

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño y estudio comparativo de una red inalámbrica de largo alcance usando las tecnologías XBee de 900 MHz y 2.4 GHz dentro de una productora camaronera.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Telecomunicaciones

Presentado por:

Karla Gabriela Orellana Maldonado

Michael David Ramírez García

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

DEDICATORIA

A mis padres: María y José; mis hermanos: Omar, Yazmín y Christian; y a Mary y Sebastián.

Michael Ramírez García

Con mi más sincero amor, a mis padres: Félix y Rosalba y a mis hermanos: Alejandra y Félix Julián.

A todos los que buscamos magia a través de las páginas de un libro.

Gabriela Orellana Maldonado

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por haberme apoyado incondicionalmente a lo largo de mis estudios y motivado a seguir adelante. A mis hermanos por inspirarme a continuar mejorando y enseñarme cuando lo he necesitado.

A mis amigos por ayudarme cuando lo necesitaba durante mi periodo de estudios superiores.

Al Centro de Visión y Robótica por brindarnos los recursos técnicos para el desarrollo de nuestro proyecto.

Michael Ramírez García

Mi profundo agradecimiento a mis abuelos: Filomena y Julián por motivarme desde pequeña a seguir mis sueños; y a mis padres: Rosalba y Félix, por su apoyo incondicional y sacrificio durante todos estos años. Gracias a su ejemplo siempre aspiré a convertirme en una profesional.

A mis amigos, por hacer de esta etapa la mejor de las experiencias y permitirme crecer en lo personal.

Al Centro de Visión y Robótica por brindarnos los recursos técnicos y su guía durante la realización de este proyecto.

Gabriela Orellana Maldonado

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Michael David Ramírez García y Karla Gabriela Orellana Maldonado damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Karla Gabriela
Orellana Maldonado

Michael David
Ramírez García

EVALUADORES

MsC. Washington Medina Moreira

PROFESOR DE LA MATERIA

MsC. Carlos Valdivieso Armendáriz

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente trabajo muestra el diseño y estudio de una red inalámbrica de comunicación formada por módulos XBee que trabajan a la frecuencia de 2.4 GHz y 900 MHz. Se realiza una comparación de estas dos frecuencias con el objetivo de determinar cual es la más adecuada para obtener un mayor alcance en un ambiente camaronero.

Se diseñó la red mallada creando dos escenarios: en el escenario 1 se usaron los módulos XBee S3B que trabajan a 900 MHz y en el escenario 2 se utilizaron los XBee S2C operando a 2.4 GHz. Se configuraron los parámetros de radio frecuencia de las XBee a través del programa XCTU, ambos módulos transmitiendo en su máxima potencia. Se utilizaron antenas de ganancias de 0 dBi y 4.5 dBi para los módulos de 900 MHz; y de 0 dBi y 9.3 dBi para los de 2.4 GHz, con bases de 3 m. La captura de los datos se realizó con una Raspberry mediante archivos de códigos en C.

La topología formada por los módulos de 900 MHz usando antenas de 4.5 dBi obtuvo una tasa de datos de 1.82 kbps con una potencia recibida de -44.66 dBm. Además, se capturaron valores de potencia recibida, estado y duración de envío de un paquete.

Los módulos de 900 MHz cubrieron mayores distancias y son óptimos para usarse en una red inalámbrica en el entorno camaronero porque los efectos de la presencia del agua salada son menores en comparación a los de 2.4 GHz.

Palabras Clave: Módulos XBee, red inalámbrica de comunicación, ambiente camaronero, XBee de 900 MHz, XBee de 2.4 GHz.

ABSTRACT

This work shows the design and study of a wireless communication network made by XBee modules that operate at the frequency of 2.4 GHz and 900 MHz. A comparison of these two frequencies is made to determine which one is the most appropriate to obtain a greater range on a shrimp environment.

The mesh network was designed creating two scenarios: in scenario 1 the XBee S3B modules working at 900 MHz were used and in scenario 2 the XBee S2C operating at 2.4 GHz were used. The radio frequency parameters of the XBee were configured through the XCTU program, both modules transmitting at their maximum power. Antennas gains of 0 dBi and 4.5 dBi were used for the 900 MHz modules; and of 0 dBi and 9.3 dBi for those of 2.4 GHz, with heights of 3 m. The data was captured with a Raspberry using C code files.

