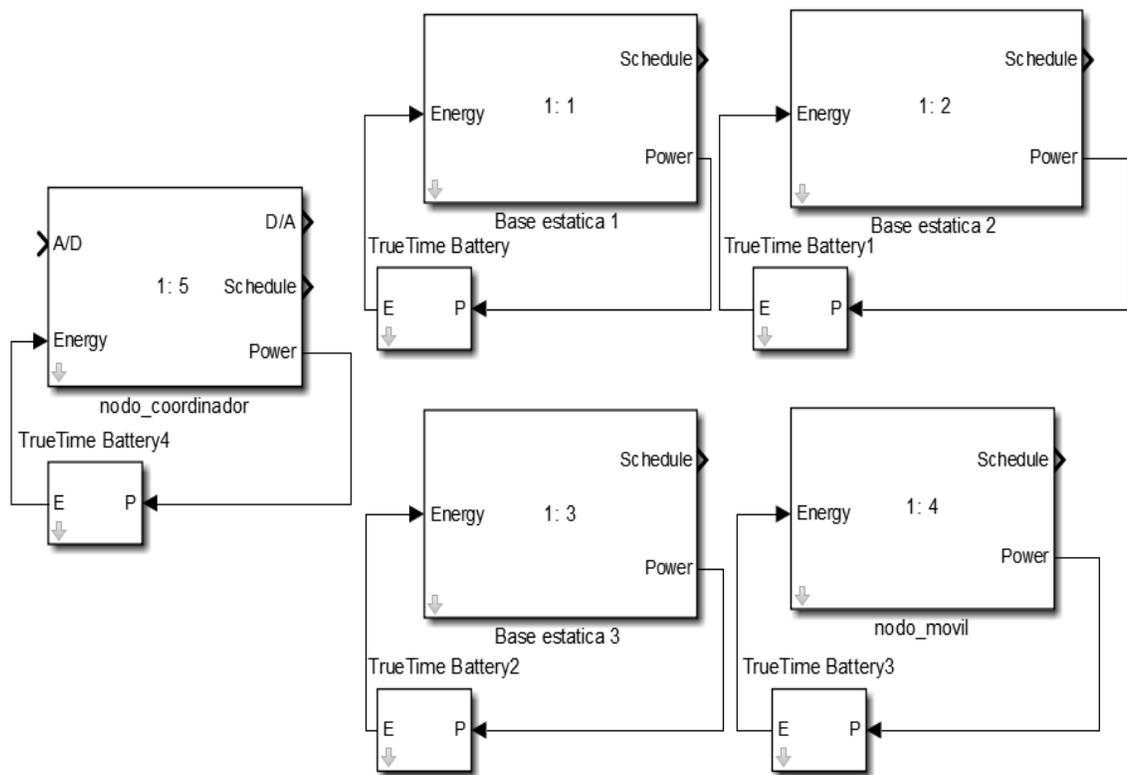
Según lo expuesto en el anterior diagrama, para encontrar las coordenadas del nodo desconocido el sistema realiza el siguiente algoritmo.

1. El nodo desconocido también llamado nodo móvil envía periódicamente mensajes a cada una de las bases estáticas.
2. Las bases estáticas reciben los datos procedentes del nodo móvil, dichos valores corresponden al mensaje enviado y al indicador de la potencia (RSSI) con la cual llega el paquete de datos. Luego, se calculan las distancias desde la cual el nodo desconocido se comunicó con las bases estáticas utilizando el valor RSSI, posteriormente se envían dichas distancias al nodo coordinador.
3. En el nodo coordinador se reciben los valores enviados por las bases estáticas uno, dos y tres, los cuales corresponden a las distancias que separan al nodo móvil de las bases estáticas, posteriormente se implementa el algoritmo de trilateración para encontrar las coordenadas de la posición geográfica en dos dimensiones.
4. Finalmente se visualizan los datos en la interfaz gráfica desarrollada en el software Matlab.

8.6 Simulación De La Red En Truetime

En esta sección se describen las principales características de la simulación de la red de localización en el framework truetype, para ello se explica la creación de los bloques que simulan el funcionamiento de cada uno de los nodos que conforman la red. La figura 15 representa los bloques para cada nodo en la red de localización.

Figura 15. Red de localización en el software TrueTime



Fuente: autor

En la figura 15 se observan los cinco nodos que conforman la red de localización, nodo_movil, base estática 1, base estática 2, base estática 3 y nodo_coordinador, además, cada nodo posee un bloque TrueTime Battery como afirman Cervin et al³⁹, este bloque es el encargado de simular el consumo promedio de potencia de cada dispositivo cuando se comunica con otro nodo de la red.

³⁹ Cervin. Op. Cit., p. 27.

Para simular los 5 nodos de la red se creó los archivos en el software Matlab, en los cuales se definió los algoritmos con las funciones de cada dispositivo. Por ejemplo, para el nodo coordinador se creó un archivo con el nombre `coordinador_init.m`. Los algoritmos de cada dispositivo se explicarán en el apartado (8.8)

8.6.1 Configuración de los parámetros de la red

Para realizar la simulación es necesario configurar e inicializar los parámetros de la red, para ello se utilizó el bloque TrueTime Wireless Network, en el cual se declaran las principales características. En la figura 16 se muestran los parámetros configurados.

Network type se refiere al protocolo de comunicación en la red para lo cual se seleccionó el estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee). Number of nodes: se asignó un valor de 5. Data rate, 250000 bits/s. Transmit power (dbm) se refiere a la potencia transmitida en cada paquete de datos, por lo cual se asignó un valor de 18 dBm, que según lo expuesto en DIGI⁴⁰ este valor corresponde a la potencia transmitida por los dispositivos a utilizar en el proyecto, XBee pro S2B. Pathloss exponent o exponentes de pérdida de trayectoria en redes de sensores inalámbricos, como afirma Rappaport “este parámetro es un valor que oscila entre 2.0 – 6.0 y con el cual se simula el entorno de la red”⁴¹. Para el proyecto se seleccionó un valor de 2.5 ya que se trabaja en un área con línea de vista directa, es decir, sin obstáculos. La figura 16 muestra los parámetros configurados.

⁴⁰ DIGI. XBee/XBee-PRO Zigbee RF Modules User Guide. p. 11. Internet: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>

⁴¹ RAPPAPORT Theodore. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2da ed. Upper Saddle River, NJ, USA. Prentice Hall, 2001. ISBN: 0130422320.

Figura 16. Configuración de los parámetros para la simulación de la red de localización

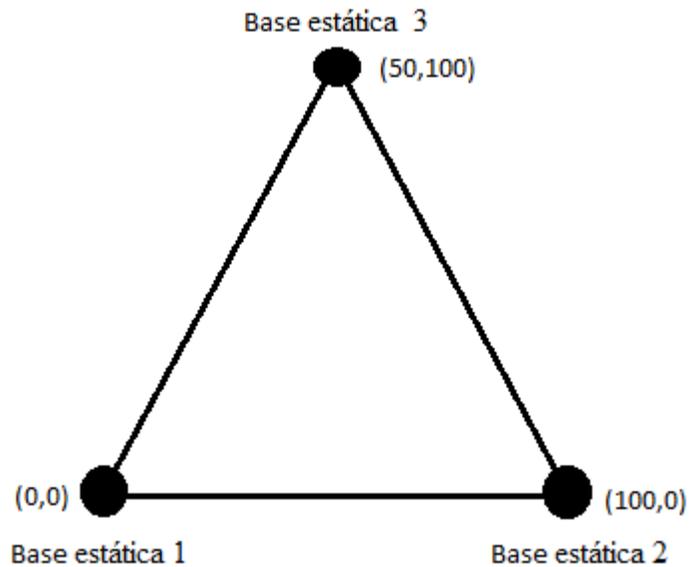
Parameter	Value
Network type	802.15.4 (ZigBee)
Network Number	1
Number of nodes	5
Data rate (bits/s)	250000
Minimum frame size (bits)	272
Transmit power (dbm)	18
Receiver signal threshold (dbm)	-48
Pathloss function	default
Pathloss exponent (1/distance ^x)	2.5
ACK timeout (s)	0.00004
Retry limit	5
Error coding threshold	0.03
Loss probability (0-1)	0
Initial seed	0
Show Schedule output port	<input checked="" type="checkbox"/>
Show Power consumption output port	<input checked="" type="checkbox"/>

Fuente: autor

8.6.2 Superficie de localización

Luego de establecer los parámetros de la red, se debe determinar el área de localización, por consiguiente, se ubicó los nodos estáticos en un punto determinado por sus coordenadas cartesianas. El nodo 1 o base estática 1 se localiza en la coordenada (0,0), la base estática número 2 se ubicó en la coordenada (100,0) y la base estática 3 se ubicó en la coordenada (50,100). Teniendo como resultado una región de 5000 m², delimitada por los lados de un triángulo isósceles de base y altura con medida de 100 metros tal y como se muestra en la figura 17.

Figura 17. Área de localización.



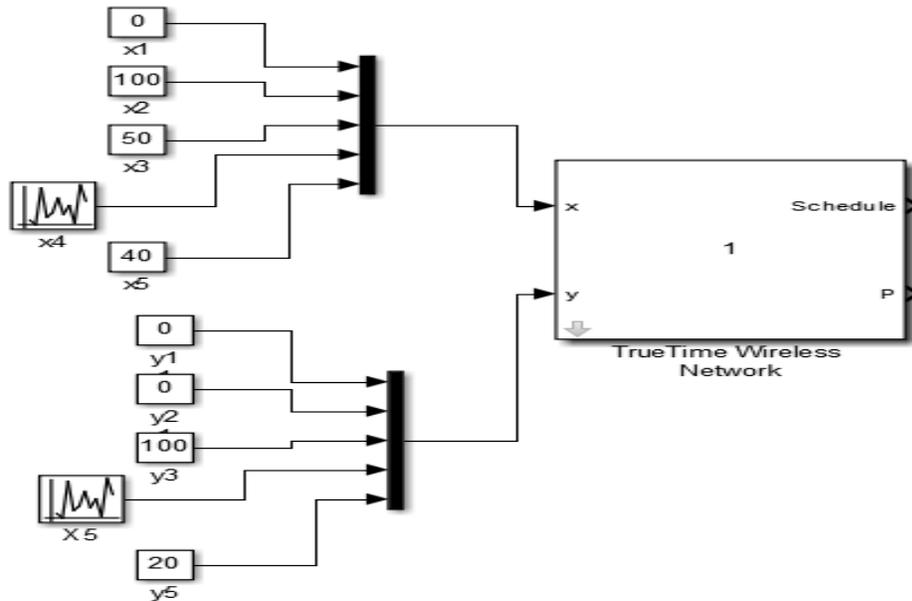
Fuente: autor

$$\text{Área}_{\text{localización}} = \frac{\text{base} * \text{altura}}{2} = \frac{100\text{m} * 100\text{m}}{2} = 5000\text{m}^2 \quad (3. 2)$$

Con la ayuda de los bloques de Simulink en Matlab, se estableció las coordenadas de las bases estáticas y el nodo móvil, para este último se utilizó el bloque Uniform Random Number, que según lo expuesto en la librería de Matlab mathworks “genera números aleatorios normalmente distribuidos”⁴², en sus parámetros se estableció un rango de 0 a 100 y una frecuencia de 1 segundo, es decir, las coordenadas del nodo móvil cambian cada segundo con un rango de desplazamiento de 100 metros tanto en el eje x como en el eje y. La figura 18 muestra las coordenadas para la ubicación de los nodos en la red

⁴² MATHWORKS, Documentación Simulink: Uniform Random Number. Internet: https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/uniformrandomnumber.html?s_tid=srchtitle

Figura 18. Distribución de coordenadas de los nodos en la red de localización.



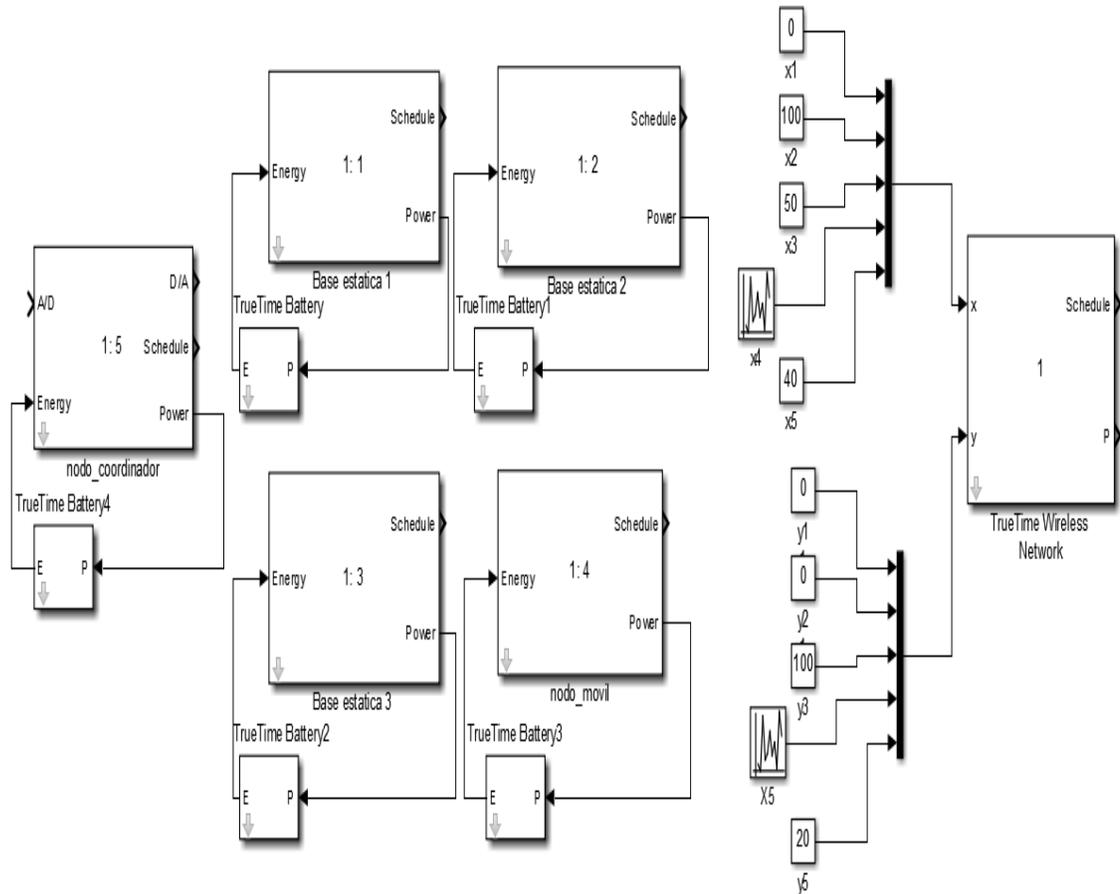
Fuente: autor

Teniendo en cuenta que las bases estáticas y el nodo coordinador conservan siempre la misma posición, se utilizó el bloque *constant* para definir la posición geográfica de sus coordenadas.

- Base estática 1 $(x_1, y_1) = (0,0)$
- Base estática 2 $(x_2, y_2) = (100,0)$
- Base estática 3 $(x_3, y_3) = (50,100)$
- Nodo coordinador $(x_4, y_4) = (40,20)$

La figura 19 muestra la red prototipo de localización en truetime, conformada por cinco nodos inalámbricos base estática 1, base estática 2, base estática 3, nodo móvil y nodo coordinador, de igual forma que los bloques *TrueTime Wireless Network*, *TrueTime Battery* y las coordenadas que representan la ubicación de cada dispositivo.

Figura 19. Diseño de la red de localización en el software TrueTime.



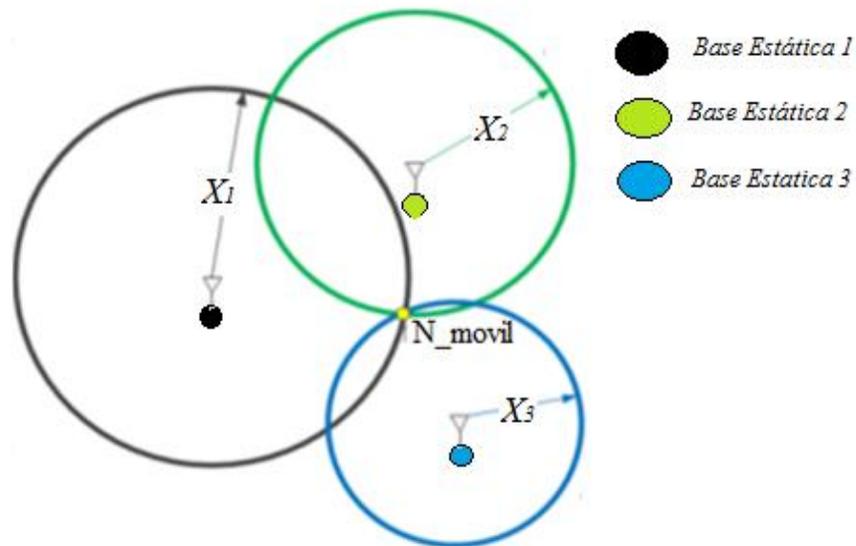
Fuente: autor

A continuación, se describe el funcionamiento de los bloques de la figura 19.

8.7 Funcionamiento de la red

Para implementar el algoritmo de trilateración se necesita conocer la distancia del nodo móvil a cada una de las bases estáticas, para ello se plantea estimar las distancias x_1, x_2, x_3 , figura 20, en función del indicador de la potencia de la señal RSSI (Received Signal Strength Indicator) realizando mediciones de potencia-distancia. Para cumplir dicho objetivo el nodo móvil envía constantemente paquetes de información a cada una de las bases estáticas (figura 20) para así obtener el valor RSSI que permita modelar la distancia entre el nodo desconocido y cada base.

Figura 20. Comunicación del nodo móvil con las bases estáticas.



Fuente: autor

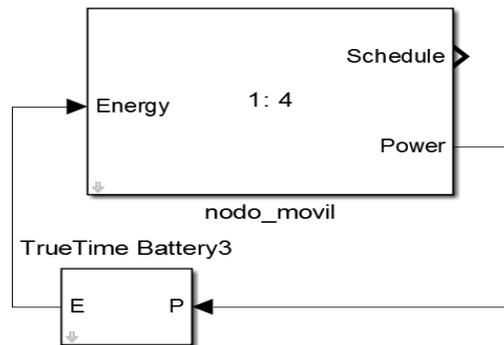
8.8 Funcionalidad de cada nodo en la red de localización.

Para determinar los valores RSSI, cada dispositivo cumple una función específica en la red la cual se describe detalladamente a continuación.

8.8.1 Nodo móvil (nodo desconocido).

Como se explicó en la sección 8.5 (Diseño de la red prototipo de localización en Truetime) la función de este dispositivo es comunicarse periódicamente con las tres bases estáticas para obtener el valor RSSI.

Figura 21. Bloque en TrueTime para la simulación del nodo móvil.



Fuente: autor

La figura 21 representa el esquema del nodo móvil, nodo al cual se le encontrará la posición geográfica. Para simular este dispositivo se creó un archivo llamado `mote.MOVIL_init.m`, en el cual se declara la función `ttCreatePeriodicTask('Mote_tx', starttime, periodo, 'motemovil_TX')`, que según Cervin et al⁴³ es un método encargado de simular una tarea periódica llamada 'Mote_tx' la cual repite en un tiempo declarado en el parámetro periodo (para este caso 0,02 ms) y realiza las instrucciones guardadas en el archivo 'motemovil_TX', figura 22. En `motemovil_TX` se simula la comunicación del nodo móvil con las tres bases estáticas utilizando la función `ttSendMsg(1, Y, 80)` la cual, según lo expuesto en Cervin et al⁴⁴ envía el valor guardado en la variable Y al nodo 1 de la red, en este caso la base estática 1.

En la figura 22, en *case 1*, se envía el dato $y=1$ a la base estática 1 por medio de la función `ttSendMsg`, posteriormente en *case 2*, se envía en dato $y=2$ a la base estática 2, y finalmente en *case 3*, se enviar $y=3$ a la base estática número 3.

⁴³ Cervin. Op. Cit., p. 65.

⁴⁴ *Ibíd.*, p. 95.

Figura 22. Algoritmo encargado de simular el comportamiento de nodo móvil.

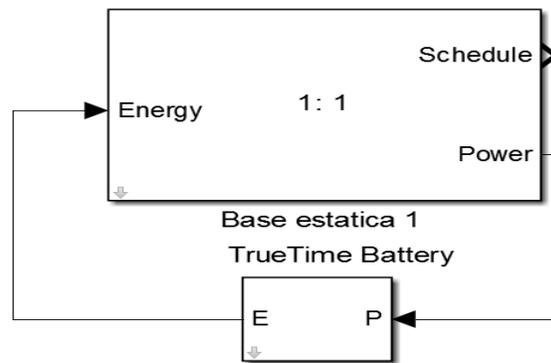
```
function [ exectime, data ] = motemovil_TX( seg, data )
persistent y;

switch seg
case 1
    y = 1;
    ttSendMsg(1, y, 80);
    exectime = 0.0006;
case 2
    y = 2;
    ttSendMsg(2, y, 80);
    exectime = 0.0006;
case 3
    y = 3;
    ttSendMsg(3, y, 80);
    exectime = 0.0006;
case 4
    exectime = -1; %esta declaracion termina la ejecucion de este codigo
end
```

8.8.2 Bases estáticas BS1, BS2 y BS3

En esta sección se describen los bloques para las bases estáticas, de igual forma que los algoritmos que definen el funcionamiento de estos dispositivos en la red de localización.

Figura 23. Bloque en TrueTime para la simulación de las bases estáticas.



Fuente: autor

La figura 23 muestra el esquema para la base estática 1, para ello se creó un archivo con el nombre `moteStatic1_init.m` en el cual se declara la interrupción `ttCreateTask` ('read_mote1', deadline, 'mote1_RX') que se activa cuando el mensaje enviado por el nodo móvil llega a este dispositivo. Esta interrupción ejecuta el algoritmo guardado en el archivo `mote1_RX`, en este último se almacena la información procedente del nodo móvil para así obtener el dato de entrada y el valor RSSI que permita determinar la distancia de la cual fue enviado dicho mensaje.

Según Cervin et al⁴⁵, la sentencia `[u, RSSI_mote1] = ttGetMsg`, mostrada en la figura 24, guarda el dato de entrada y el parámetro RSSI en las variables `u` y `RSSI_mote1` respectivamente.

La figura 24 representa el código del algoritmo `mote1_RX` realizado por las bases estáticas, en case 1, la sentencia `[u, RSSI_mote1]= ttGetMsg` se encarga de almacenar el mensaje enviado por el nodo móvil y el indicador RSSI de dicho mensaje en las variables `u`, `RSSI_mote1` respectivamente, posteriormente se calcula la distancia desde la cual fue enviado el mensaje y se almacena en la variable `X_mote1`. Finalmente en case 2, la base estática 1 envía la distancia calculada (`X_mote1`) al nodo coordinador por medio de la sentencia `ttSendMsg (5, strcat('uno', int2str(X_mote1)),80)`.

⁴⁵ Cervin. Op. Cit., p. 76.

Figura 24. Algoritmo encargado de simular el comportamiento de la base estática 1.

```
function [ exectime, data ] = motel_RX(seg, data)

persistent u  RRSI_motel X_motel;

switch seg
case 1
    [u, RRSI_motel] = ttGetMsg;
    X_motel = exp((16.209-RRSI_motel)/8.286);
    exectime = 0.0001;
case 2
    ttSendMsg(5, strcat('uno',int2str(X_motel)), 80);
    exectime = 0.0005;
    |
otherwise
    if ~isempty(u)
    else
        disp('Error: actuator received empty message!')
    end
    exectime = -1; % finished
end
```

Para determinar la distancia entre el nodo móvil y la base estática 1 en función del parámetro RSSI se realizó mediaciones de la variable `RRSI_mote1` la cual proporciona el indicador de la potencia en decibelio-milivatio (dBm) Cervin et al⁴⁶, variando la distancia en un rango de 0 a 100 metros, con saltos equidistantes de 5 metros entre el nodo móvil y la base estática 1. Los resultados del simulador se registraron en la tabla 1.

⁴⁶ Ibíd. Op. Cit., p. 76

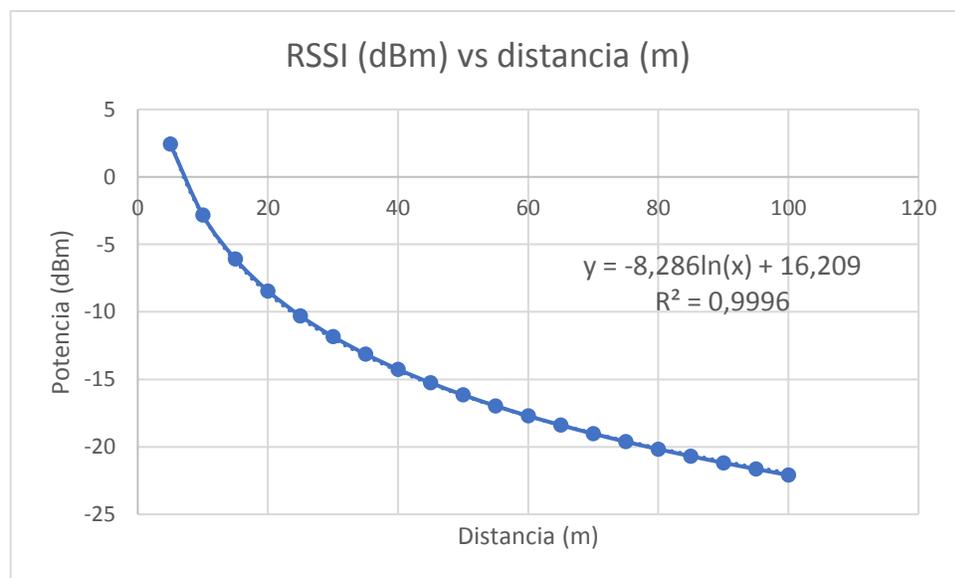
Tabla 2 Mediciones distancia y potencia en el software Truetime.

distancia (m)	Potencia (dBm)
0,00	18,0000
5,00	2,4370
10,00	-2,8279
15,00	-6,0824
20,00	-8,4444
25,00	-10,2995
30,00	-11,8272
35,00	-13,1261
40,00	-14,2557
45,00	-15,2552
50,00	-16,1514
55,00	-16,9638
60,00	-17,7066
65,00	-18,3909
70,00	-19,0252
75,00	-19,6163
80,00	-20,1697
85,00	-18,6900
90,00	-19,1808
95,00	-19,6454
100,00	-20,0864

En la tabla 1 se observa que a una distancia de 0 metros el indicador de la potencia o RSSI es de 18 dBm, este fue el valor que se definió en el bloque TrueTime Wireless Network y corresponde al valor real de la potencia transmitida por dispositivos utilizados en el proyecto (XBee pro S2B).

Con los valores registrados se encuentra la ecuación (3.3) que relacione la distancia en función del valor RSSI, cabe resaltar que como se trata de un simulador los datos obtenidos son ideales, es decir, se desprecian las pérdidas de potencia por interferencia, multiproyecto, refracción, reflexión que ocurren cuando se comunican dispositivos por un medio inalámbrico. La figura 25 representa el grafico RSSI en función de la distancia.

Figura 25. Relación distancia potencia simulador TrueTime.



Fuente: autor

La figura 25 representa el comportamiento del indicador de la potencia con la cual llegan los mensajes transmitidos por el nodo móvil a la base estática 1 en función de la distancia, se observa que conforme aumenta la distancia entre los dos dispositivos la potencia disminuye, dando lugar a un comportamiento logarítmico sin oscilaciones considerables, ya que se trata de un valor resultado de un simulador. Teniendo en cuenta los datos suministrados en la tabla 1 y utilizando la regresión logarítmica de Excel, el modelo que relaciona el valor RSSI en función de la distancia es.

$$\text{RSSI} = -8,286 \ln(x) + 16,209 \quad (3.3)$$

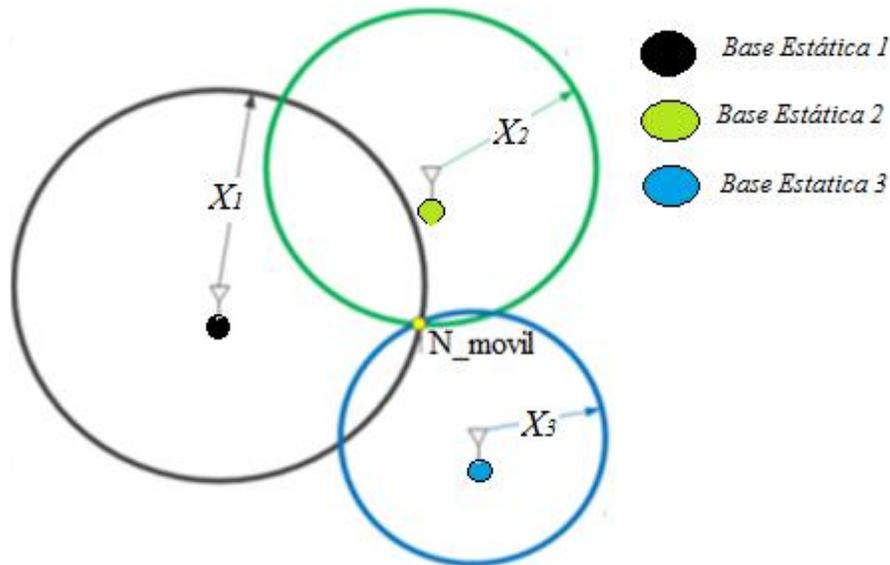
Despejando la distancia x en función del parámetro RSSI se obtiene.

$$x = e^{\frac{16,209 - \text{RSSI}}{8,286}} \quad (3.4)$$

Con la ecuación (3.4) se calcula la distancia que separa el nodo móvil con cada uno de los nodos estáticas a partir del parámetro RSSI, estas distancias se denominan x_1 , x_2 , x_3 y representan los radios de comunicación del nodo desconocido con cada base estática.

Las distancias x_1 , x_2 , x_3 se representan gráficamente en la figura 26 y son los datos fundamentales para implementar el algoritmo de trilateración.

Figura 26. Relación de los radios de comunicación entre el nodo móvil y las bases estáticas.

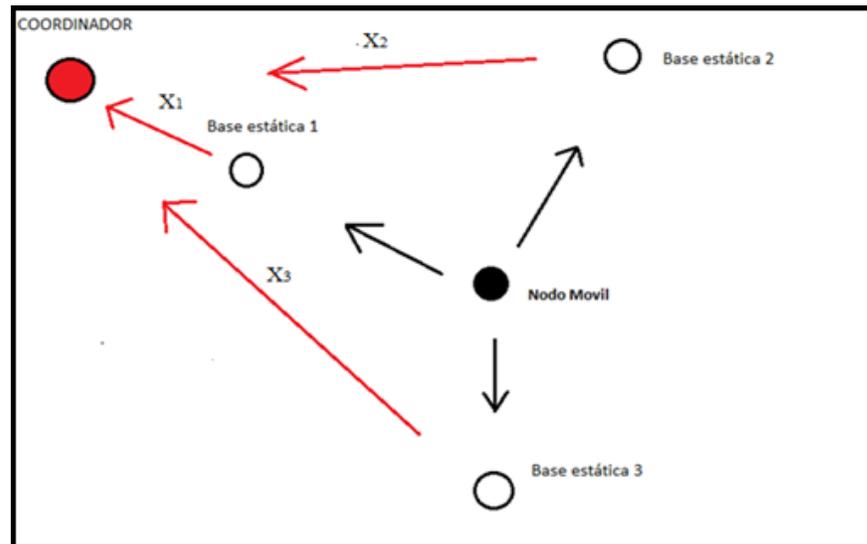


Fuente: autor

Con el parámetro guardado en la variable `RSSI_mote1` se calcula el valor de x_1 , esta distancia se almacena en la variable `X_mote1` e inmediatamente se envía al nodo coordinador, figura 27, para ello se utilizó la función `ttSendMsg (5, strcat ('uno', int2str(X_mote1)), 80)`. En este caso el número 5 corresponde al nodo coordinador.

De igual forma se emplea el mismo código para recibir y enviar la información al coordinador en las bases estáticas 2 y 3.

Figura 27. Comunicación bases estáticas con el nodo coordinador.



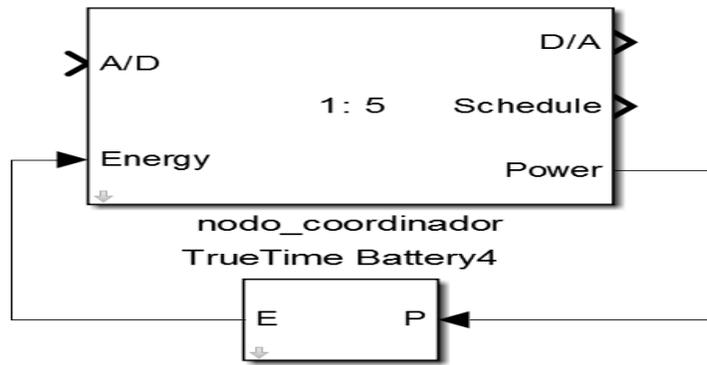
Fuente: autor

8.8.3 Nodo coordinador

Este nodo es el encargado de recibir las distancias x_1 , x_2 , x_3 enviadas por las bases estáticas (B1, B2, B3), para luego implementar el algoritmo de trilateración y de esta manera encontrar la posición geográfica del nodo móvil.

En la figura 28 se representa el esquema del nodo coordinador en el software Truetime.

Figura 28. Bloque de simulación para el nodo coordinador.



Fuente: autor

Para este dispositivo se creó un archivo con el nombre `coordinador_init.m` en el cual se declara la interrupción `ttCreateTask('read_coordinador', deadline, 'receptor_cordinador')` que se activa cuando lleguen los mensajes procedentes de las bases estáticas 1, 2 y 3. Los datos de entrada al nodo coordinador son las distancias x_1 , x_2 , x_3 .

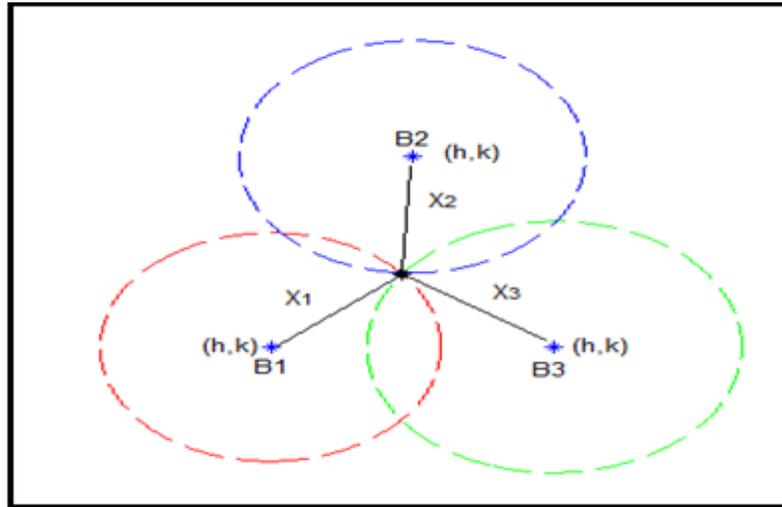
Cuando los tres mensajes hayan llegado al nodo coordinador, este último llama al método `calcular_posicion(x_1, x_2, x_3)`, el cual recibe como parámetros de entrada las distancias x_1 , x_2 , x_3 , e implementa el algoritmo de trilateración para calcular la posición del nodo móvil en tiempo real.

A continuación, se describe el funcionamiento del algoritmo de trilateración almacenado en el método `calcular_posicion(x_1, x_2, x_3)`.

8.8.4 Algoritmo de trilateración en truetime

Cada una de las circunferencias mostradas en la figura 29 representan los radios de comunicación (x_1 , x_2 , x_3) entre el nodo móvil (N_{movil}) y las bases estáticas ($B1$, $B2$, $B3$), este sistema bidimensional se modela a partir del siguiente sistema de ecuaciones cuadráticas.

Figura 29. Elementos principales en el algoritmo de trilateración.



Fuente autor

$$(x - h_1)^2 + (y - k_1)^2 = x_1^2 \quad (3.5)$$

$$(x - h_2)^2 + (y - k_2)^2 = x_2^2 \quad (3.6)$$

$$(x - h_3)^2 + (y - k_3)^2 = x_3^2 \quad (3.7)$$

Donde (h_1, k_1) , (h_2, k_2) , (h_3, k_3) , son los centros de cada circunferencia, que a su vez son las coordenadas fijas de las bases estáticas.

Manipulando algebraicamente una de las anteriores ecuaciones se obtiene la expresión general de la circunferencia (3.11).

$$(x - h_i)^2 + (y - k_i)^2 = x_i^2 \quad (3.8)$$

$$x^2 - 2xh_i + h_i^2 + y^2 - 2yk_i + k_i^2 = x_i^2 \quad (3.9)$$

$$x^2 + y^2 - 2xh_i - 2yk_i + h_i^2 + k_i^2 - x_i^2 = 0 \quad (3.10)$$

$$x^2 + y^2 + a_i x + b_i y + c_i = 0 \quad (3.11)$$

Donde $a_i = -2h_i$, $b_i = -2k_i$, $c_i = h_i^2 + k_i^2 - x_i^2$. De esta manera se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones cuadráticas.

$$x^2 + y^2 + a_1x + b_1y + c_1 = 0 \quad (3.12)$$

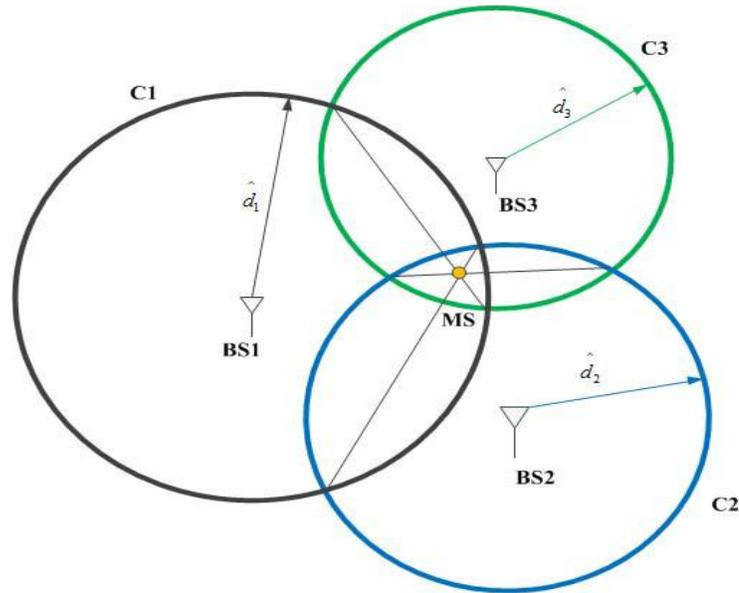
$$x^2 + y^2 + a_2x + b_2y + c_2 = 0 \quad (3.13)$$

$$x^2 + y^2 + a_3x + b_3y + c_3 = 0 \quad (3.14)$$

La figura 29 representa gráficamente las ecuaciones (3.5, 3.6, 3.7) en ella se observa un punto de intersección que supone la localización del nodo desconocido. Para encontrar la ubicación del nodo, basta con solucionar dos de las ecuaciones simultaneas (3.12, 3.13, 3.14), sin embargo, como afirman Pradhan, Shin, Kwon, Pyun y Hwang⁴⁷ en su artículo “The advanced TOA trilateration algorithms with performance análisis”, la ubicación del nodo es un punto que se encuentra en la superficie delimitada por la superposición de las circunferencias de ecuaciones (3.5, 3.6, 3.7) tal y como se muestra en la figura 30. Por consiguiente, para encontrar una mejor aproximación de la posición del elemento desconocido se requiere conocer las ecuaciones lineales que intersecan los puntos comunes de los círculos de la figura 30.

⁴⁷ PRADHAM Sajina, SHIN Seokjoo, KNOW Goo-Rak, PYUN jae-young, HWANG suk-seung. The advanced TOA trilateration algorithms with performance analysis. Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2017. 923–928. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2016.7869184>

Figura 30. Algoritmo avanzado de trilateración.



Fuente: PRADHAM Sajina, SHIN Seokjoo, KNOW Goo-Rak, PYUN jae-young, HWANG suk-seung. The advanced TOA trilateration algorithms with performance analysis. Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2017. 923–928. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2016.7869184>

Siguiendo este orden de ideas y solucionando las ecuaciones 3.12, 3.13 y 3.14 se obtiene:

Ecuación 3.12 menos 3.13

$$(a_1 - a_2)x + (b_1 - b_2)y + (c_1 - c_2) = 0 \quad (3.15)$$

Ecuación 3.13 menos 3.14

$$(a_2 - a_3)x + (b_2 - b_3)y + (c_2 - c_3) = 0 \quad (3.16)$$

Ecuación 3.12 menos 3.14

$$(a_1 - a_3)x + (b_1 - b_3)y + (c_1 - c_3) = 0 \quad (3.17)$$

En la figura 30 se observa la representación gráfica de las ecuaciones (3.15, 3.16, 3.17), como lo expone Pradham et al, “estas funciones modelan las rectas secantes

que pasan por los puntos de intersección de cada una de las circunferencias”⁴⁸, por lo tanto, para encontrar una mejor aproximación del punto de localización del nodo móvil, basta con solucionar dos ecuaciones del anterior sistema lineal.