The topology formed by the 900 MHz modules using antennas of 4.5 dBi obtained a data rate of 1.82 kbps with a received power of -44.66 dBm. In addition, received power values, status and total transmission time of a packet were captured.

The 900 MHz modules covered greater distances and are optimal for use in a wireless network on the shrimp environment because the effects of the presence of salt water are lower compared to those of 2.4 GHz.

Keywords: *XBee modules, wireless communication network, shrimp environment, 900 MHz Xbee, 2.4 GHz XBee*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Justificación del problema	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
1.4. Estado del arte	3
1.5. Alcance.....	4
1.6. Metodología.....	4
CAPÍTULO 2.....	6
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Topología de malla	6
2.2. Módulo RF XBee	6
2.2.1. XBee-PRO 900HP	7
2.2.2. XBee-PRO DigiMesh 2.4	8
2.3. XBee Explorer USB.....	9
2.4. XCTU.....	10
2.5. Principales protocolos compatibles con módulos RF XBee	10
2.5.1. Zigbee	10
2.5.2. DigiMesh	11
2.6. Diferencias entre Zigbee y DigiMesh.....	12
2.7. Modo de comunicación API.....	12

2.7.1. Modos de operación.....	13
2.8. Radio Mobile	14
2.9 Zonas de Fresnel	15
2.10 Sistema Embebido	15
2.10.1. Raspberry Pi 3 modelo B	16
CAPÍTULO 3.....	17
3. DISEÑO E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA	17
3.1. Diseño de la red inalámbrica	17
3.1.1. Recursos energéticos	17
3.1.2. Primera prueba	18
3.1.3. Programación de los módulos XBee	23
3.1.4. Configuración del XBee-PRO 900HP	24
3.1.5. Configuración del XBee-PRO DigiMesh 2.4.....	25
3.1.6. Metodología y resultados de la Primera Prueba	26
3.1.7. Pruebas de Rango	28
3.1.8. Pruebas de rendimiento	33
3.1.9. Segunda Prueba	38
3.2. Captura de datos.....	39
3.3. Análisis Económico	41
3.3.1. Viabilidad económica	42
CAPÍTULO 4.....	43
4. RESULTADOS.....	43
4.1. Simulación en Radio Mobile	43
4.2. Evaluación de los resultados de la red de comunicación	45
CONCLUSIONES.....	52
RECOMENDACIONES	53

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIEC	Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
WPAN	Wireless Personal Area Network
RF	Radio Frecuencia
CNA	Cámara Nacional de Acuicultura
XCTU	XBee Configuration and Test Utility
RPSMA	Reverse-Polarity SubMiniature version A
API	Application Programming Interface
LAN	Local Area Network
RSSI	Received Signal Strength Indicator
USB	Universal Serial Bus
CTI	Centro de Tecnologías de Información
CENAIM	Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas
LSB	Least Significant Bit
MSB	Most Significant Bit
LOS	Line of Sight
LE	Low Energy
MAC	Media Access Control

SIMBOLOGÍA

kbps	Kilobites por segundo
Km	Kilómetro
m	Metro
mAh	Miliamperios-hora
Wh	Watt-hora
V	Voltaje
A	Amperio
S	Segundos
%	Porcentaje
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
dB	Decibelio
dBi	Decibelio de ganancia sobre un radiador isotrópico
dBm	Decibelio – milivatio
mW	Milivatio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Módulo XBee PRO S3B	7
Figura 2. 2 Módulo XBee PRO S2C	8
Figura 2. 3 XBee USB Explorer	9
Figura 2. 4 Estructura de una trama en modo API	13
Figura 2. 5 Geometría de primera zona de Fresnel.....	15
Figura 3. 1 Perfil de elevación de Escenario #1: Admisiones-CTI	19
Figura 3. 2 Ubicación de nodos del escenario #2.....	19
Figura 3. 3 Ubicación de nodos del escenario #1	19
Figura 3. 4 Perfil de elevación de Escenario #1: CTI-Garita.....	20
Figura 3. 5 Perfil de elevación de Escenario #2: Repetidor-Final	20
Figura 3. 6 Perfil de elevación de Escenario #2: Poste-Repetidor.....	20
Figura 3. 7 Simulación del Escenario #1: Coordinador-Repetidor	21
Figura 3. 8 Simulación del Escenario #1: Repetidor-Nodo	22
Figura 3. 9 Simulación del Escenario #2: Coordinador-Repetidor	22
Figura 3. 10 Simulación del Escenario #2: Repetidor-NodoFinal	23
Figura 3. 11 (a)Topología de red del escenario 1. (b) Topología de red del escenario 2	27
Figura 3. 12 Modo Descubrimiento de Red	27
Figura 3. 13 Sección de herramientas del XCTU	27
Figura 3. 14 Pasos para realizar una Prueba de Rango.....	28
Figura 3. 15 Pasos para realizar una Prueba de Rendimiento	33
Figura 3. 16 Esquema general del sistema de la segunda prueba.....	38
Figura 3. 17 (a)Topología de red usando XBee S3B (b) Topología de red usando XBee S2C	39
Figura 3. 18 Diagrama de flujo general del código para la captura de datos.....	40
Figura 4. 1 Resultados de simulación entre los puntos S3B con antenas omnidireccionales de 0dBi: a) Coordinador-Repetidor1 b) Repetidor1-Nodo1 c) Repetidor2-Nodo2	44
Figura 4. 2 Resultados de simulación entre los puntos S3B con antenas omnidireccionales de 4.5dBi: a) Coordinador-Repetidor1 b) Repetidor1-Nodo1 c) Repetidor2-Nodo2	44