Al solucionar las ecuaciones 3.16 y 3.17 por el método de igualación se obtiene.

$$x = -\frac{(b_2 - b_3)y + (c_2 - c_3)}{(a_2 - a_3)} \quad (3.18)$$

$$x = -\frac{(b_1 - b_3)y + (c_1 - c_3)}{(a_1 - a_3)} \quad (3.19)$$

Igualando las ecuaciones 3.18 y 3.19 y manipulando algebraicamente se obtienen las coordenadas (X_c, Y_c) de la posición estimada del nodo móvil.

$$Y_c = \frac{(a_2 - a_3)(c_1 - c_3) - (a_1 - a_3)(c_2 - c_3)}{(a_1 - a_3)(b_2 - b_3) - (a_2 - a_3)(b_1 - b_3)} \quad (3.20)$$

$$X_c = \frac{(c_2 - c_3)(b_1 - b_3) - (c_3 - c_2)(b_3 - b_2)}{(a_1 - a_3)(b_2 - b_3) - (a_2 - a_3)(b_1 - b_3)} \quad (3.21)$$

Como lo afirman Pradham et al⁴⁹ Con las expresiones 3.20 y 3.21 se calcula las coordenadas de la posición geográfica del nodo desconocido, además se puede observar que para calcular la posición del objeto desconocido es de vital importancia conocer las distancias de este último a cada uno de las bases estáticas, es decir, X_1, X_2, X_3 .

En el método calcular_posicion (x_1, x_2, x_3) almacenado en el algoritmo del nodo coordinador se realizan los cálculos mostrados anteriormente, este algoritmo recibe como datos de entrada las distancias x_1, x_2, x_3 datos que fueron enviados por las bases estáticas. Para visualizar los resultados obtenidos se creó un archivo (Script) en el cual se declaró el método encargado de graficar las circunferencias definidas

⁴⁸ pradham. Op. Cit., p. 924.

⁴⁹pradham. Op. Cit., p. 924.

por los radios de comunicación entre el nodo móvil y cada una de las bases estáticas.

8.9 Resultados de la simulación del algoritmo de trilateración en truetime.

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema diseñado, en primer lugar, se estableció posiciones geográficas conocidas al nodo móvil, para así analizar los resultados y la precisión del sistema.

En la simulación se estableció las siguientes coordenadas

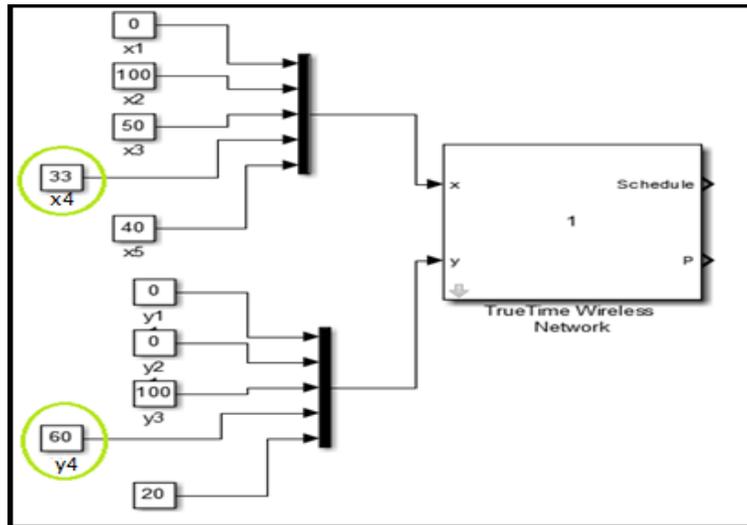
- Coordenada (33,60) metros (simulación 1).
- Coordenada (87,46) metros (simulación 2).

Simulación 1: se estableció la coordenada (33,60) metros y los resultados obtenidos se muestran en las figuras 31 y 32 respectivamente.

La figura 31 muestra el bloque de *TrueTime Wireless Network* junto con las cinco coordenadas para los nodos que conforman la red de localización, en ella se destaca la coordenada $(x4, y4) = (33, 60)$ la cual pertenece al nodo móvil.

Para establecer las coordenadas de los cinco dispositivos se utilizó el bloque *constant*.

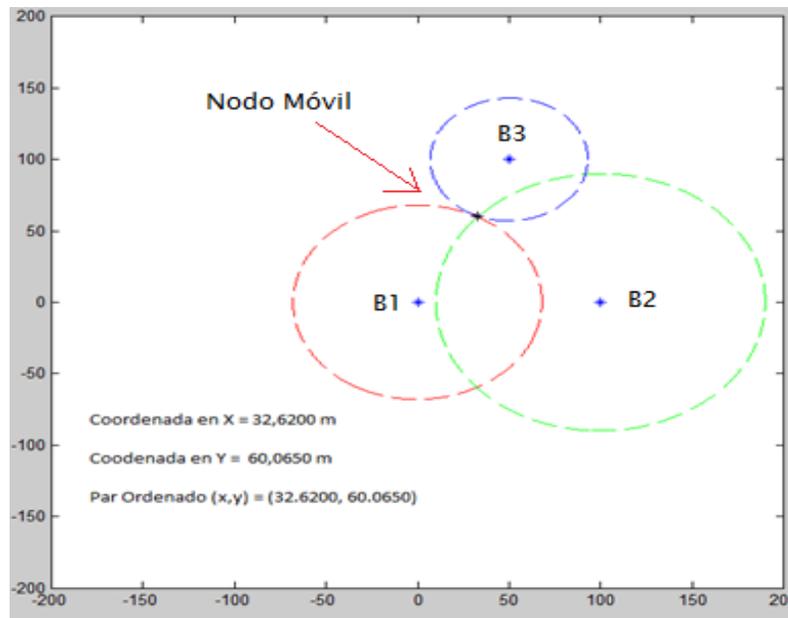
Figura 31. Simulación 1, coordenadas del nodo móvil (33,60)



Fuente: autor

La figura 32 corresponde a los resultados del algoritmo de trilateración para la posición del nodo móvil en la coordenada (33,60), en ella se observan las circunferencias de radios igual a las distancias entre el nodo móvil y las bases estática, de igual forma que la coordenada (32.62, 60.06) resultado del algoritmo.

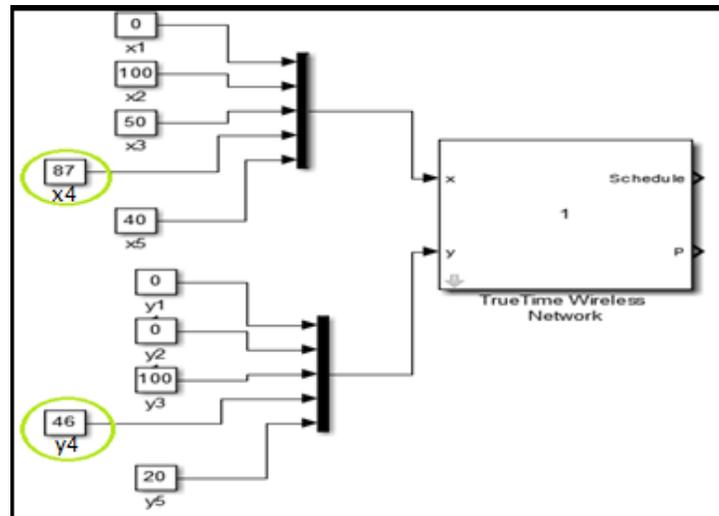
Figura 32. Resultados del algoritmo de trilateración para la coordenada (33,60)



Fuente: autor

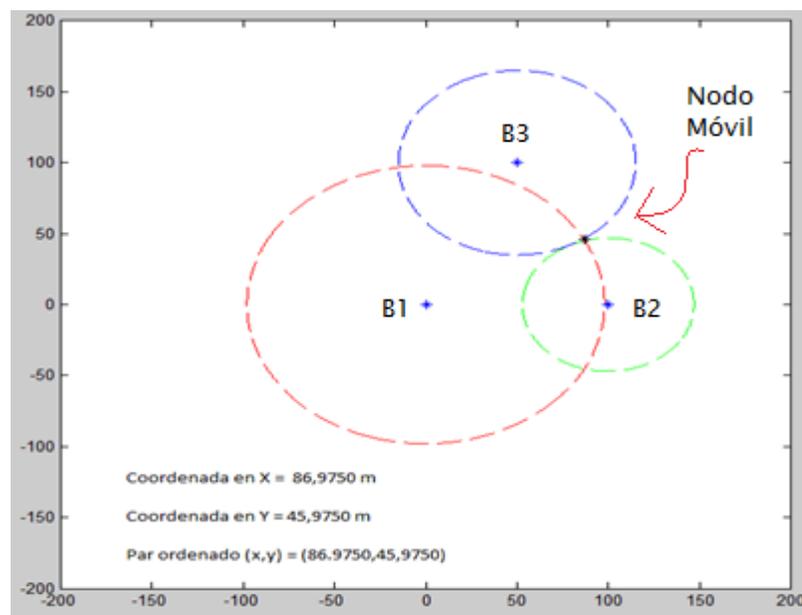
Simulación 2: se estableció la coordenada (87,46) metros, la figura 33 representa las coordenadas de los 5 nodos y la figura 34 muestra los resultados luego de aplicar el algoritmo de trilateración.

Figura 33. Simulación 2, coordenadas del nodo móvil (87,46)



Fuente: autor

Figura 34. Resultados del algoritmo de trilateración para la coordenada (87,46)

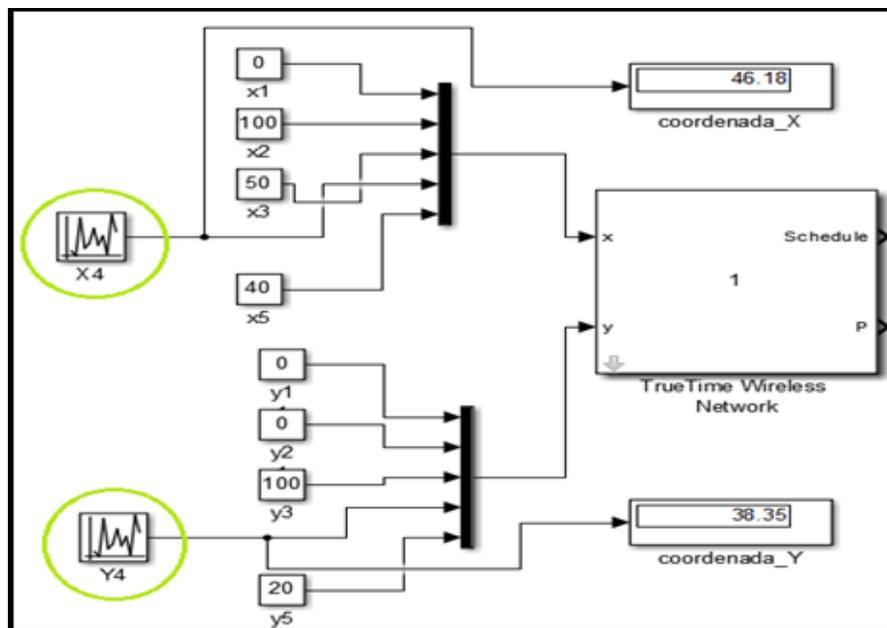


Fuente: autor

Finalmente, se añadieron los bloques *Uniform Random Number* de Simulink para generar un movimiento aleatorio del nodo móvil (x_4, y_4). Se definió un rango máximo de 0 a 100 metros para la coordenada (x, y) con una frecuencia de 1 segundo. Los resultados se muestran en las figuras 35 y 36.

Simulación 3: en la figura 35 se observa como los *bloques Uniform Random Number* (x_4, y_4) generan aleatoriamente la coordenada (46.18, 38.35). En la figura 36 se observa los resultados y la representación gráfica del algoritmo, de igual forma que las coordenadas del nodo móvil luego de aplicar el algoritmo de trilateración.

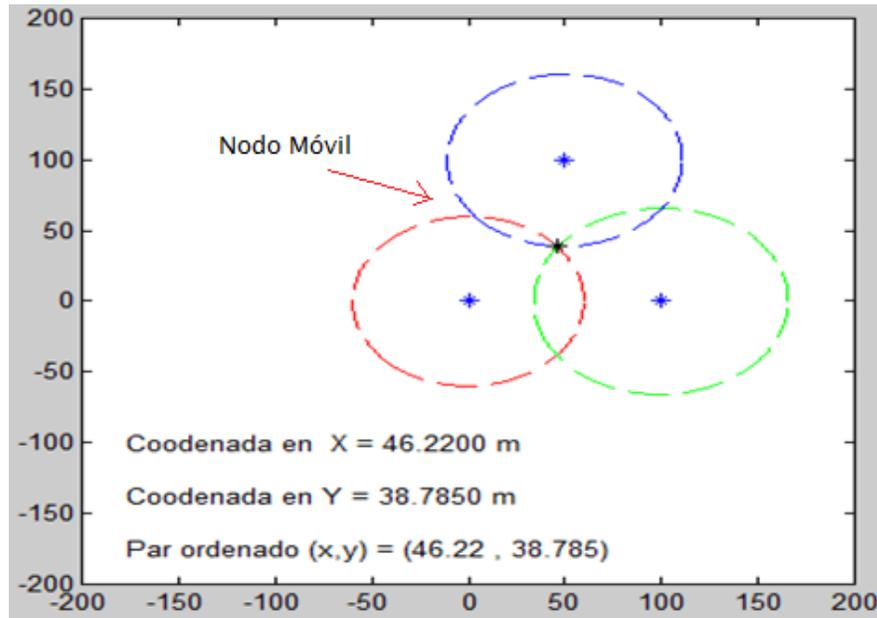
Figura 35. Bloques *Uniform Random Number* de Simulink para generar un movimiento aleatorio del nodo móvil.



Fuente: autor

En comparación con las simulaciones 1 y 2, en la simulación 3 se proporciona el movimiento aleatorio al nodo desconocido, esto debido a que se añadieron los bloques *Uniform Random Number* para la coordenada (x_4, y_4), dichos bloques permiten que el nodo móvil cambie su posición cada segundo dentro de la región de localización. Lo mencionado se resalta en la figura 35.

Figura 36. Representación gráfica de la simulación número 3.



Fuente: autor

En la figura 36 se muestra la coordenada del nodo móvil luego de implementar el algoritmo de trilateración. En el eje x se presenta un error de 0,04 metros y en el eje Y un error de 0,43 metros.

Para una mejor representación sobre el comportamiento del algoritmo de trilateración bajo el método de cálculo de distancias a partir del parámetro RSSI, se tomó diferentes valores en la coordenada del nodo móvil con los bloques *Uniform Random Number*.

En la tabla 2 se registran los resultados de la simulación. Las variables Xreal, Yreal corresponden a la coordenada real del nodo móvil proporcionada por los bloques *Uniform Random Number*, las variables Xsimulación, Ysimulación corresponden a la coordenada del nodo móvil como resultado de aplicar el algoritmo de trilateración, además, se anexan los errores reales y relativos a cada una de las medidas, dichos datos muestran que el error máximo en la coordenada Y es de 3,3 metros, de igual

forma para la coordenada en el eje x se encuentra un error máximo de 3,56 metros, lo cual evidencia la precisión del algoritmo de trilateración.

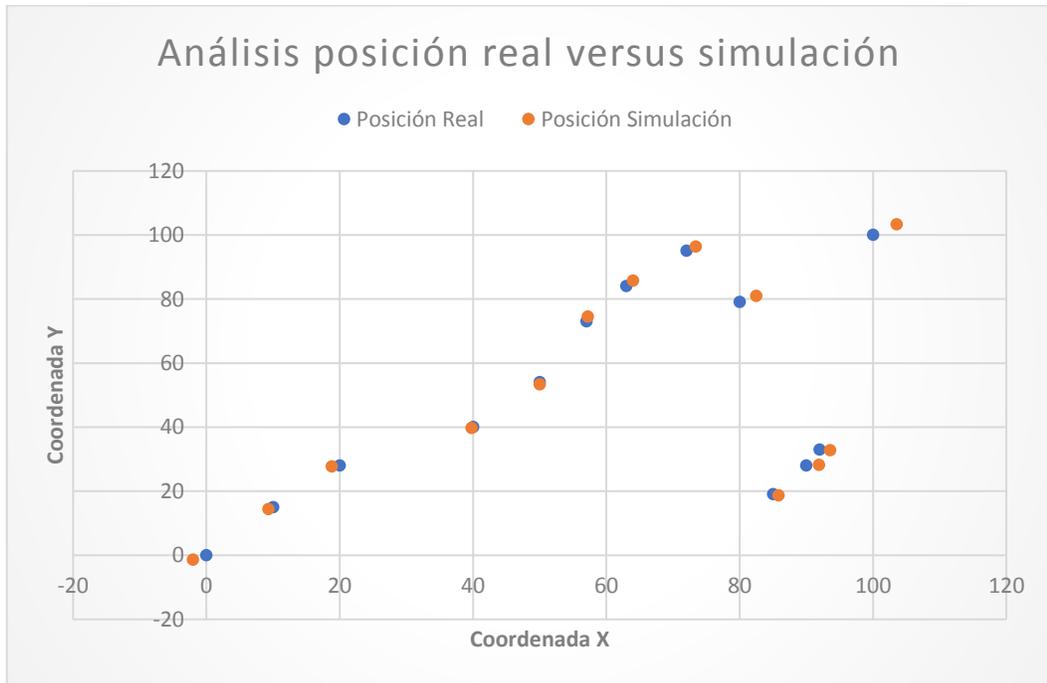
En la figura 37 se muestran los resultados del algoritmo de trilateración.

Tabla 3 Resultados de la simulación para diferentes coordenadas del nodo móvil.

Xreal	Yreal	X_sim	Y_sim	Error Real X	Error Real Y	Error relativo X	Error relativo Y
0	0	-2,015	-1,468	2,015	1,468		
10	15	9,300	14,345	0,700	0,655	0,070	0,043
20	28	18,800	27,675	1,200	0,325	0,060	0,011
40	40	39,760	39,695	0,240	0,305	0,006	0,007
50	54	50,000	53,300	0,000	0,700	0,000	0,012
57	73	57,200	74,435	0,200	1,435	0,003	0,019
63	84	64,000	85,745	1,000	1,745	0,015	0,020
72	95	73,415	96,345	1,415	1,345	0,019	0,014
80	79	82,505	80,892	2,505	1,892	0,031	0,023
85	19	85,840	18,695	0,840	0,305	0,009	0,016
90	28	91,875	28,197	1,875	0,197	0,020	0,007
92	33	93,560	32,725	1,560	0,275	0,016	0,008
100	100	103,56	100,30	3,560	3,300	0,035	0,03

Según la información registrada en la tabla 2, es posible concluir que la precisión del sistema disminuye conforme aumenta la distancia entre el nodo móvil y las bases estáticas, esto debido a la implementación del algoritmo de trilateración bajo el cálculo de distancias a partir del parámetro RSSI.

Figura 37. Movimiento del nodo móvil y su relación entre las coordenadas reales y la simulación en Truetime



Fuente: autor

En la figura 37, los puntos de color azul corresponden a los datos registrados en la tabla 2 para las coordenadas (X_{real} , Y_{real}), de igual forma, los puntos de color naranja representan los datos correspondientes a las coordenadas ($X_{simulación}$, $Y_{simulación}$), los cuales también se encuentran registrados en la tabla 2.

Teniendo en cuenta los datos registrados en la tabla 2 y la figura 37 se concluye que el error real en la precisión del algoritmo de localización crece a una mayor distancia entre el nodo móvil y las bases estáticas, según los resultados, en la coordenada (50,54) el algoritmo dio como resultado la coordenada (50, 53.3) lo cual hace referencia a un error de 0 metros en el eje de las abscisas y 0,3 en el eje de las ordenadas. El mayor error real se presenta en la coordenada (100,100) y en la coordenada (0,0), este último debido a la función logarítmica que modela la distancia en función del parámetro RSSI.

9. IMPLEMENTACIÓN DE LA RED PROTOTIPO DE LOCALIZACIÓN UTILIZANDO REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

En este capítulo se mostrará la implementación del sistema de localización utilizando redes inalámbricas de sensores, de igual forma se evidenciarán los resultados y la precisión del sistema diseñado, además se analizarán las diferencias entre la simulación y la implementación.

9.1 Características generales de la red de localización.

Para la distribución de los nodos en la red se utilizó 5 dispositivos también llamados módulos de comunicación inalámbrica, XBee PRO (S2B), 4 de ellos con conector para antena de alta ganancia RPSMA y uno con antena incorporada. Según el fabricante DIGI⁵⁰ las principales características de comunicación de los módulos son:

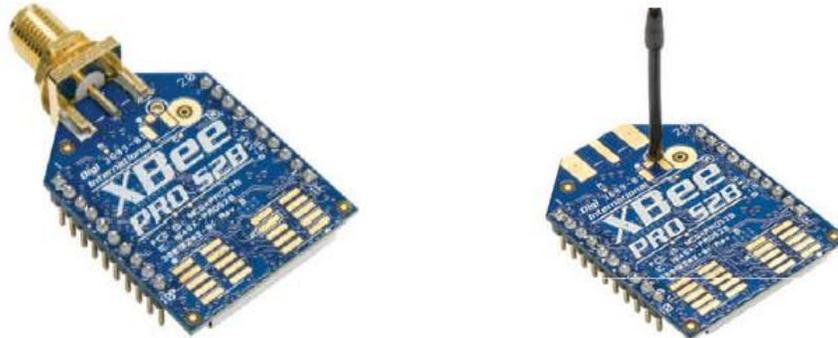
- Rango de comunicación en línea de vista directa: hasta 3200 metros
- Potencia transmitida: 63mW (+18 dBm)
- Velocidad de transmisión: 250,000 b/s: 250 Kb/s
- Sensibilidad del receptor = -102 dBm
- Frecuencia: 2.4 Ghz

4 módulos poseen conector para antena externa RPSMA de alta ganancia, estos dispositivos corresponden al nodo móvil y a las tres bases estáticas para los cuales se utilizaron antenas omnidireccionales de ganancia de 3dB, esto debido a que en pruebas realizadas se observó que con las antenas se obtiene un mejor comportamiento y por ende una mejor medida del parámetro RSSI, lo cual conllevará a una mejor aproximación en la ubicación del nodo desconocido.

La figura 38 corresponde a los módulos de comunicación XBee-PRO S2B utilizados.

⁵⁰ DIGI. XBee/XBee-PRO Zigbee RF Modules User Guide. p. 11. Internet: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>

Figura 38. Módulos XBee PRO S2B con conector para antena externa RPSMA y antena incorporada.



Zaradnik, I (2014). Ilustracion Modulos XBee PRO S2B. Recuperado de <http://www.electrocomponentes.com>

Para realizar la implementación se configuró los dispositivos de la siguiente manera. Un nodo coordinador, según DIGI “Dado que un coordinador es el único tipo de dispositivo que puede iniciar una red, cada red ZigBee debe tener un coordinador. Una vez que el coordinador ha iniciado una red, puede permitir que nuevos dispositivos se unan a la red”⁵¹. Las tres bases estáticas se configuran como routers, permitiendo así que nuevos dispositivos (dispositivos finales) se unan a la red, esta característica permite que se tenga un sistema de localización que abarque una superficie mayor. Por último, se configuró el nodo móvil como un router.

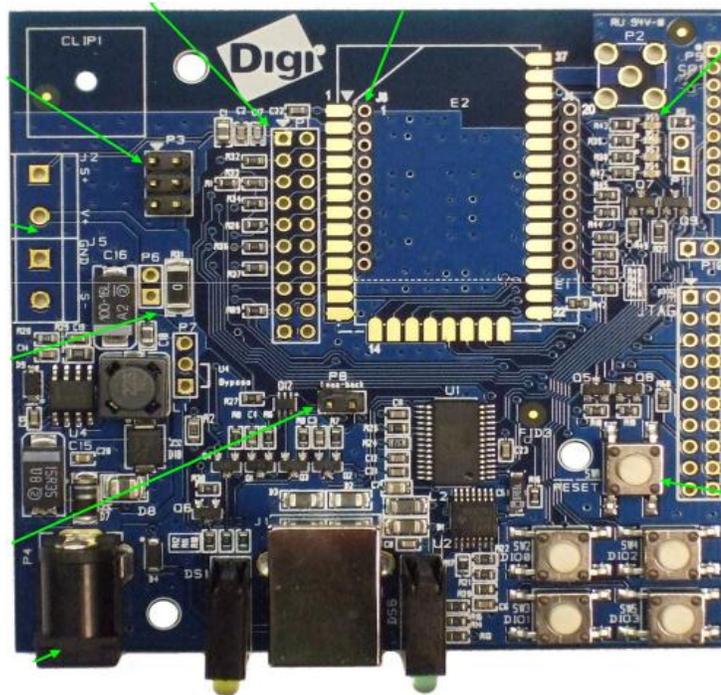
9.2 Configuración de los dispositivos por medio del software XCTU

Para establecer la red y permitir la comunicación de los módulos se configuró una serie de parámetros que definirá el comportamiento de cada nodo, esta configuración se realizó a partir de la interfaz del software XCTU proporcionado por

⁵¹ DIGI. Op. Cit. p. 38.

el fabricante DIGI y placa de interfaz – XBee o tarjeta de desarrollo USB mostrada en la figura 39.

Figura 39. placa de interfaz – XBee.



Zaradnik, I (2014). Ilustracion tarjeta de desarrollo USB. Recuperado de <http://www.electrocomponentes.com>.

Es importante recalcar que todos los modulos se configuraron en modo de operaci3n API, ya que este modo de operaci3n permite direccionar la informaci3n que se esta enviando por medio de tramas que contienen las direcciones MAC dispositivos, de esta forma se tiene un control sobre el flujo y la direcci3n de la informaci3n que se esta transportando en la red.

Los demas parametros configurados para cada dispositivo se explican a continuaci3n.

9.2.1 Nodo coordinador

A continuación, se explicará los diferentes parámetros que se configuró para que uno de los dispositivos cumpla el papel de nodo coordinador en la red de localización.

Figura 40. Configuración de parámetros para el nodo coordinador.

The screenshot displays the XCTU software interface for configuring a ZigBee radio module. The main window shows the 'Radio Configuration' for a coordinator node (COORDINADOR) with the following details:

- Name: COORDINADOR
- Function: ZigBee Coordinator API
- Port: COM3 - 9600/8/N/1/N - API1
- MAC: 0013A20040AFB9BA

The 'Update firmware' dialog is open, showing the selection of the product family (XBP24BSE), function set (ZigBee Coordinator API), and firmware version (21A7 (Newest)).

The 'Radio Configuration' window shows the following parameters:

Parameter	Value
ID PAN ID	1209
SC Scan Channels	7FFF Bitfield
SD Scan Duration	3 exponent
ZS ZigBee Stack Profile	2
NJ Node Join Time	FF x1 sec
OP Operating PAN ID	1209
OI Operating 16-bit PAN ID	3ADA
CH Operating Channel	10
NC Number of Remaining Children	A

The 'Addressing' section shows the following parameters:

Parameter	Value
SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	40AFB9BA
MY 16-bit Network Address	0
DH Destination Address High	0
DL Destination Address Low	FFFF

Fuente: autor

Para el nodo coordinador se configuró los siguientes parámetros. Figura 40.

En primer lugar, se actualizó la opción update y se seleccionó ZigBee Coordinator API, lo cual corresponde a un módulo coordinador en modo de operación Api, en el parámetro PAN ID, se introdujo la dirección 1209, esta dirección debe especificarse en los demás nodos de la red, según DIGI “Cada red se define con un identificador PAN único (PAN ID). Este identificador es común entre todos los dispositivos de la misma red”⁵², ZigBee Stack Profile, un valor de 2 ya que esta es la serie de los módulos inalámbricos, Destination Address High, 0; Destination Address Low, FFFF; estos valores permiten que el nodo coordinador se comunique con todos los dispositivos conectados a la red con dirección PAN ID 1209.

9.2.2 Bases estáticas y nodo móvil

Para las bases estáticas 1, 2 ,3 y el nodo móvil se configuró los siguientes parámetros, los cuales se muestran en la figura 41.

- Update: se seleccionó ZigBee Router API, es decir, se configuró estos dispositivos como routers en modo de operación API.
- PAN ID = 1209.
- ZigBee Stack Profile = 2.
- Channel Verification = enable, se habilita este parámetro para que estos dispositivos verifiquen si existe un coordinador al cual conectarse.
- Destination Address High, 0; Destination Address Low, FFFF.

⁵² DIGI. Op. Cit. p. 36

Figura 41. Configuración de parámetros para las bases estáticas y el nodo móvil.

The image shows the XCTU software interface. The main window displays the 'Radio Configuration' for a device named 'XBEE_BASE_2'. The configuration parameters are as follows:

Parameter	Value
ID PAN ID	1209
SC Scan Channels	7FFF Bitfield
SD Scan Duration	3 exponent
ZS ZigBee Stack Profile	2
NJ Node Join Time	FF x1 sec
NW Network Watchdog Timeout	0 x1 minute
JV Channel Verification	Enabled [1]
JN Join Notification	Disabled [0]
OP Operating PAN ID	0
OI Operating 16-bit PAN ID	FFFF
CH Operating Channel	0
NC Number of Remaining Children	C
SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	40AFB9C4

An 'Update firmware' dialog box is open, showing the following configuration:

Product family	Function set	Firmware version
XBP24BSE	ZigBee End Device API	23A7 (Newest)
XBP24BZ7	ZigBee End Device AT	23A0
	ZigBee Router API	238C
	ZigBee Router AT	2370
	ZigBee Router AT (WALL RT)	
	ZigBee Router/End Device Analog IO	
	ZigBee Router/End Device Digital IO	

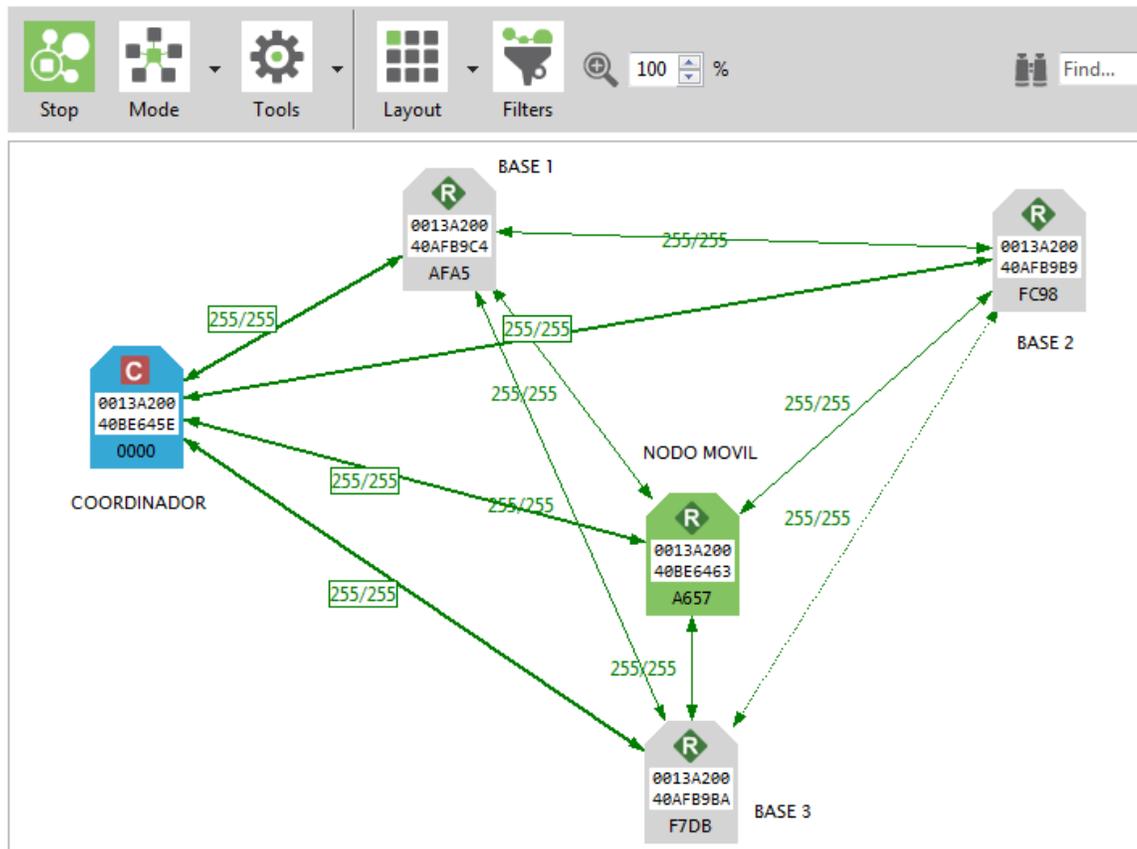
The dialog also includes a 'Force the module to maintain its current configuration' checkbox (checked) and 'Update' and 'Cancel' buttons.

Fuente: autor

9.3 Comunicación de los nodos en la red.

Luego de configurar los dispositivos se procede a verificar la comunicación de la red (figura 42). Para ello se utilizó la herramienta que proporciona el software XCTU, discover radio nodes in the same network, según DIGI XCTU, “esta herramienta permite visualizar todos los nodos conectados a la red”⁵³.

Figura 42. Comunicación de los nodos que conforman la red de localización.



Fuente: autor

En la figura 42 se observan las direcciones MAC de los 5 dispositivos, de igual forma que las conexiones de cada nodo existente en la red, dicha comunicación evidencia un tipo de red ZigBee en malla, según lo expone Digi International Inc. “Un

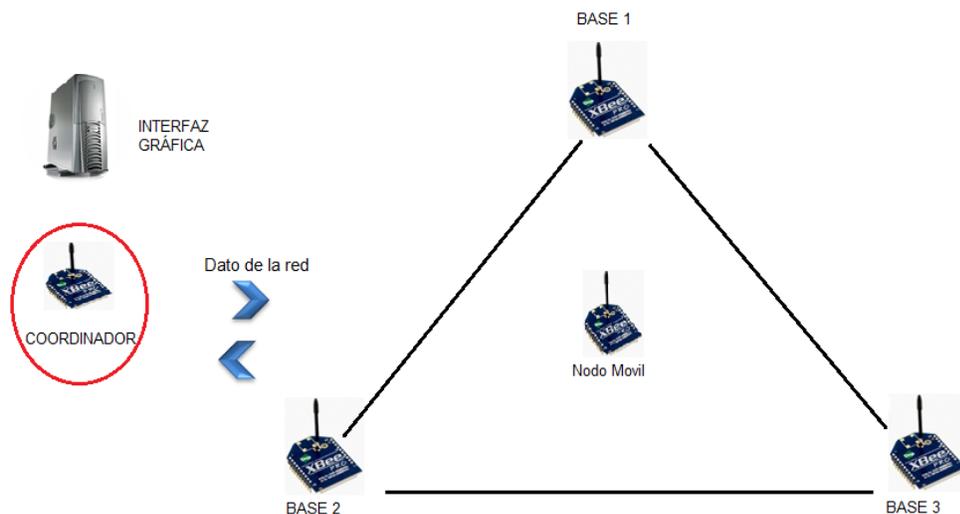
⁵³ DIGI XCTU Configuration and Test Utility Software, Internet: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90001458-13.pdf>

componente clave del protocolo ZigBee es la capacidad de soportar redes de malla. En una red de malla, los nodos están interconectados con otros nodos para que múltiples vías conecten cada nodo. Las conexiones entre nodos se actualizan y optimizan dinámicamente a través de una sofisticada tabla de enrutamiento de malla integrada”⁵⁴. Para la localización geográfica del nodo móvil es necesario que este último se comuniqué con las tres bases estáticas y el nodo coordinador, lo cual se evidencia en la figura 42.

A continuación, se enumeran las direcciones MAC de los módulos XBee PRO S2B que conforman la red de la figura 43.

- Nodo coordinador: 00 13 A2 00 40 BE 64 5E
- Nodo móvil: 00 13 A2 00 40 BE 64 63
- Base estática 1: 00 13 A2 00 40 AF B9 C4
- Base estática 2: 00 13 A2 00 40 AF B9 B9
- Base estática 3: 00 13 A2 00 40 AF B9 BA

Figura 43. Distribución real de la red de localización.



⁵⁴ Digi International Inc. Standards and Technologies, Zigbee Wireless Standard: Zigbee Wireless Mesh Networking. Internet: <https://www.digi.com/resources/standards-and-technologies/zigbee-wireless-standard>

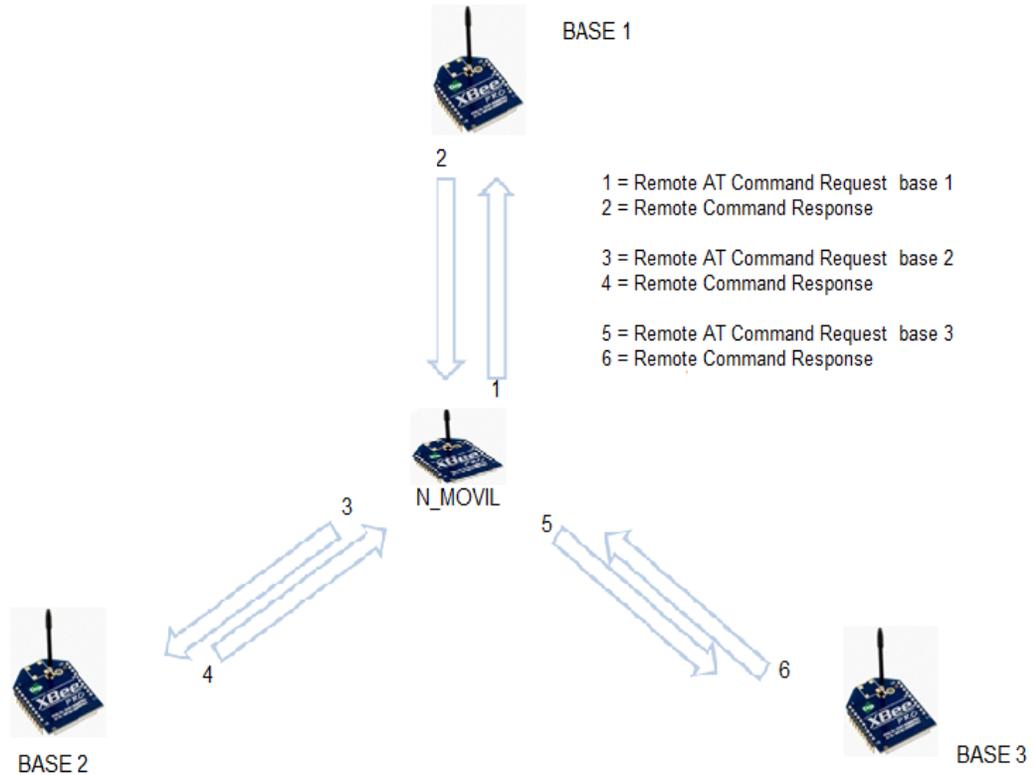
Como se mencionó en apartados anteriores, el proceso fundamental para aplicar el algoritmo de trilateración y encontrar la localización geográfica del nodo desconocido es calcular la distancia entre este último y cada uno de las bases estáticas, para ello se procedió a tomar los indicadores de la potencia de la señal recibida (RSSI) de igual forma que en la simulación.

Para obtener los indicadores de la potencia de la señal recibida se plantea que el nodo móvil obtenga por medio de tramas API los valores RSSI del último mensaje enviado a cada una de las bases estáticas, para ello se configuró los módulos en modo API, según DIGI⁵⁵ “esta configuración permite enviar tramas que definen operaciones o eventos de un nodo, ya sea de manera local o remota”, de este modo desde el nodo móvil obtener los valores RSSI y enviarlos al nodo coordinador.

La figura 44 ilustra la secuencia de paquetes denominados tramas API que envía el nodo móvil a cada una de las bases estáticas (B1, B2, B2) con el objetivo de obtener los parámetros RSSI de los paquetes de datos enviados.

⁵⁵ DIGI. Op. Cit., p. 28.

Figura 44. Comando remoto AT-DB para obtener el valor RSSI.



Fuente: autor

El comando Remote AT Command Request como lo expone DIGI “es un tipo de trama que se utiliza para consultar o configurar los parámetros del módulo en un dispositivo remoto”⁵⁶, de esta manera cuando las bases estáticas reciben esta trama devuelven un mensaje denominado Remote Command Response, según DIGI⁵⁷ “Es la respuesta a un mensaje de comando AT” dicha respuesta lleva consigo el valor RSSI, para obtener este valor y analizar su comportamiento real con respecto a la distancia se crearon las tramas API con la ayuda de la aplicación del software XCTU, XBee API Frames Generator.

⁵⁶ DIGI. Op. Cit., p. 121.

⁵⁷ *Ibíd.*, p. 124.

En la figura 45 se ilustra el procedimiento para crear las tramas Remote AT Command.

Figura 45. Generador de tramas API para obtener el valor RSSI.

XBee API Frames Generator

This tool allows you to generate any kind of API frame and copy its value. Just fill in the required fields.