Figura 4. 3 Resultados de simulación s entre los puntos S2C con antenas omnidireccionales de 0dBi: a) Coordinador-Nodo1 b) Repetidor2-Nodo2.....	44
Figura 4. 4 Resultados de simulación entre los puntos S2C con antenas omnidireccionales de 9.3dBi: a) Repetidor1-Coordinador b) Coordinador-Repetidor2 c) Repetidor2-Nodo2	45
Figura 4. 5 Datos obtenidos por el programa en código C	46
Figura 4. 6 Gráficas obtenidos en Matlab de la red de S3B usando antenas omnidireccionales de 0 dBi.....	47
Figura 4. 7 Gráficas obtenidos en Matlab de la red de S3B usando antenas omnidireccionales de 4.5 dBi.....	47
Figura 4. 8 Gráficas obtenidos en Matlab de la red de S2C usando antenas omnidireccionales de 0 dBi.....	48
Figura 4. 9 Gráficas obtenidos en Matlab de la red de S2C usando antenas omnidireccionales de 9.3 dBi.....	48
Figura 4. 10 Gráfica de pérdidas en el trayecto para el caso de estudio.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Especificaciones de desempeño de XBee S3B [7].....	8
Tabla 2. 2 Especificaciones de desempeño de XBee S2C [8].....	9
Tabla 2. 3 Diferencias Zigbee y DigiMesh [12]	12
Tabla 2. 4 Bytes escapados en modo API2 [7].....	14
Tabla 3. 1 Características de las baterías usadas en la red	17
Tabla 3. 2 Consumo de energía de los módulos de radio	18
Tabla 3. 3 Distancia de los nodos.....	21
Tabla 3. 4 Parámetros de configuración del nodo coordinador de 900 MHz	24
Tabla 3. 5 Parámetros de configuración del nodo repetidor #1 de 900 MHz	24
Tabla 3. 6 Parámetros de configuración del nodo final de 900 MHz	25
Tabla 3. 7 Parámetros de configuración del nodo coordinador de 2.4 GHz	25
Tabla 3. 8 Parámetros de configuración del nodo repetidor de 2.4 GHz	26
Tabla 3. 9 Parámetros de configuración del nodo final de 2.4 GHz.....	26
Tabla 3. 10 Resultados de Prueba de Rango del Escenario #1 (XBee S3B)	29
Tabla 3. 11 Resultados de Prueba de Rango del Escenario #2 (XBee S2C)	31
Tabla 3. 12 Resultados de Prueba de Rango del Escenario #1 (XBee S3B)	34
Tabla 3. 13 Resultados de Prueba de Rango del Escenario #2 (XBee S2C)	36
Tabla 3. 14 Materiales utilizados en la prueba #2	41
Tabla 4. 1 Cuadro de diferencias entre los valores de potencias recibidas en las simulaciones y campo real	49

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Las Telecomunicaciones juegan un papel importante en la conectividad e interconexión entre dispositivos electrónicos, ha surgido el despliegue de nuevas redes de comunicación inalámbricas que permitan transmitir información de forma rápida, eficiente, con un bajo consumo de energía y bajo costo, como lo son las redes inalámbricas de área personal WPAN por sus siglas en inglés Wireless Personal Area Network. Una de las tecnologías usadas en WPAN es el módulo RF XBee, basado en el protocolo ZigBee DigiMesh.