Protocol: ZigBee Mode: API 1 - API Mode Without Escapes

Frame type: 0x17 - Remote AT Command

Frame parameters:

i Start delimiter	7E
i Length	00 0F
i Frame type	17
i Frame ID	01
i 64-bit dest. address	00 13 A2 00 40 AF B9 C4
i 16-bit dest. address	FF FE
i Remote cmd. options	02
i AT command	ASCII HEX DB

Generated frame:

7E 00 0F 17 01 00 13 A2 00 40 AF B9 C4 FF FE 02 44 42 41

Fuente: autor

Primeramente, se debe especificar el protocolo de comunicación ZigBee, posteriormente, el tipo de trama, el cual corresponde a Remote AT Command. Luego, se debe definir la dirección MAC del nodo al cual se va a enviar la trama,

para este caso la base estática 1 (00 13 A2 00 40 AF B9 C4), finalmente se debe definir el comando AT, para lo cual se declaró la instrucción DB, según DIGI “este comando informa la intensidad de la señal recibida del último paquete de datos RF”⁵⁸. Después de realizar los anteriores pasos, la herramienta XBee API Frames Generator devuelve la trama API (7E 00 0F 17 01 00 13 A2 00 40 AF B9 C4 FF FE 02 44 42 41) que permite obtener desde el nodo móvil el valor RSSI del mensaje enviado por este último a la base estática número 1. Para crear las tramas API de las bases estáticas 2 y 3 se realizó el mismo procedimiento con las respectivas direcciones MAC. A continuación, se muestran las tramas API enviadas por el nodo móvil.

Remote AT Command (base 1) = 7E 00 0F 17 01 00 13 A2 00 40 AF B9 C4 FF FE 02 44 42 41

Remote AT Command (base2) = 7E 00 0F 17 01 00 13 A2 00 40 AF B9 B9 FF FE 02 44 42 4C

Remote AT Command (base3) = 7E 00 0F 17 01 00 13 A2 00 40 AF B9 BA FF FE 02 44 42 4B

Posteriormente a la creación de las tramas API que permiten obtener el parámetro RSSI se procedió a obtener estos valores de la siguiente manera.

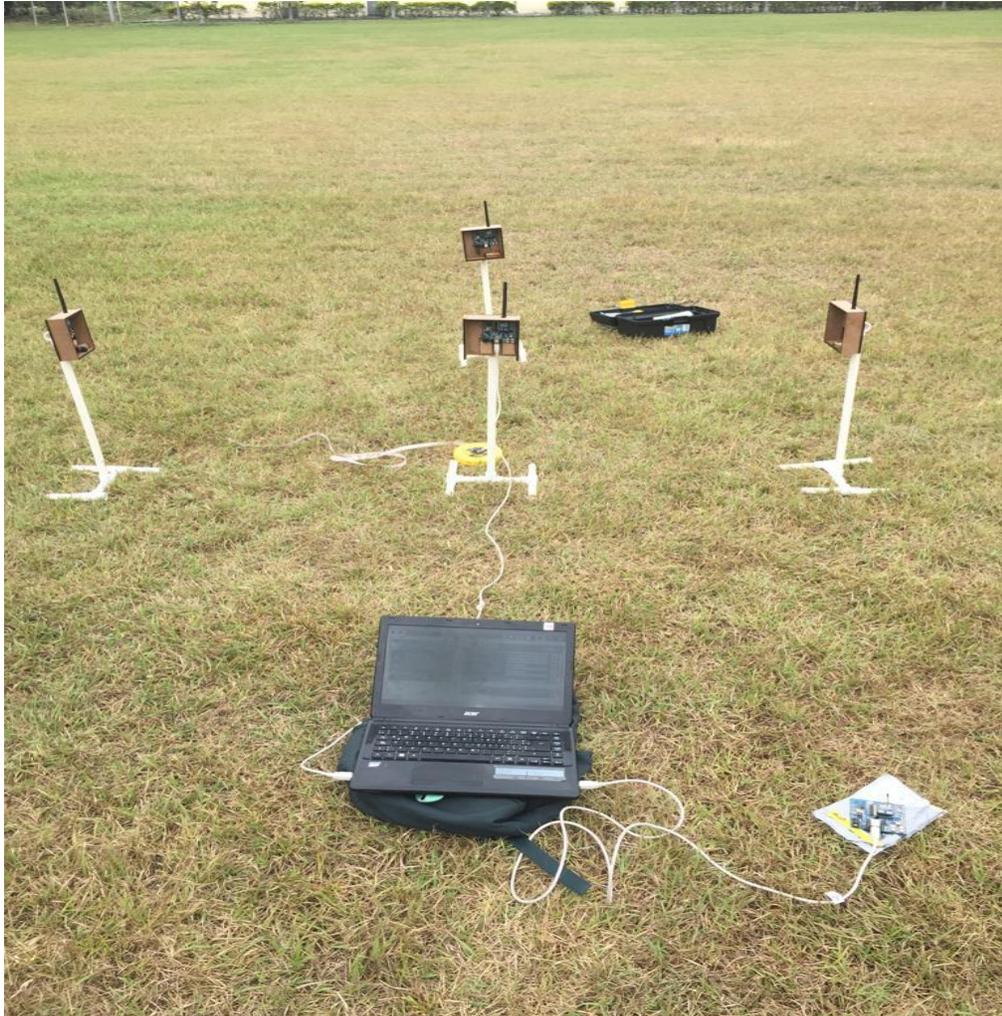
9.4 Toma de datos del indicador de la potencia de la señal recibida (RSSI)

Es necesario tener los datos del comportamiento del valor RSSI en función de la distancia, para lo cual se realizó las mediciones distancia-potencia en las instalaciones de la cancha de fútbol de la Unidad Central del Valle del Cauca “UCEVA”, se registró los datos correspondientes a las medidas del valor RSSI con

⁵⁸ DIGI. Op. Cit., p. 162.

un rango de 0 a 100 metros con saltos equidistantes de 5 metros entre el nodo móvil y cada una de las bases estáticas. Las figuras 46 y 47 ilustran el ambiente en el cual se realizó la toma de los datos.

Figura 46. Medición del valor RSSI 1 metro de distancia.



La figura 46, muestra el procedimiento real que se realizó para obtener el valor RSSI de las bases estáticas a un metro de distancia con respecto al nodo móvil, este último se encuentra en la posición central y las bases estáticas rodean a este dispositivo.

Figura 47. Medición del valor RSSI 5 metros de distancia.



El proceso de medición consistió en ubicar el nodo móvil en una posición fija conectado al computador y enlazado en la interfaz del software XCTU (figura 47) posteriormente se alejó una de las bases estáticas 5 metros. Luego, se envió una secuencia de 5 repeticiones de las tramas API Remote AT Command con intervalos de transmisión de 500 milisegundos para así obtener 5 valores RSSI y promediar el indicador de la potencia de la señal recibida en los primeros 5 metros. Este procedimiento se repitió hasta llegar a una distancia de 100 metros entre el nodo móvil y la base estática número 1. La figura 48 muestra la interfaz XCTU conectada al nodo móvil, de igual forma, la transmisión y recepción de las tramas API a una distancia de 5 metros con las bases estáticas.

Figura 48. Transmisión y recepción de tramas en el nodo móvil.

NODO_MOVIL - 0013A20040BE6463

The interface displays the following data:

ID	Time	Length	Frame
0	12:07:16.902	15	Remote AT Command Request
1	12:07:16.982	16	Remote Command Response
2	12:07:47.547	15	Remote AT Command Request
3	12:07:47.643	16	Remote Command Response
4	12:08:16.049	15	Remote AT Command Request
5	12:08:16.138	16	Remote Command Response
6	12:09:02.900	15	Remote AT Command Request
7	12:09:02.956	16	Remote Command Response

Frame details for ID 1:

- AT Command: 44 42 (DB)
- Status: 00 (Status OK)
- Response: 22
- Checksum: 38

Send frames table:

Name	Type
RSSI 1	Remote AT Command Request

Fuente: autor

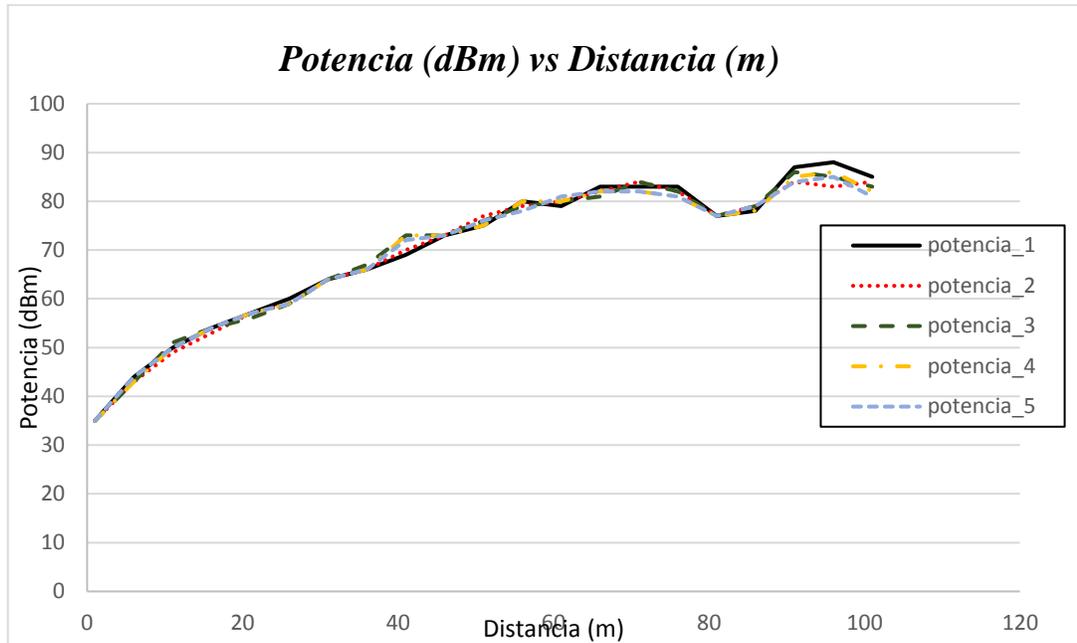
En la información mostrada se resalta el envío de las tramas API, de igual forma que la recepción del comando remoto de respuesta de la base estática número 1, en el cual se obtiene un valor RSSI de 22 dBm. Este dato hexadecimal corresponde al valor absoluto del parámetro RSSI del último paquete recibido por dicha base. Por facilidades en futuros cálculos todos los resultados se pasan del sistema hexadecimal al sistema de numeración decimal, por ende, 22 dBm corresponden 34 dBm. Los resultados de las mediciones se registran en la tabla 3.

Tabla 4 Relación entre la distancia y la potencia del último mensaje recibido (RSSI)

Distancia(m)	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	Potencia Promedio(dBm)
1	35	35	34	34	35	34,6
6	44	43	43	43	44	43,4
11	50	49	51	50	50	50,0
16	54	53	54	54	54	53,8
21	57	57	56	57	57	56,8
26	60	59	59	59	59	59,2
31	64	64	64	64	64	64,0
36	66	66	67	66	66	66,2
41	69	70	73	73	72	71,4
46	73	73	73	73	73	74,6
51	73	77	73	74	76	75,8
56	80	79	79	80	78	79,2
61	79	80	80	80	81	80,0
66	83	82	81	82	82	82,0
71	83	84	84	82	82	83,0
76	83	82	82	81	81	81,8
81	77	77	77	77	77	77,0
86	78	79	79	78	79	78,6
91	87	84	86	85	84	85,2
96	88	83	85	86	85	85,4
101	85	84	83	82	81	83,0

En la figura 49 se representan los datos registrados en la tabla 3, se observa un comportamiento estable hasta aproximadamente los 46 metros de distancia, lo cual es de gran importancia para la precisión del sistema.

Figura 49. Relación potencia distancia.



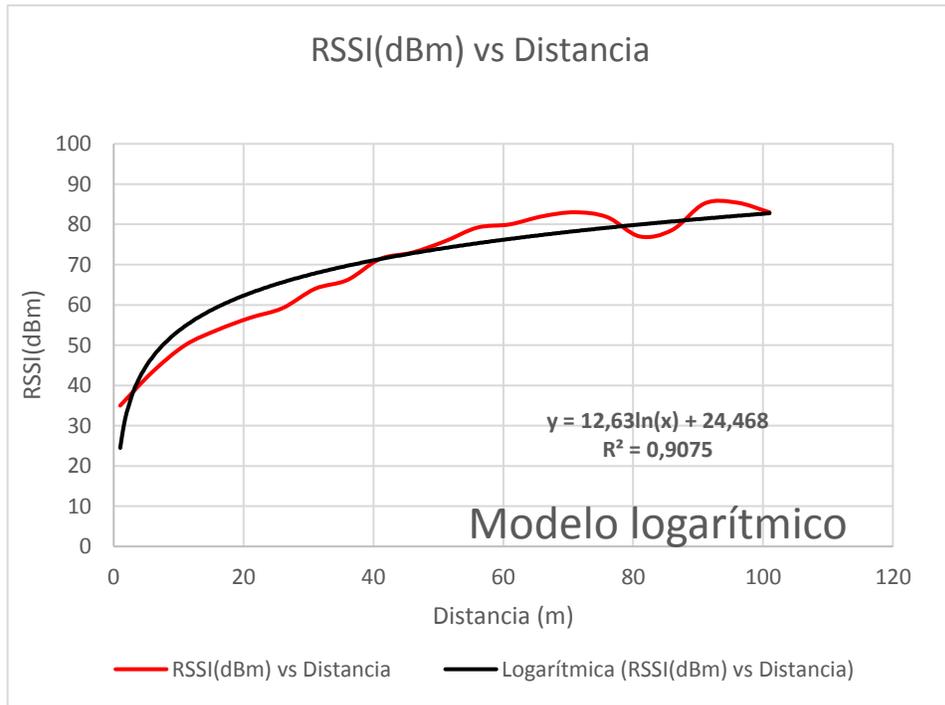
Fuente: autor

Con los datos registrados en la tabla 3 se procede a encontrar un modelo matemático que relacione el indicador de la potencia RSSI en función de la distancia, para ello se realizó una comparación entre la potencia promedio registrada en la tabla 3 y las regresiones logarítmica, potencial y polinomial de grado dos suministradas por el software Excel. A continuación, se presentan los resultados.

9.5 Graficas potencia (RSSI) vs distancia modelos logarítmicos, polinomial y potencial.

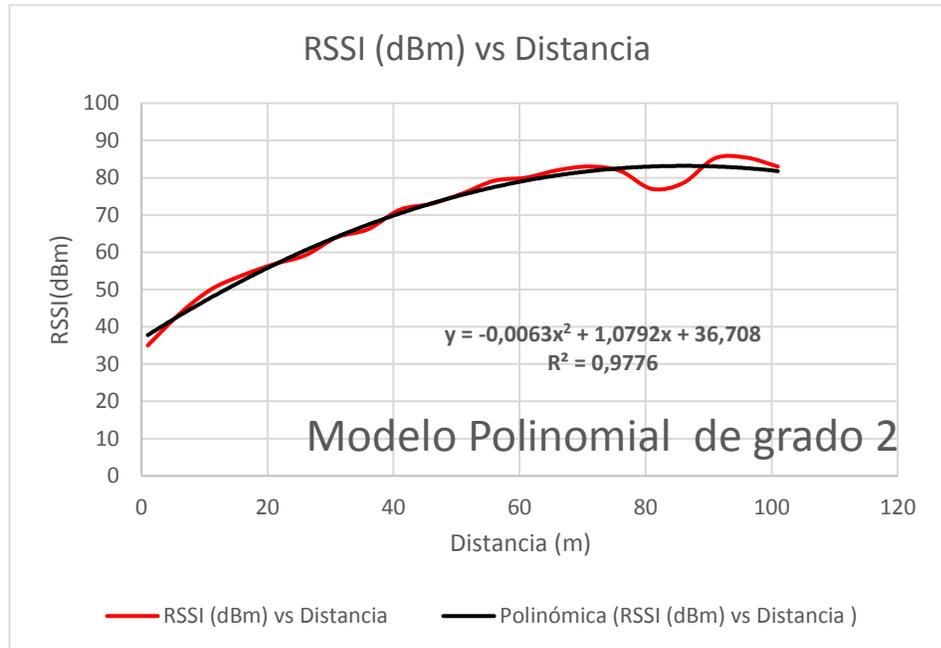
Para tener una mejor claridad sobre el modelo matemático que aproxime con mejor precisión los datos de la potencia promedio se presentan las gráficas potencia vs distancia con las respectivas regresiones logarítmicas, polinomial y potencial en las figuras 50, 51 y 52 respectivamente

Figura 50. Modelo logarítmico para la aproximación de la potencia promedio.



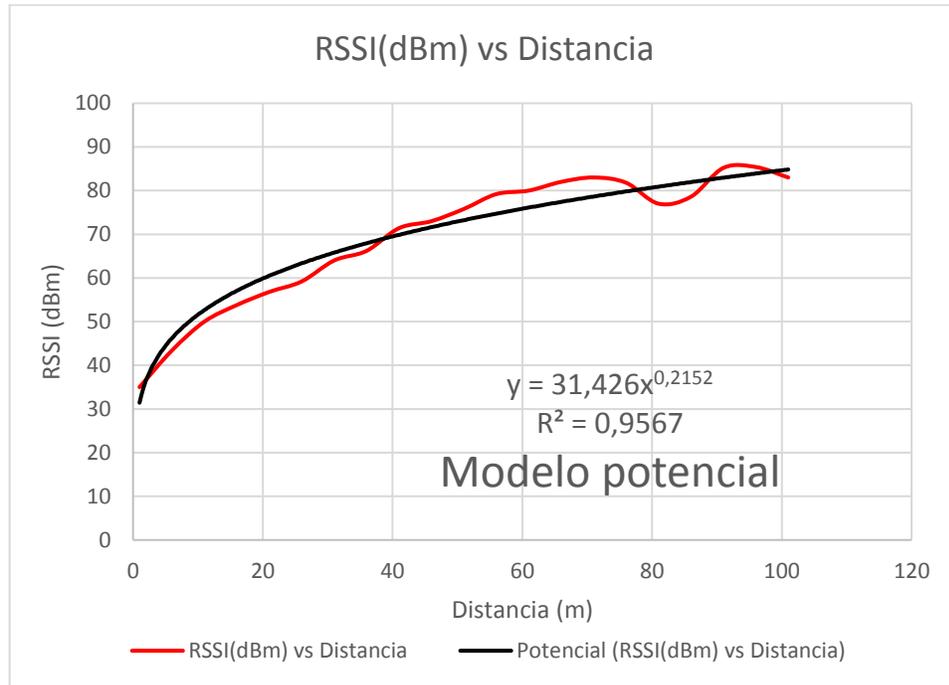
Fuente: autor

Figura 51. Modelo polinomial de grado 2 para la aproximación de la potencia promedio.



Fuente: autor

Figura 52. Modelo potencial para la aproximación de la potencia promedio.



Fuente: autor

Con las ecuaciones de las figuras 50, 51 y 52 se pretende modelar la potencia promedio (RSSI) en función de la distancia, para ello se realizó un análisis donde se comparan los diferentes modelos y sus respectivos errores reales con respecto al valor RSSI promedio.

La tabla 4 muestra la comparación entre la potencia promedio y los modelos logarítmicos, polinomial, potencial y potencial respectivamente. Además, se muestra el error real para cada uno de los modelos, el cual se calculó con la siguiente expresión.

$$Error\ Real = |potencia\ promedio - modelo| \quad (4.1)$$

Tabla 5 Comparación de los errores reales en la medición de la potencia con los modelos logarítmicos, polinomial y potencial.

potencia promedio	modelo logarítmico	Error real modelo Logarítmico	modelo polinomial	Error real modelo polinomial	modelo potencial	Error real modelo potencial
34,6	24,468	10,532	37,7809	2,7809	31,426	3,574
43,4	47,097	3,697	42,956	0,443	46,211	2,811
50,0	54,753	4,753	47,816	2,183	52,649	2,649
53,8	59,485	5,685	52,362	1,437	57,071	3,271
56,8	62,920	6,120	56,592	0,207	60,510	3,710
59,2	65,617	6,417	60,508	1,308	63,356	4,156
64,0	67,839	3,839	64,108	0,108	65,800	1,800
66,2	69,727	3,527	67,394	1,194	67,952	1,752
71,4	71,370	0,029	70,364	1,035	69,881	1,518
74,6	72,823	0,176	73,020	0,020	71,633	1,366
75,8	74,126	1,673	75,360	0,439	73,241	2,558
79,2	75,308	3,891	77,386	1,813	74,730	4,469
80,0	76,388	3,611	79,096	0,903	76,118	3,881
82,0	77,383	4,616	80,492	1,507	77,420	4,579
83,0	78,305	4,694	81,572	1,427	78,646	4,353
81,8	79,165	2,634	82,338	0,538	79,806	1,993
77,0	79,969	2,969	82,788	5,788	80,908	3,908
78,6	80,726	2,126	82,924	4,324	81,958	3,358
85,2	81,4401	3,759	82,744	2,455	82,961	2,238
85,4	82,115	3,284	82,250	3,149	83,921	1,478
83,0	82,756	0,243	81,440	1,559	84,843	1,843

Teniendo en cuenta los datos registrados en la tabla 4 y las figuras 50, 51 y 52, se concluye que el modelo polinomial de grado dos presenta menor error real, lo cual hace que el cálculo de la distancia entre el nodo móvil y las bases estáticas tenga mayor precisión, sin embargo, este modelo no permite predecir valores para distancias mayores (valores futuros), además se requiere de cálculos adicionales para encontrar la distancia en función de los valores RSSI, lo que puede presentar datos incorrectos o irreales por tratarse de una función cuadrática. Por tal motivo, y según afirma Gálvez⁵⁹ en su artículo “Modelo matemático de Gompertz, para el crecimiento de aves. Caracterización”, es posible encontrar un modelo matemático por medio de ecuaciones diferenciales ordinarias a partir de los datos registrados en la tabla 4 y de esta manera mejorar la precisión del sistema. A continuación, se explica tal procedimiento.

En primer lugar, se procede a encontrar la derivada numérica del valor RSSI utilizando para ello la fórmula de las diferencias divididas centrada a 3 puntos según se expone en Burden y Faires⁶⁰.

$$f'(x_a) = \frac{f(x_{a+1}) - f(x_{a-1})}{2\Delta x} \quad (4.2)$$

Donde a representa la posición de un valor de la potencia en la tabla 5, $a+1$ el dato siguiente y $a-1$ el dato anterior. En este caso la potencia es una variable que depende de la distancia, es decir, $P=f(x)$, además, los datos se tomaron en intervalos equidistantes a 5 metros, por lo tanto, $\Delta x=5m$. Con lo expuesto anteriormente se obtiene la siguiente expresión.

$$f'(x) = P'(x) = \frac{dP}{dx} = \frac{\Delta P}{2\Delta x} \quad (4.3)$$

Con el fin de obtener mayor información sobre el comportamiento de los datos se encuentra la tasa relativa de la potencia con respecto a la distancia.

⁵⁹ GÁLVEZ Luis, Modelo matemático de Gompertz, para el crecimiento de aves. Caracterización. Scientia et Technica 2011, universidad tecnológica de Pereira. P 1-8. https://www.academia.edu/30176414/Gompertz_mathematical_model_for_the_growth_of_poultry_Characterization?auto=download

⁶⁰ BURDEN Richard, Faires, J, Douglas, Análisis numérico. 7ma ed. P.171. Thomson Learning, 2004. ISBN: 970-686-134-3.

$$\frac{P'(x)}{P} = \frac{1}{P} \frac{dP}{dx} = \frac{1}{P} \frac{\Delta P}{2\Delta x} \quad (4.4)$$

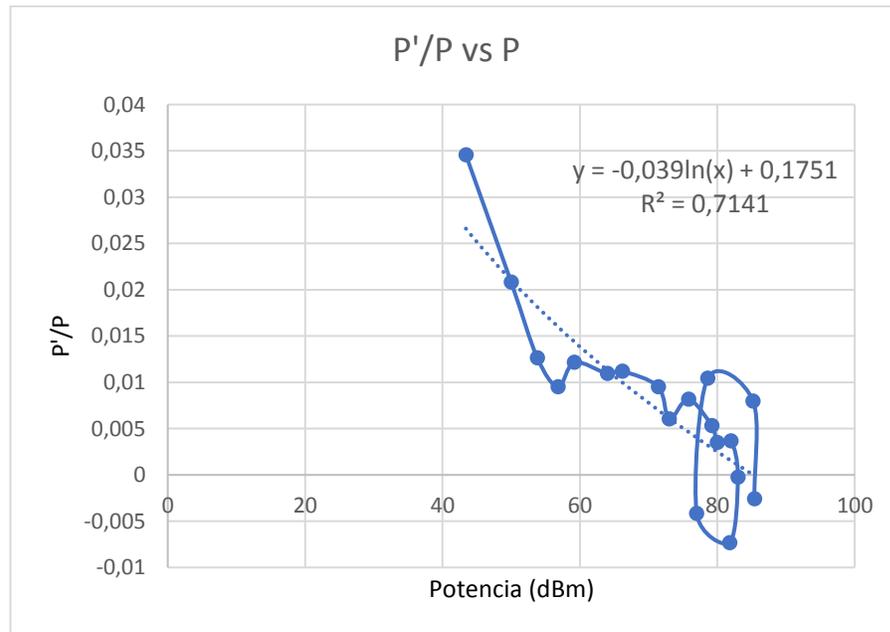
Con la expresión (4.4) se calcula la tasa relativa de la potencia en función de la distancia y se registran los datos en la tabla 5.

Tabla 6 Cálculo de la tasa relativa de la potencia promedio en función de la distancia.

P(dBm)	ΔP	$\Delta P/2\Delta x$	P'/P
34,6			
43,4	15,4	1,54	0,0354
50	10,4	1,04	0,0208
53,8	6,8	0,68	0,0126
56,8	5,4	0,54	0,00950
59,2	7,2	0,72	0,0121
64	7	0,7	0,0109
66,2	7,4	0,74	0,0111
71,4	6,8	0,68	0,0095
74,6	4,4	0,44	0,0060
75,8	6,2	0,62	0,0081
79,2	4,2	0,42	0,0053
80	2,8	0,28	0,0035
82	3	0,3	0,0036
83	-0,2	-0,02	-0,0002
81,8	-6	-0,6	-0,0073
77	-3,2	-0,32	-0,0041
78,6	8,2	0,82	0,0104
85,2	6,8	0,68	0,0079
85,4	-2,2	-0,22	-0,00257
83			

Cabe recalcar que el primer y último valor de la derivada numérica no se puede encontrar debido al método utilizado (diferencias divididas centradas a 3 puntos). Luego de encontrar la tasa relativa de la potencia con respecto a la distancia se procede a encontrar un modelo que aproxime mejor estos valores. El modelo con una mayor precisión fue el logarítmico.

Figura 53. Tasa relativa de la potencia con respecto a la distancia.



Fuente: autor

La figura 53 muestra la representación gráfica de la tasa relativa de la potencia con respecto a la distancia y el modelo matemático que mejor relaciona estas variables. Para este caso se utilizó la regresión logarítmica que proporciona EXCEL. A partir del modelo logarítmico se obtiene la ecuación diferencial lineal (4.5) que modela la relación entre la potencia promedio y la distancia.

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dx} = -0,039 \ln(P) + 0,1751 \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dx} = a \ln(P) + b \quad (4.6)$$

Donde $a=-0.038$ y $b=0,1751$ son los coeficientes de la ecuación logarítmica proporcionada por el software Excel. Si se organizan los términos de la ecuación diferencial (4.6) se tiene la siguiente expresión.

$$\frac{dP}{P(a \ln(P) + b)} = dx \quad (4.7)$$

Al resolver la ecuación diferencial según se expone en Zill⁶¹, por el método de variables separables se obtiene la siguiente función exponencial.

$$P = ke^{\beta e^{ax}} \quad (4.8)$$

Donde

$$k = e^{-\frac{b}{a}} \quad (4.9)$$

$$c = \frac{1}{a} \ln[a \ln(p_0) + b] - x_0 \quad (4.10)$$

$$\beta = \frac{1}{a} e^{ac} \quad (4.11)$$

P_0 y x_0 Son las condiciones iniciales que se encuentran registradas en la tabla 5. Teniendo en cuenta los valores registrados en la tabla 5 se calculan los parámetros que describen el comportamiento de la función que relacionan la potencia y la distancia. Los resultados se muestran a continuación.

⁶¹ ZILL Dennis. Ecuaciones diferenciales: con aplicaciones de modelado. 6ta ed. México D.F. International Thomson Editores, 1997. ISBN: 968-7529-21-0.

$$k = e^{-\frac{b}{a}} = e^{-\frac{0,1751}{-0,039}} = 89,0986 \quad (4.12)$$

$$c = \left(\frac{1}{-0,039} \right) \ln[-0,039 \ln(34,6) + 0,1751] - 1 = 83,9243 \quad (4.13)$$

De esta manera, el modelo que aproxima la relación entre potencia y distancia es el siguiente

$$P(x) = 89,0986 e^{-0,9715e^{-0,039x}} \quad (4.14)$$

Por la necesidad del proyecto, se requiere que la distancia (x) entre el nodo móvil y las bases estáticas se determine en función de la potencia (P). Por tanto, la ecuación anterior se organiza de la siguiente manera.

$$x = \frac{1}{-0,039} \ln[-0,039 \ln(P) + 0,1751] - 83,9243 \quad (4.15)$$

Con la ecuación (4.15) es posible calcular la distancia en tiempo real que separa el nodo móvil de cada una de las bases estáticas.

Antes de realizar un cuadro comparativo sobre los datos reales y el modelo aproximado, es importante mencionar que de acuerdo con la ecuación de transmisión de espacio libre de Friis según se expone en Balanis “la intensidad de la señal detectada disminuye de forma cuadrática con la distancia al remitente”⁶², además, existen modelos empíricos que relación el indicador de la potencia (RSSI) en función de la distancia, según Zhang, Shrestha y Wahid⁶³ en su artículo An Efficient Algorithm for Localization Using RSSI Based on ZigBee, el modelo (4.16) se puede utilizar para encontrar el valor RSSI (dBm) en función de la distancia (metros).

⁶² BALANIS Constantine. *ANTENNA THEORY, analysis and desing. 3ra ed. New Jersey*, wiley-interscience, 2005. ISBN: 9786468600.

⁶³ ZHANG Xuechao, SHRESTHA Ravi, WAHID Khan, An Efficient Algorithm for Localization Using RSSI Based on ZigBee. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2015, P. 366-369. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7129304>

$$p_r(d) = p_{ro}(\text{dBm}) - 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (4.16)$$

Donde p_r es la potencia del receptor medida en dBm, $p_{ro}(\text{dBm})$ es la potencia de referencia, d es la distancia entre el emisor y el receptor y d_0 es la distancia referencia. Si se asume que la potencia de referencia se calcula a un metro de distancia, la ecuación (4.16) se puede simplificar como.

$$\text{RSSI} = A - 10n\log(x) \quad (4.17)$$

Donde A es la potencia de la señal (RSSI) a un metro de distancia y n es un parámetro para simular el entorno, según rappaport “el valor de este parámetro oscila entre 2.0 y 6.0”⁶⁴. Para el proyecto se seleccionó un valor de 2,5. De esta manera se obtiene la expresión (4.18). De igual forma, es impórtate recalcar que el valor RSSI obtenido de los módulos XBee hace referencia al valor absoluto del indicador de la potencia de la señal recibida, por tal motivo el signo de la expresión cambia, tal y como se muestra a continuación.

$$P = 35 + 25\log(x) \quad (4.18)$$

De esta manera se registran en la tabla 6 los datos obtenidos a partir de los anteriores modelos matemáticos.

- Potencia promedio real.
- Modelo aproximado por la ecuación diferencial.
- Modelo ideal.

⁶⁴ RAPPAPORT Theodore. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2da ed. Upper Saddle River, NJ, USA. Prentice Hall, 2001. P. 104. ISBN: 0130422320

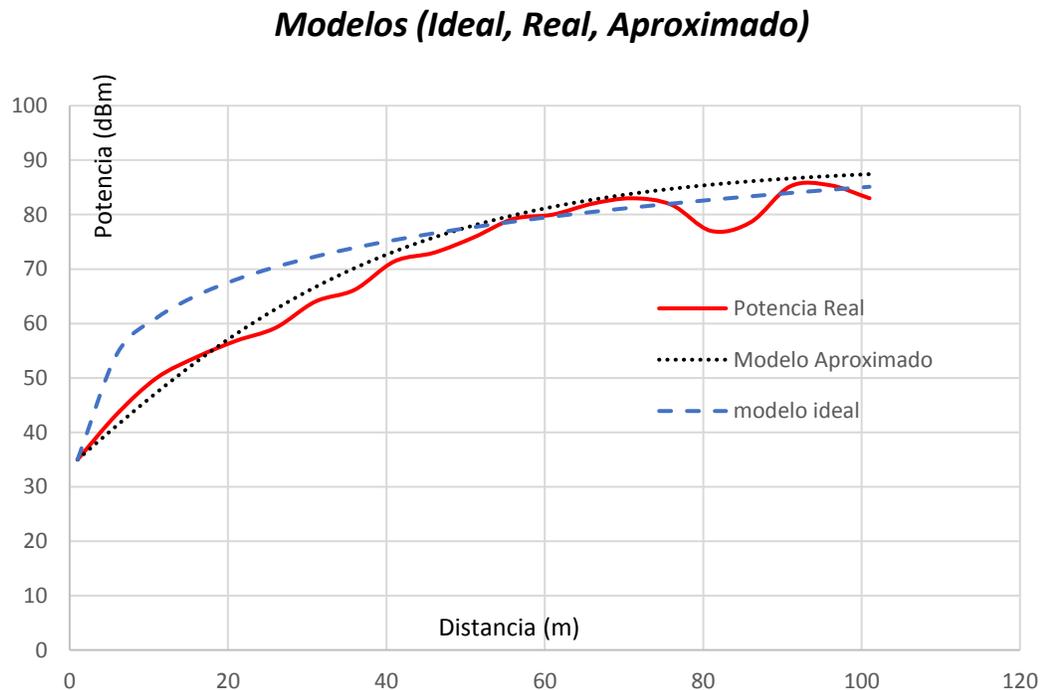
Tabla 7 Relación entre la distancia y la potencia del último mensaje recibido (RSSI)

Distancia(m)	Modelo ideal empírico	Potencia Promedio Real (dBm)	Modelo ecuación diferencial
1	35,0000	34,6000	34,9999
6	54,4537	43,4000	41,3011
11	61,0348	50,0000	47,3281
16	65,1029	53,8000	52,9414
21	68,0554	56,8000	58,0561
26	70,374	59,2000	62,63327
31	72,2840	64,0000	66,6688
36	73,9075	66,2000	70,1837
41	75,3195	71,4000	73,2144
46	76,5689	74,6000	75,8061
51	77,6892	75,8000	78,0073
56	78,7047	79,2000	79,8664
61	79,6332	80,0000	81,4293
66	80,4885	82,0000	82,7382
71	81,2814	83,0000	83,83100
76	82,0203	81,8000	84,7409
81	82,7121	77,0000	85,4971
86	83,3624	78,6000	86,1244
91	83,9760	85,2000	86,6440
96	84,5567	85,4000	87,0738
101	85,1080	83,0000	87,4292

En la figura 54 se observa la comparación entre los modelos ideal, real y aproximado que relacionan la potencia en función de la distancia entre el nodo móvil y las bases estáticas, según las gráficas se concluye que el modelo calculado por el método de

las ecuaciones diferenciales se asemeja a los datos reales lo cual genera una buena precisión en el sistema.

Figura 54. Comparación modelos real, aproximado e ideal.



Fuente: autor

Con el modelo aproximado a partir de la ecuación diferencial se calculan las distancias entre el nodo móvil y las bases estáticas para así aplicar el algoritmo de trilateración que permita encontrar la posición geográfica del nodo desconocido. Con la ecuación (4.15) es posible predecir la distancia que separa el nodo móvil y cada una de las bases estáticas a partir del indicador de la potencia de la señal recibida.

10. RESULTADOS PROTOTIPO FINAL

Para las pruebas finales de la red prototipo de localización se ubicó los módulos correspondientes a las bases estáticas y el nodo móvil en estructuras de 60 cm de altura construidas en tubos de PVC, además, como fuente de alimentación de las placas de interfaz – XBee y los dispositivos se empleó baterías de 9 voltios con su respectivo conector de cable de alimentación. La figura 55 ilustra la estructura elaborada para cada uno de los dispositivos.

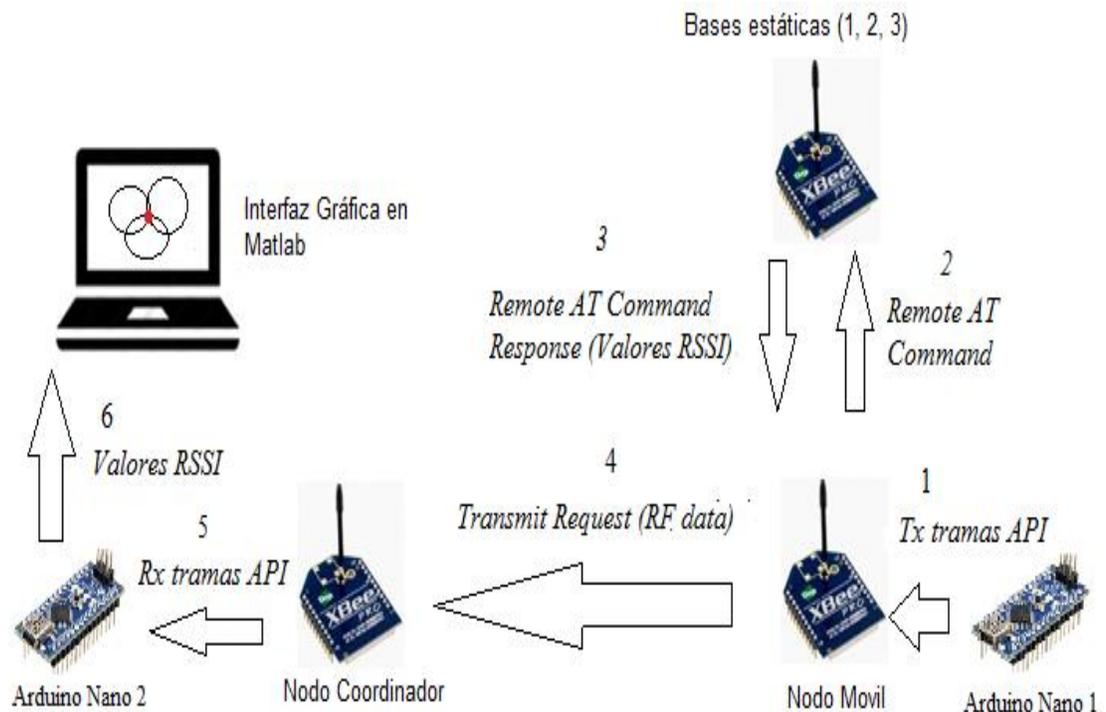
Figura 55. Estructura para los nodos de la red de localización.



En la figura 55 se observan el soporte de la caja que contiene el módulo XBee PRO S2B, la antena de alta ganancia RPSMA, junto con la batería de alimentación y la placa de interfaz – XBee.

Las pruebas finales se realizaron en las instalaciones de la cancha de fútbol de la unidad central del valle del cauca “UCEVA”, en esta ocasión tanto el nodo móvil como el nodo coordinador se enlazaron por medio de una interfaz serial a placas Arduino nano, la placa Arduino correspondiente al nodo móvil contiene el software encargado de enviar las tramas API Remote AT Command Request a cada base estática, posteriormente recibir los valores RSSI para luego enviarlos al nodo coordinador, la placa Arduino correspondiente a este último se encarga de recibir, leer y enviar por medio de una interfaz serial los valores RSSI a la interfaz gráfica de visualización. La figura 56 ilustra lo trasmisión y recepción de los valores RSSI en la red de localización.

Figura 56. Secuencia de transmisión y recepción de los valores RSSI en la red de localización.