El presente documento explica el diseño y comparación de las tecnologías XBee de 900MHz y 2.4GHz para implementar una red inalámbrica de comunicación de largo alcance y de menor costo en condiciones del entorno de una camaronera.

1.1. Descripción del problema

Actualmente, en Ecuador se está implementando el programa de electrificación para el sector camaronero logrando de esta forma que poco a poco sus procesos sean más tecnificados.

Las camaroneras no cuentan con una red de Telecomunicaciones adecuada para manejar toda la información que la nueva tecnología de automatización generará como los parámetros fisicoquímicos de las piscinas, información sobre el control de alimentación de los camarones, reportes de anomalías, etc.

Con el rápido crecimiento de la transformación digital, las empresas que no posean una red bien estructurada impiden que se lleven a cabo procesos y actividades de forma eficiente ya que todo pasa por la red, es por esto por lo que se requiere transmitir más datos en el menor tiempo posible y, para este proyecto, tomar en consideración que la red de comunicación sea óptima en condiciones de camaroneras.

1.2. Justificación del problema

De acuerdo con la Cámara Nacional de Acuicultura CNA, hasta octubre del 2017, el camarón se convirtió en el primer producto exportable de nuestro país [1].

Siendo este producto de gran aporte para el sector económico del Ecuador, se pretende realizar un diseño y estudio sobre la mejor tecnología para una red inalámbrica en un medio camaronero obteniendo la mayor cobertura posible mediante la comparación de dos frecuencias diferentes que operan en los módulos RF XBee, a su vez analizar los datos obtenidos de las pruebas de campo que optimicen la red de comunicación para mejorar la transmisión de datos produciendo procesos eficientes y beneficiando a su vez la calidad de la producción.

Además, el diseño de esta red privada permitirá procesar los datos de información de forma segura, fiable y sin interferencia de falla humana.

A través de este proyecto, se plantea el desarrollo de un avance al plan de electrificación en las camaroneras impulsado por el Gobierno Nacional y otros Ministerios, el cual busca suprimir el uso de diésel o derivados del petróleo y optar por sistemas eléctricos que automaticen la productora [1]. Con la llegada de la automatización en las camaroneras se sugiere una red de comunicación inalámbrica que permita transmitir toda la información que se generará y a su vez procesarla para futuros usos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y comparar el rendimiento de las tecnologías XBee de 900 MHz y 2.4 GHz para implementar una red inalámbrica de largo alcance.

1.3.2. Objetivos específicos

Identificar los dispositivos a utilizar y sus correspondientes características de operación.

Diseñar una red para cada tecnología.

Obtener datos realizando pruebas en el ambiente de las piscinas camaroneras.

Seleccionar la tecnología más adecuada para la red mediante la comparación de los datos obtenidos.

1.4. Estado del arte

Existen varias aplicaciones en las que se pueden usar los módulos XBee, entre ellas, para crear redes inalámbricas de comunicación de datos y redes de sensores. Mediante la investigación, se encontraron trabajos relacionados al tema expuesto en esta tesis, de los cuales se mencionan a continuación los más relevantes.

En el artículo [2], realizado por estudiantes de la FIEC ESPOL en Guayaquil, consistió en implementar un sistema inalámbrico de sensores en piscinas camaroneras usando los módulos XBee Digimesh para la toma de variables de la producción acuícola y su posterior monitoreo. Los autores de este proyecto determinaron los parámetros que debe tener la red inalámbrica para que exista una buena transmisión de datos, como: topología de malla, enlace punto a punto, uso de módulos XBee Digimesh de 2.4Ghz, consideraciones de la línea de vista y radio de Fresnel. Con esto alcanzaron una cobertura de 100 metros en medios acuáticos y un bajo consumo energético.

Un trabajo similar fue probado para ambientes interiores de un edificio y un estacionamiento en Tailandia [3], en el cual se creó una red inalámbrica de malla con módulos XBee y se determinó el rendimiento de la red mediante pruebas de los parámetros fundamentales de radio, retraso al envío de paquetes e intensidad de la señal recibida. Los autores realizaron diversos estudios del comportamiento de la red considerando escenarios con línea de vista y sin línea de vista, obteniendo resultados favorables en la comunicación.