Fuente: autor

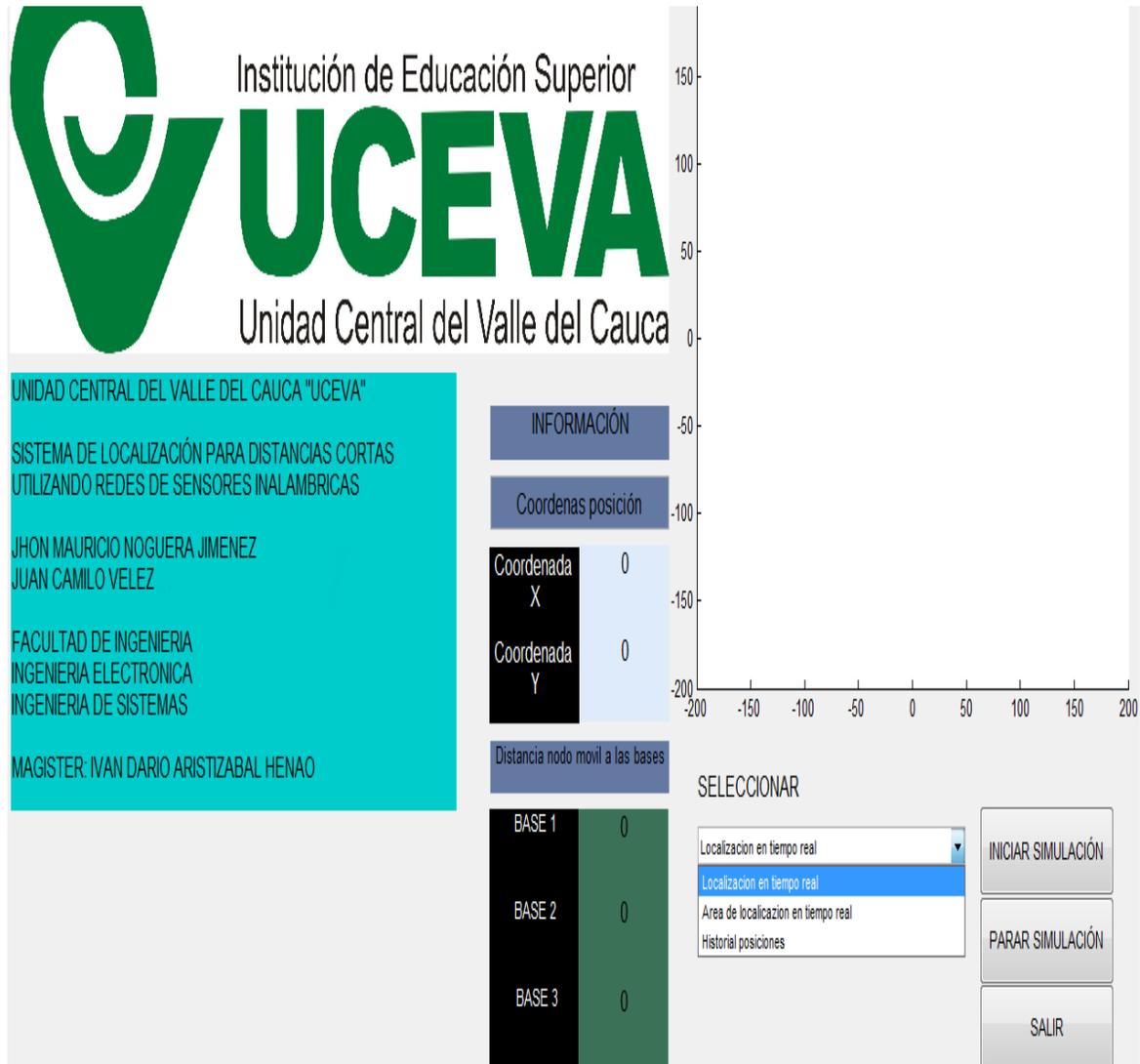
la figura 56 muestra la secuencia que realiza la red para encontrar la localización geográfica del nodo móvil, inicialmente el Arduino nano 1 envía por medio de la

interfaz serial las tramas API, estas son transmitidas inalámbricamente por el nodo móvil a cada una de las bases estáticas, inmediatamente el nodo móvil recibe la respuesta al comando remoto AT, la cual corresponde a los valores RSSI, estos datos son almacenados y posteriormente transmitidos por el nodo móvil al nodo coordinador, nodo en el cual Arduino nano 2 lee e interpreta los datos para luego ser transmitidos por la interfaz de comunicación serial a una computadora donde finalmente se implementa el algoritmo de trilateración y se visualizan los resultados en la interfaz gráfica desarrollada en el software Matlab.

Como se mencionó en apartados anteriores, para la visualización del algoritmo de trilateración se creó una interfaz gráfica en el software Matlab en la cual se puede obtener las coordenadas de la posición del nodo móvil, la distancia del nodo móvil a cada una de las bases estáticas, un historial de las posiciones del nodo desconocido y el funcionamiento del algoritmo de trilateración.

En la figura 57 se observa la interfaz desarrollada, la cual cuenta con un panel de visualización que permite seleccionar entre tres opciones, el funcionamiento del algoritmo de trilateración, la superficie real de localización y el historial de posiciones del nodo desconocido, además, cuenta con los datos sobre las coordenadas en tiempo real del nodo móvil y la distancia a la cual se encuentra este último sobre cada una de las bases estática. De igual forma se puede pausar o finalizar la lectura de los datos desde la interfaz.

Figura 57. Interfaz gráfica desarrollada en el software Matlab.



Fuente: autor

10.1 Resultados para diferentes coordenadas de nodo móvil.

Para verificar el funcionamiento y la precisión de la red diseñada se realizaron pruebas en superficies de 200, 450 y 800 metros cuadrados, modificando la posición del nodo móvil y registrando los valores suministrados por el algoritmo en la interfaz gráfica desarrollada. Las coordenadas de las bases estáticas y las posiciones del

nodo móvil para cada una de las áreas se muestran en la figura 58 y en la tabla 7, de igual forma, en las tablas 8, 10 y 11 se registran los resultados de la red para las coordenadas establecidas en la tabla 7.

Figura 58. Superficies de localización

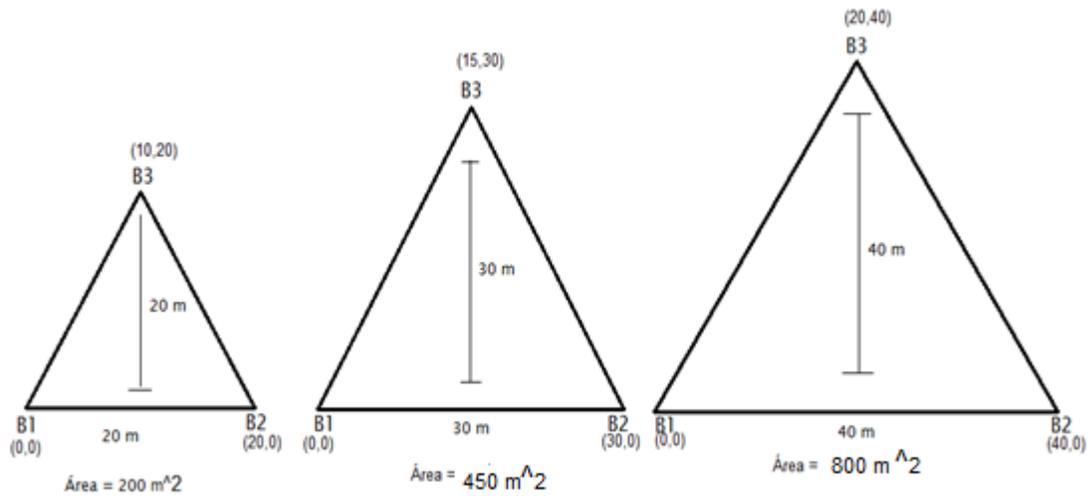


Tabla 8. Coordenadas del nodo móvil y las bases estáticas para cada una de las superficies

Coordenadas	Área 200m ² .		Área 450m ² .		Área 800m ² .	
	x	y	x	y	X	y
Base 1	10	0	0	0	0	0
Base 2	10	10	30	0	40	0
Base 3	10	5	15	30	20	40
P1	10	0	15	0	20	0
P2	10	10	15	15	20	20
P3	10	5	20	20	12	30
P4			10	15		
P5			18	20		

En la tabla 7 se encuentran registradas las coordenadas (x,y) en las cuales se ubicaran las bases estáticas (Base1, Base 2, Base 3) para las áreas de 200, 450 y 800 metros cuadrados, de igual forma, las variables P1, P2, P3, P4 y P5 corresponden a las coordenadas de los puntos reales en donde se ubicara el nodo móvil para así comparar este resultado con la implementación de la red de localización.

Las tablas 8, 10, 11 y las figuras 59, 60, 61 muestran los resultados del sistema prototipo de localización para superficies de 200, 450 y 800 metros cuadrados respectivamente.

10.1.1 Resultados superficie de 200 metros cuadrados

Tabla 9 Resultados de la red de localización para la superficie de 200 m^2 .

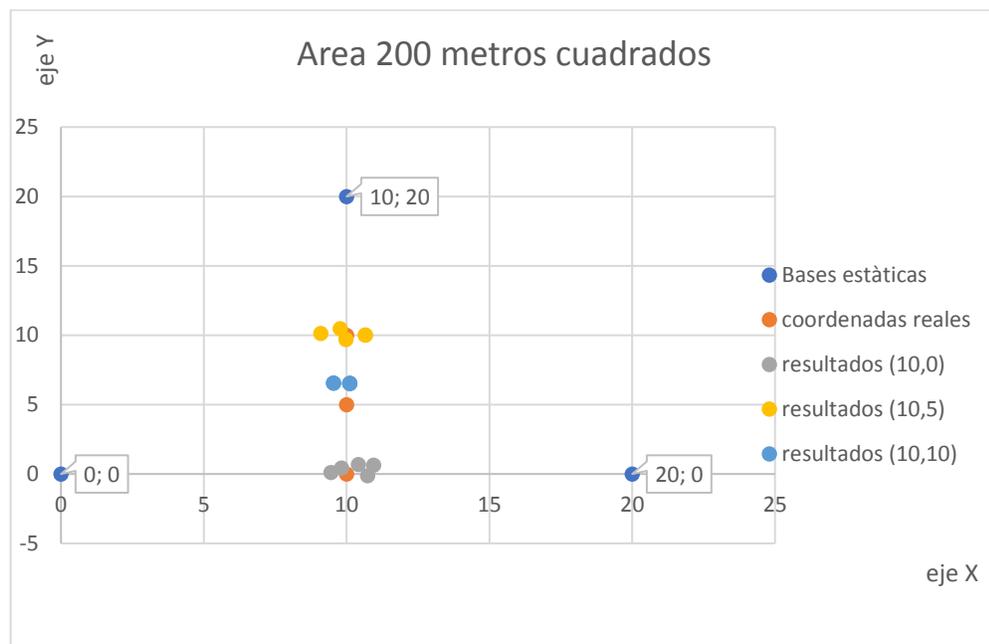
	Xreal_1	Yreal_1	Xreal_2	Yreal_2	Xreal_3	Yreal_3
	(10	0)	(10	10)	(10	5)
resultados	(x_1	y_1)	(x_2	y_2)	(x_3	y_3)
	12,4152	0,6859	9,9773	9,6887	9,5346	6,5479
	10,9424	-0,4495	10,6556	10,0279	10,1103	6,5358
	9,4537	0,1234	10,6556	10,0279	9,5346	6,5479
	9,8152	0,4398	9,7734	10,469	10,1103	6,5358
	10,7345	-0,1032	9,0951	10,1298	10,1103	6,5358

En la tabla 8 se registran los resultados de la red para la superficie de 200 m^2 , las variables Xreal_i y Yreal_i hacen referencia a las coordenadas de los puntos P1, P2 y P3, tabla 7, donde se ubicó el nodo móvil. Para cada punto se tomó cinco valores resultado del sistema de localización, dichos datos se muestran en la tabla 8 y corresponde a las variables (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3).

Por ejemplo, para la coordenada real (10,10) uno de los resultados de la red de localización fue la coordenada (9.9773, 9.9887), lo cual muestra que el sistema diseñado presenta un error no superior a los 0,32 metros.

Para tener una mejor claridad sobre los resultados de la tabla 8, en la figura 59 se muestran las coordenadas de las bases estáticas, los puntos reales y los resultados de la red de localización.

Figura 59. Resultados algoritmo de trilateración para un área de 200 m^2 .



Fuente: autor

De igual forma se calculó los errores reales para las coordenadas del nodo móvil en el área de 200 metros cuadrados, los cuales se muestran en la tabla 9.

Tabla 10 Error real de la coordenada del nodo móvil en una superficie de 200 m^2 .

Coordenada	Xreal	Yreal	Xreal	Yreal	Xreal	Yreal
	10	0	10	10	10	5
Error Real	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3
	2,4152	0,6859	0,0227	0,3113	0,4654	1,5479
	0,9424	0,6395	0,6556	0,0279	0,1103	1,5358
	0,5463	0,1234	0,6556	0,0279	0,4654	1,5479
	0,1848	0,4398	0,2266	0,469	0,1103	1,5358
	0,7345	0,1032	0,9049	0,1298	0,1103	1,5358

La tabla 9 muestra que el mayor error se presenta en la coordenada (10,5), este resultado arrojó un error de aproximadamente 2,4 metros.

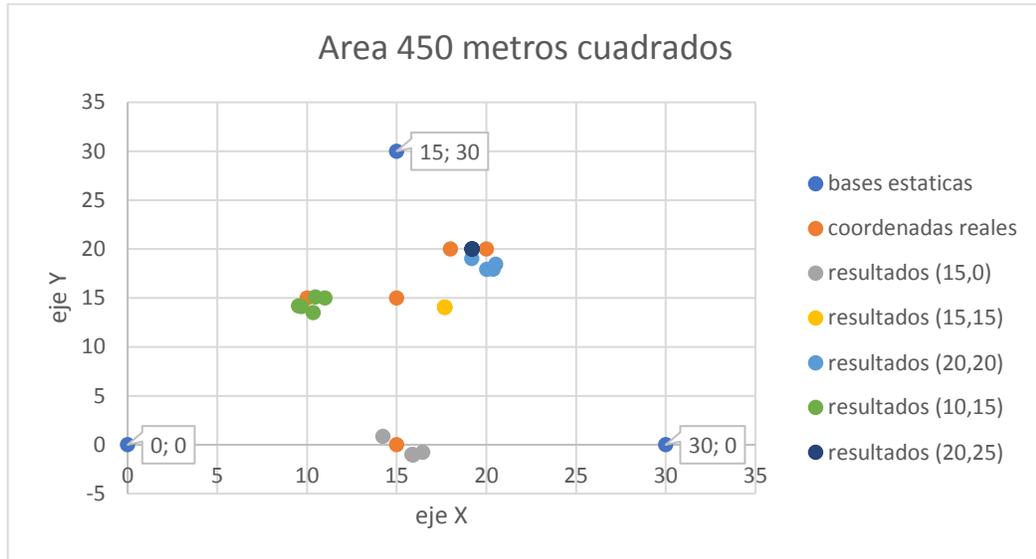
10.1.2 Resultados superficie de 450 metros cuadrados

A continuación, se presentan los resultados de la red de localización para una superficie de 450 m^2 . Para esta prueba se modificó las coordenadas de las bases estáticas 2 y 3 y se varió nuevamente la posición del nodo móvil dentro del área de localización. Los resultados se muestran en la tabla 10 y figura 60 respectivamente.

Tabla 11 Resultados de la coordenada del nodo móvil superficie de 450 m^2 .

coordenada	Xreal	Yreal	Xreal	Yreal	Xreal	Yreal
	15	0	15	15	20	20
resultados	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3
	15,9257	-1,025	17,682	14,0755	20,5226	18,4537
	16,4527	0,7615	17,682	14,0755	20,018	17,9432
	15,9257	-1,025	17,682	14,0755	19,1897	19,0345
	15,8534	-1,007	17,682	14,0755	20,3676	17,9602
	14,2376	0,8745	17,682	14,0755	20,3676	17,9602

Figura 60. Resultados algoritmo de trilateración para un área de 450 m^2 .



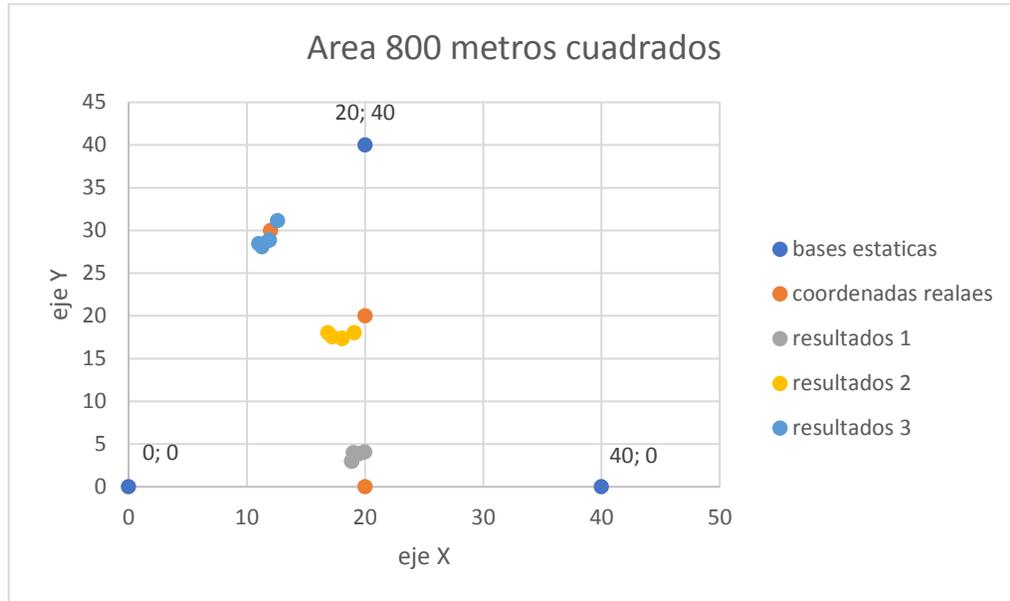
10.1.3 Resultados superficie de 800 metros cuadrados.

Para esta prueba se aumentó las dimensiones del perímetro que rodea la superficie de localización ubicando la base estática 2 en la coordenada (40,0), de igual forma, la base estática 3 se ubicó en la coordenada (20,40). Los resultados de las mediciones y la representación gráfica se muestran en la tabla 11 y figura 61.

Tabla 12 Resultados de la coordenada del nodo móvil superficie de 800 m^2 .

	Xreal	Yreal	Xreal	Yreal	Xreal	Yreal
	20	0	20	20	12	30
Resultados	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3
	19,9722	4,0917	18,0768	17,3727	11,8945	28,8967
	19,5468	3,879	16,8564	18,0338	11,8945	28,8967
	18,879	3,001	18,0768	17,3727	11,2679	28,1002
	19,003	4,0189	19,0908	18,0546	11,004	28,4554
	18,879	3,001	17,24	17,56	12,5934	31,1567

Figura 61. Resultados algoritmo de trilateración para un área de 800 m^2 .



En la tabla 12 se registran los errores reales de las medidas de las coordenadas del nodo móvil implementando la red de localización en comparación con las coordenadas de la posición real (X_{real} , Y_{real}) en la que se ubicó el nodo desconocido en la superficie de 800 metros cuadrados.

Tabla 13. Error real de la coordenada del nodo móvil en una superficie de 800 m^2 .