Otra guía considerada para el diseño e implementación de una red inalámbrica mallada ZigBee se aprecia en [4]. En este trabajo, realizado en 2014 en la Universidad de VAASA de Ciencias Aplicadas en Finlandia, se

muestra el proceso que conlleva para la fabricación de la red mencionada anteriormente, desde la programación en los diferentes softwares como XCTU, programa usado para configurar los parámetros de radio de los módulos XBee, y la programación en Raspberry Pi, hasta las pruebas experimentales realizadas. El autor creó una pequeña red de malla con 3 módulos XBee: uno como administrador y los otros dos nodos como repetidores. Experimentó enviando mensajes y comprobando el comportamiento entre los módulos en 4 escenarios diferentes.

1.5. Alcance

La contribución de este trabajo se centrará en el diseño de una red inalámbrica que cubra el área de las piscinas camaroneras, así como la comparación entre las tecnologías XBee de 900 MHz y 2.4 GHz, cuyos resultados servirían como referencia para la futura implementación de una red inalámbrica en la productora camaronera.

Se realizarán mediciones de tasa de datos, potencias de transmisión y se tomarán en cuenta la cantidad de dispositivos necesarios de cada tecnología para realizar las conclusiones respectivas.

1.6. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se realizará una investigación de los parámetros de operación y configuración de los dispositivos de ambas tecnologías que formarán parte de la red, así como los protocolos involucrados usando la documentación respectiva de cada dispositivo.

Para el caso de 900 MHz, se escogieron los dispositivos XBee Pro S3B y para el caso de 2.4 GHz, los dispositivos XBee Pro S2C. Ambas series de la marca XBee son programables y cuentan con conectores RPSMA que permiten el uso de otras antenas a diferencia de otros módulos dentro del catálogo de XBee.

Para familiarizarse con el funcionamiento de los módulos se realizan pruebas dentro de las instalaciones de la ESPOL, en las cuales se monitorearon las potencias recibidas y la tasa de transmisión de datos mediante las herramientas proporcionadas por el programa XCTU.

Se diseñará una red con topología de malla para las tecnologías de 900 MHz y 2.4 GHz tomando en cuenta los datos de las pruebas anteriores, las configuraciones pertinentes para cada módulo y la extensión del lugar escogido para realizar las siguientes pruebas, dicho lugar corresponde a la Estación Experimental Palmar CENAIM-ESPOL. El propósito de dichas pruebas es obtener datos de potencias recibidas y tasas de transmisión bajo las condiciones de un ambiente de piscinas camaroneras para su posterior análisis. En dichas pruebas, la captura de datos se realizará a través de un archivo de código en C basado en la librería "lixbee.h" el cual será ejecuta en computadoras y sistemas embebidos.

Basándose en los datos obtenidos de las mediciones y tomando en cuenta la calidad de cada red, se realizarán las conclusiones respectivas sobre cuál tecnología es más conveniente para usarse en una red inalámbrica que cubra el área de las piscinas de una productora camaronera.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo de este proyecto se realizó una investigación sobre las diferentes soluciones en tecnologías inalámbricas para el diseño y posterior comparación de los mejores parámetros que asegurarán una red inalámbrica de comunicación estable y de largo alcance.

El cliente objetivo de este proyecto son las productoras camaroneras que estén en el proceso de plan de electrificación brindado por el gobierno, sin embargo, también se lo puede aplicar a nivel industrial.

2.1. Topología de malla

La red de malla es una topología descentralizada muy usada en las redes inalámbricas. Consiste en que todos los nodos que la conforman se interconectan entre ellos [5]. La ventaja de esta topología es la confiabilidad ya que en caso de existir algún fallo en uno de sus nodos se utiliza otra vía alterna, de esta forma se mantiene siempre la comunicación entre los nodos. [3]

2.2. Módulo RF XBee

Los módulos XBee, son pequeños circuitos electrónicos de radio frecuencia fabricados por Digi International Inc., utilizados para la transmisión inalámbrica. Permiten crear redes para la interconexión y comunicación entre dispositivos. Existen diversas series o tipos de XBee que trabajan a diferentes frecuencias [6].