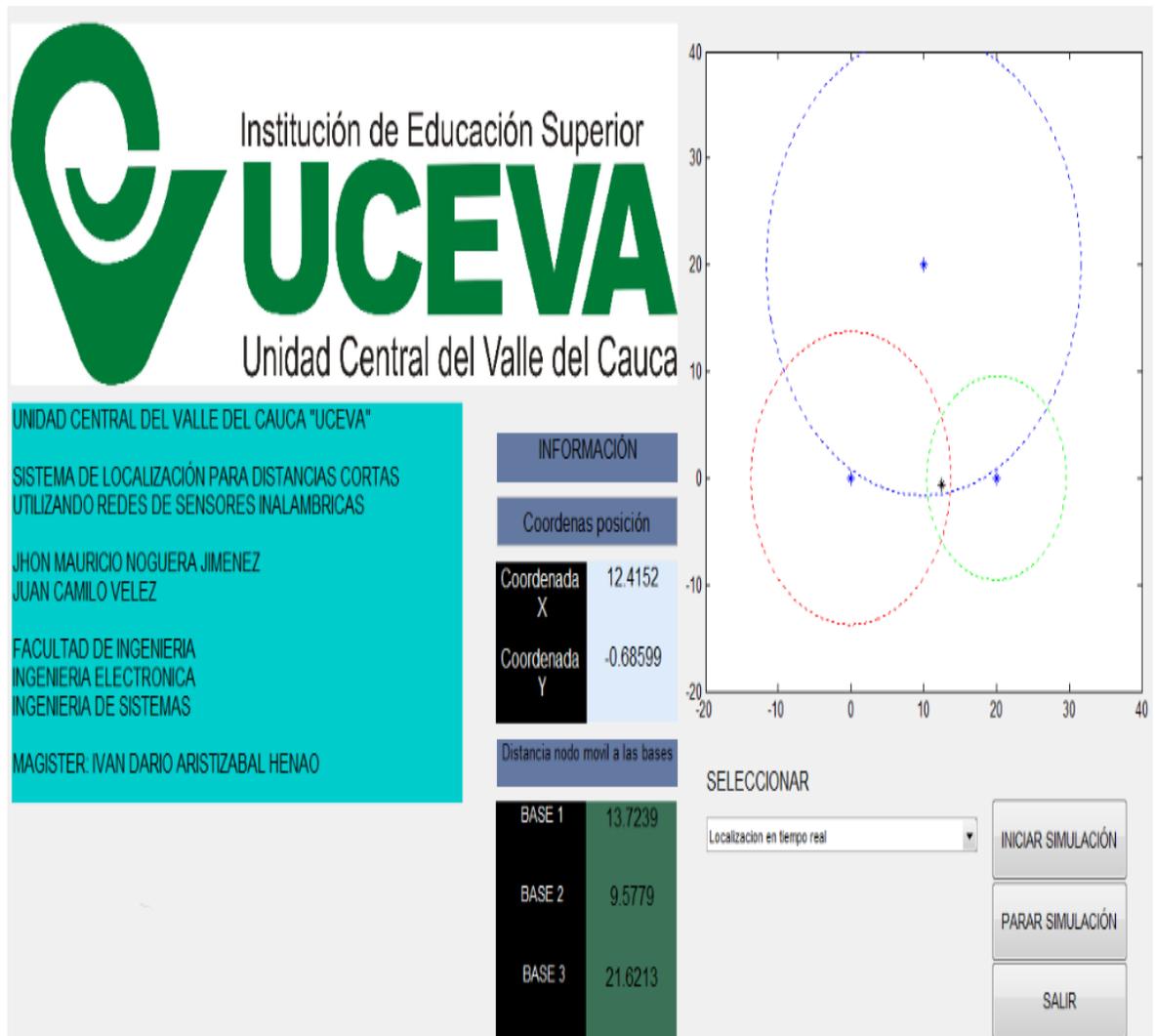
Coordenada	X_{real}	Y_{real}	X_{real}	Y_{real}	X_{real}	Y_{real}
	20	0	20	20	12	30
Error Real	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3
	0,0278	4,0917	1,9232	2,6273	0,1055	1,1033
	0,4532	3,879	3,1436	1,9662	0,1055	1,1033
	1,121	3,001	1,9232	2,6273	0,7321	1,8998
	0,997	4,0189	0,9092	1,9454	0,996	1,5446
	1,121	3,001	2,76	2,44	0,5934	1,1567

Teniendo en cuenta las figuras 60, 61 y 62 que muestran los resultados de algoritmo de localización y las tablas 9 y 12 correspondientes a los errores reales se concluye que la superficie de localización y el error en la posición del nodo móvil son variables directamente correlacionadas, por ende, si la superficie de localización es mayor el error en el cálculo de la coordenada real del nodo desconocido también será mayor, la explicación para este suceso, radica en el método empleado para el cálculo de las distancias entre el nodo desconocido y las bases estáticas correspondiente al indicador de la potencia de la señal recibía RSSI, el cual aumenta su fluctuación a medida que la distancia entre el nodo móvil y otro nodo de la red aumenta.

En conclusión, se verifica que resultados de la simulación de la red prototipo de localización implementado el algoritmo de trilateración bajo el cálculo de distancias a partir del parámetro RSSI, concuerdan con los resultados obtenidos en la implementación real del sistema. Cabe recalcar que la precisión del sistema diseñado en el framework truetime tiene mejor comportamiento por tratarse de una simulación en la que no se tiene en cuenta factores como interferencia, multiproyecto, refracción, reflexión que ocurren cuando se comunican dispositivos por un medio inalámbrico.

Los datos de las tablas 8, 9, 10, 11,12 y figuras 59, 60 y 61 se obtuvieron a partir de la interfaz gráfica, lo cual se evidencia en las figuras 62 y 63.

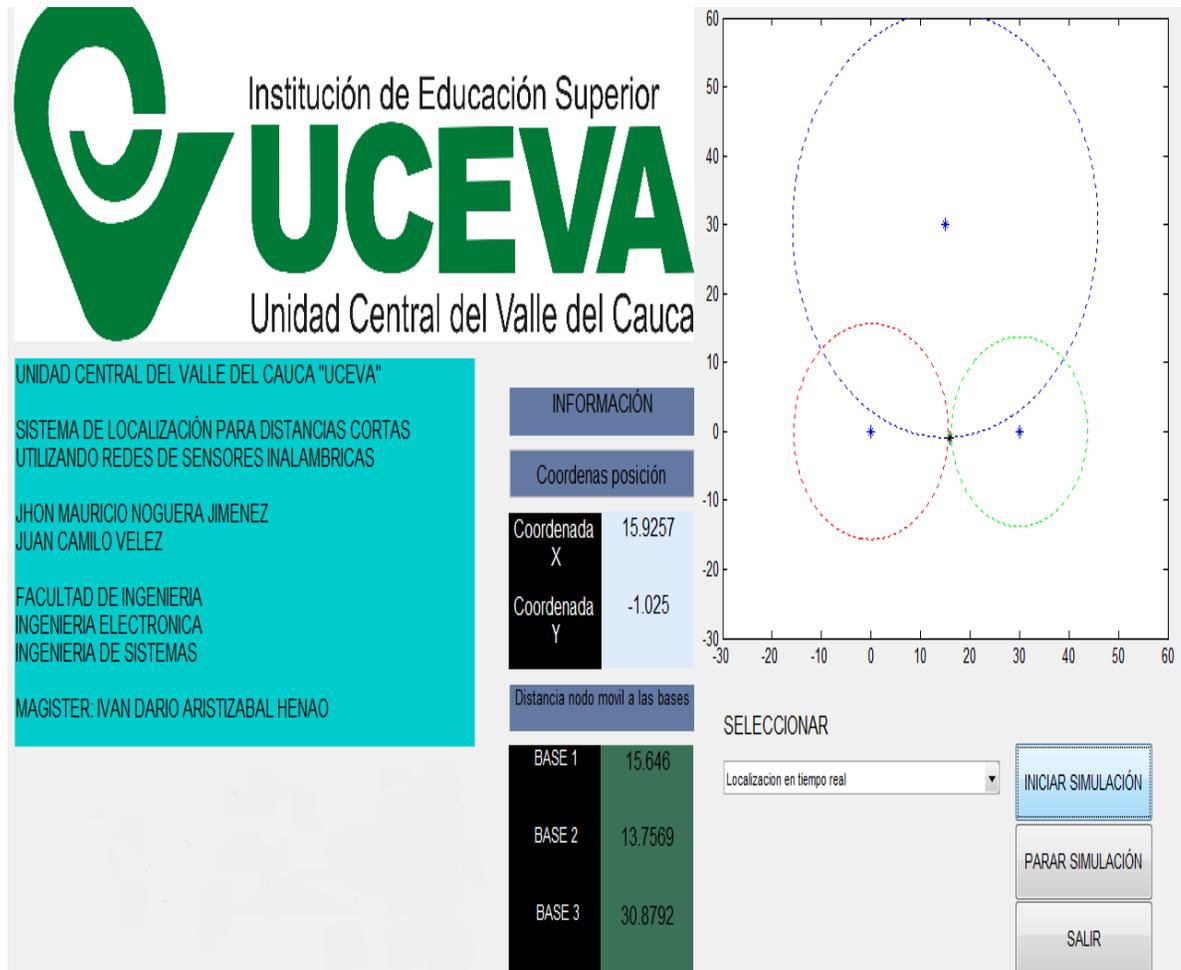
Figura 62. Resultados sistema de localización para un área de 200 metros cuadrados, coordenada real (10,0).



Fuente: autor

En la figura 62 se muestra la interfaz gráfica de visualización desarrollada en el software Matlab, en ella se evidencia en funcionamiento del algoritmo de trilateración en la prueba realizada para la superficie de 200 m². Dicha prueba correspondió a la ubicación del nodo móvil en la coordenada (10,0), para lo cual el sistema de localización arrojó un resultado en las coordenadas de (12.4252, -0.6859)

Figura 63. Resultados sistema de localización para un área de 450 metros cuadrados, coordenada real (15,0).



Fuente: autor

En la figura 63 se muestra la interfaz gráfica de visualización desarrollada en el software Matlab, en ella se evidencia en funcionamiento del algoritmo de trilateración en la prueba realizada para la superficie de 450 m^2 . Dicha prueba correspondió a la ubicación del nodo móvil en la coordenada (15,0), para lo cual el sistema de localización arrojó un resultado en las coordenadas de (15.9257, -1.025).

10.2 Análisis del consumo energético de los dispositivos

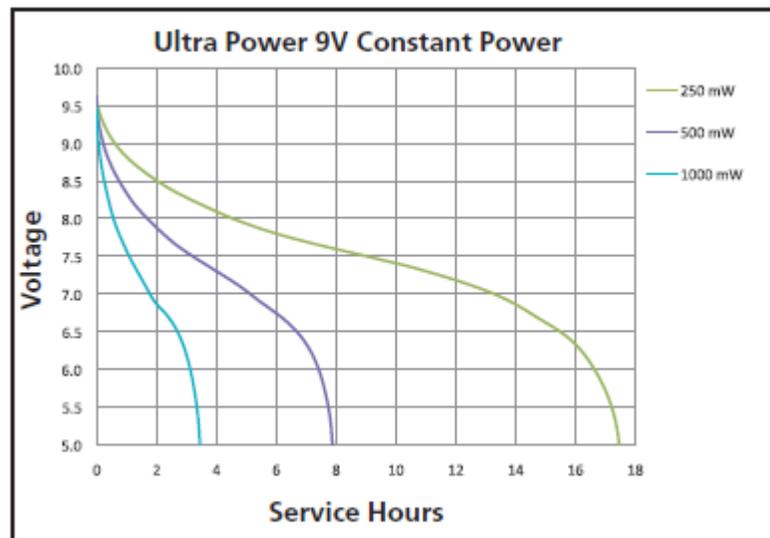
Teniendo en cuenta los datos del fabricante de los módulos XBee pro S2B, en la tabla 13 se muestran los datos ideales sobre el consumo de corriente según el modo de operación de cada dispositivo.

Tabla 14. Consumo energético ideal módulos XBee pro S2B

Dispositivo	Modo de operación	Corriente de operación	Potencia de operación
XBee pro S2B	Transmisor	200 mA	660mW
Xbee pro S2B	Receptor	50 mA	165mW

Para el prototipo se utilizó baterías alcalinas de 9 voltios. La figura 64 muestra la relación entre el tiempo de duración de las baterías y el consumo de corriente.

Figura 64 Grafica sobre el tiempo de duración de las baterías.



Fuente: Duracell. Berkshire Corporate Park. Datasheet alkaline-manganese dioxide Battery. Bethel, CT 06801 USA. www.duracell.com

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 14 y la información de la figura 64 se concluye que teóricamente las baterías para un nodo transmisor pueden durar aproximadamente entre 6 y 7 horas, mientras que para un nodo receptor la duración de sería de aproximadamente 24 horas.

Sin embargo, después de realizar pruebas al sistema prototipo se evidenció que para el nodo transmisor que en este caso es el dispositivo móvil la duración de las baterías fue de aproximadamente entre 5 y 6 horas, mientras que para el nodo receptor (bases estáticas) la duración aproximada fue de aproximadamente entre 18 y 20 horas.

Cabe recalcar que todos los dispositivos se configuraron en modo de máxima transferencia de potencia, cambiando esta configuración se esperaría una mayor duración en las baterías de alimentación.

10.3 Una vista a las aplicaciones de los módulos XBee.

Finalmente es importante mencionar las diferentes aplicaciones de los módulos XBee.

- Como principal utilización en el campo real de estos dispositivos se encuentra la monitorización, ya que estos dispositivos cuentan con puertos para lectura de sensores análogos y digitales que permiten monitorear el comportamiento de magnitudes físicas.
- Teniendo en cuenta el desarrollo del sistema prototipo de localización utilizando redes inalámbricas de sensores, es importante mencionar que este proyecto permite la unificación de tecnologías para monitorizar y localizar diferentes objetos en el mundo real. Por ejemplo, en la industria ganadera existen reproductores de raza pura, lo cuales tienen un costo muy elevado para una graja, este sistema permitiría no solamente motorizar el comportamiento del reproductor, sino además obtener la ubicación geográfica.
- Finalmente cabe mencionar que este proyecto permite crear un punto de partida para que este sistema prototipo se unifique con otros sistemas para no solamente encontrar la ubicación geográfica de x o y objeto, sino de realizar estudios sobre el comportamiento de magnitudes físicas.

11. RECOMENDACIONES

- Este proyecto deja abierta la posibilidad de desarrollar proyectos futuros en los que se implementen acciones de formación y actualización, para así posteriormente medir a mediano y largo plazo la eficacia del mismo.
- Se recomienda dar escalabilidad al proyecto, implementando más módulos hardware de los que se utilizaron en el proyecto, esto con el fin de probar la escalabilidad, alargando en distancia el alcance y poder determinar la variación de medidas que dejen como resultados estas pruebas.
- Lo diseñado en este proyecto, es el inicio de unas grandes proyecciones en el contexto de redes inalámbricas de sensores, puesto que con la programación de estos módulos ZigBee, es posible la adaptación de otros sensores los cuales permitan la recolección de otro tipo de información, como por ejemplo poder medir la temperatura promedio a la que se encuentre el medio o el objeto a medir.

12. CONCLUSIONES

- Se permitió comparar las diferentes tecnologías de redes inalámbricas de sensores, como lo son ZigBee, Wi-Fi y Bluetooth, concluyendo que el estándar de comunicación inalámbrica ZigBee permite la creación de redes de simple configuración, garantizando el bajo consumo de energía y bajo costo comparado con las otras tecnologías nombradas; cumpliendo con los objetivos principales del proyecto.
- Se evaluó las diferentes técnicas de localización en dos dimensiones basadas en distancias, concluyendo que el indicador de la potencia de la señal recibida permite calcular la distancia entre dos puntos, disminuyendo la utilización de hardware; sin embargo, se resalta que este valor se torna muy variable conforme aumenta la distancia a calcular.
- Mediante la simulación del sistema prototipo en el framework truetime se determinó la excelente precisión de la red de localización y el algoritmo de trilateración, teniendo como resultados para un área de 5000 metros cuadrados errores de medición de no más de un metro de distancia, sin embargo se debe tener en cuenta que en la simulación se desprecian las pérdidas de potencia por interferencia, multiproyecto, refracción, reflexión y demás fenómenos que ocurren cuando se comunican dispositivos por un medio inalámbrico.
- La implementación de la red prototipo de localización permitió verificar y evidenciar las diferencias entre la simulación y la operación de la red en un ámbito real, dando como gran conclusión que el método para el cálculo de distancias por el parámetro RSSI funciona de manera adecuada en lugares con línea de vista directa y distancias no prolongadas.

- La simulación e implementación de la red prototipo de localización permitió concluir que el punto más relevante en el desarrollo del proyecto corresponde a la obtención de los parámetros RSSI debido a que este valor conlleva a la utilización del algoritmo de trilateración y por ende a la buena o no precisión del sistema.

BIBLIOGRAFIA

- Aculturación. Topologías de red. <https://culturacion.com/topologias-de-red/>
Aprendiendo Arduino. 2017.
<https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/16/zigbeexbee/>
- BALANIS Constantine. *ANTENNA THEORY, analysis and desing. 3ra ed. New Jersey, wiley-interscience, 2005. ISBN: 9786468600.*
- BURDEN Richard, Faires, J, Douglas, Análisis numérico. 7ma ed. Thomson Learning, 2004. ISBN: 970-686-134-3.
- CERVIN Anton, HENRIKSSON Dan, LINCOLN Bo, EKER Johan, ÅRZÉN Karl-Erik. How Does Control Timing Affect Performance? Control Systems Magazine. Control Systems Magazine. <https://doi.org/10.1109/MCS.2003.1200240>.
- CERVIN Anton, HENRIKSSON Dan, Ohlin Martin. TRUETIME 2.0 – Reference Manual. Internet:
http://archive.control.lth.se/media/Research/Tools/TrueTime/report_2016-02-10.pdf
- CERVIN, Anton; HENRIKSSON, Dan; LINCOLN, Bo; EKER, Jhoan, ARZEN, Karl. How Does Control Timing Affect Performance? [En línea] Suiza: Lund University., Disponible en. <https://lup.lub.lu.se/search/ws/files/4367396/625629.pdf>
- CHIO CHO, Nayibe; TIBADUIZA BURGOS, Diego; APARICIO ZAFRA, Laura y CARO ORTIZ, Luis. Redes de sensores inalámbricos [En línea]., Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Diego_Tibaduiza_Burgos/publication/267214014_Redes_de_sensores_inalambricos/links/5451077a0cf24884d886f4e9/Redes-de-sensores-inalambricos.pdf
- Digi International Inc. Standards and Technologies, Zigbee Wireless Standard: Zigbee Wireless Mesh Networking. Internet:

<https://www.digi.com/resources/standards-and-technologies/zigbee-wireless-standard>

DIGI XCTU Configuration and Test Utility Software, Internet: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90001458-13.pdf>

DIGI. XBee/XBee-PRO Zigbee RF Modules User Guide. Internet: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>

DIGI. XBee/XBee-PRO Zigbee RF Modules User Guide. Internet: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>

ELINOFF, Gary. Bluetooth vs Wi-Fi vs ZigBee [En línea] 2017. Disponible en https://www.electronicproducts.com/Computer_Peripherals/Communication_Peripherals/Bluetooth_vs_Wi_Fi_vs_ZigBee.aspx

Fer Otori. Parte 4: Potencia RSSI en Freakduino. <https://ferotori.wordpress.com/2018/09/25/parte-4-potencia-rssi-en-freakduino/>

FERNANDEZ MARTINEZ, Roberto; ORDIEREZ MERÉ, Joaquín; MARTINEZ, Francisco; GONZALES, Ana; ALBA, Fernando; LOSTADO LORZA, Rubén y PERNIA ESPINOSA, Verónica. Redes inalámbricas de sensores: Teoría y aplicación práctica [En línea]: Universidad de la Rioja. 2009., Disponible en <file:///D:/Universidad/Trabajo%20de%20Grado/Documentos/Dialnet-RedesInalambricasDeSensores-377564.pdf>

GÁLVEZ Luis, Modelo matemático de Gompertz, para el crecimiento de aves. Caracterización. Scientia et technica 2011, universidad tecnológica de Pereira. https://www.academia.edu/30176414/Gompertz_mathematical_model_for_the_growth_of_poultry.Characterization?auto=download

GARCIA POLO, Eva. Técnicas de localización en redes inalámbricas de sensores [En línea]. Universidad de Castilla – La Mancha., Disponible en <http://www.dsi.uclm.es/personal/EvaMariaGarcia/docs/2008-Curso%20Verano.pdf>

GIROD FORTUÑO, Antón. Desarrollo e implementación de una red de sensores Zigbee mediante el dispositivo Xbee de digi. [En línea]. 2012., Disponible en. <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1957pub.pdf>

JIMENEZ SANTANA, Juan. Localizacion en interiores con redes de sensores mediante técnicas fingerprinting [En línea]. España. Universidad de Murcia., Disponible en <http://www.webs.um.es/ocanovas/miwiki/lib/exe/fetch.php?id=docencia&cache=cache&media=lbs-zigbee.pdf>

VARA, Nahuel; POLETTTO, German; CACERES, Manuel; BUSSO, Arturo. Calculo de distancia entre los nodos de una red inalámbrica ZigBee en función del parámetro RSSI. [En Línea]., p 2. Disponible en <http://revistas.unne.edu.ar/index.php/eitt/article/view/275/241>

MATHWORKS, Documentación Simulink: Uniform Random Number. Internet: https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/uniformrandomnumber.html?s_tid=srchtitle

MathWorks. Matlab. 1994, <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. 2019

MOORE Holly. MATLAB para ingenieros. 1ra ed. Mexico.: Pearson Education, 2007. ISBN 978-970-26-1082-3.

PRADHAM Sajina, SHIN Seokjoo, KNOW Goo-Rak, PYUN jae-young, HWANG suk-seung. The advanced TOA trilateration algorithms with performance analysis. Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2017. 923–928. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2016.7869184>

RAPPAPORT Theodore. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2da ed. Upper Saddle River, NJ, USA. Prentice Hall, 2001. ISBN: 0130422320.

RAPPAPORT Theodore. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2da ed. Upper Saddle River, NJ, USA. Prentice Hall, 2001. ISBN: 0130422320

RUGELES, José y LEON, Deiby. Técnicas de localización de nodos inalámbricos mediante redes de sensores [En línea] Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada., Disponible en http://www.iiis.org/CDs2013/CD2013SCI/CISCI_2013/PapersPdf/CA150PJ.pdf

ZHANG Xuechao, SHRESTHA Ravi, WAHID Khan, An Efficient Algorithm for Localization Using RSSI Based on ZigBee. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2015. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7129304>

ZILL Dennis. Ecuaciones diferenciales: con aplicaciones de modelado. 6ta ed. México D.F. International Thomson Editores, 1997. ISBN: 968-7529-21-0.