Una de las ventajas de usar los módulos XBee es su fácil acceso al mercado, costos accesibles, el bajo consumo de potencia y su facilidad al implementarlos.

La programación de los módulos XBee se realiza a través del software XCTU o de microcontroladores. XBee admite varios protocolos de red que operan a diversas frecuencias para satisfacer los diferentes

requerimientos de las aplicaciones inalámbricas. Además, soporta arquitecturas como: punto a punto, punto a multipunto o red mallada.

Para mejorar el alcance de cobertura, en algunos módulos XBee viene incorporado una antena a modo de chip o en su defecto algunos poseen conectores para conectar tu propia antena. La selección del tipo de antena depende de la distancia que se desee cubrir.

2.2.1. XBee-PRO 900HP

El módulo RF XBee-PRO 900HP es un firmware cargado en un dispositivo XBee-PRO S3B. Proporciona conectividad inalámbrica a dispositivos conectados con topología mallada. Opera en la banda de frecuencia de 902 MHz a 928 MHz. Estos módulos son requeridos para cubrir grandes distancias y para obtener un mayor rendimiento de datos [7]. La figura 2.1 muestra el módulo RF.



Figura 2. 1 Módulo XBee PRO S3B [7]

Algunas de sus especificaciones de desempeño se muestran en la tabla 2.1. Estos valores son basados en mediciones hechos en terrenos con poca interferencia. Por lo que los resultados varían dependiendo de las condiciones del ambiente en que se lo aplique, las características de los transmisores, receptores y antenas.

Tabla 2. 1 Especificaciones de desempeño de XBee S3B [7]

Especificación	Valor
Rango de línea de vista	10 kb/s: hasta 15.5 km 200 kb/s: hasta 6.5 km (con antenas dipolo de 2.1 dB)
Potencia de Transmisión	Más baja: 7dBm (5mW) Baja: 15 dBm (32mW) Media: 18 dBm (63mW) Alta: 21 dBm (125 mW) Más alta: 24 dBm (250 mW)
Tasa de transmisión de datos (alta)	200 kb/s
Tasa de transmisión de datos (baja)	10 kb/s
Velocidad de interfaz serial	9600-230400 baudios
Sensibilidad	-101 dBm (transmisión de datos alta)- -110 dBm (transmisión de datos baja)
Frecuencia	902-928 MHz

2.2.2. XBee-PRO DigiMesh 2.4

Este módulo brinda conectividad inalámbrica a dispositivos electrónicos trabajando en la frecuencia de 2.4 GHz y se basa en el protocolo de red DigiMesh. [8] Posee el firmware cargado en un dispositivo XBee-PRO S2C como se exhibe en la figura 2.4.



Figura 2. 2 Módulo XBee PRO S2C [8]

A continuación, en la tabla 2.2 se evidencian algunas de las características de este modelo. Se especifica que estos resultados varían dependiendo de las condiciones del ambiente, modelos de propagación de interior o exterior y especificaciones del transmisor, receptor y antenas.

Tabla 2. 2 Especificaciones de desempeño de XBee S2C [8]

Especificación	Valor
Rango de línea de vista	Interior / urbano: hasta 90 m Exterior: hasta 3200 m
Potencia de Transmisión	18 dBm (63 mW)
Tasa de transmisión de datos	250000b/s
Sensibilidad	-101 dBm
Frecuencia	ISM 2.4 GHz

2.3. XBee Explorer USB

El XBee Explorer, como se muestra en la figura 2.3, es un adaptador USB de fácil uso que permite la comunicación entre el módulo XBee y la PC. Es compatible con todas las versiones estándar y PRO de XBee. Para su uso se debe acoplar los pines del módulo XBee con los del Explorer USB, se conecta un cable mini USB y así la XBee estaría lista para la configuración por la PC [9]



Figura 2. 3 XBee USB Explorer [9]

2.4. XCTU

XBee Configuration and Test Utility (XCTU) es una aplicación multiplataforma gratuita compatible con los sistemas operativos de Windows, Mac y Linux. Es el software que se requiere para iniciar, configurar y realizar pruebas entre los XBee. [10]

Posee una interfaz gráfica en la cual se puede actualizar los firmwares de los módulos, establecer configuraciones de radio, obtener resultados sobre la transmisión y recepción de paquetes y el estado de estos, permitir comunicarse con otros XBee remotos y ver un resumen de todos los parámetros del módulo y una breve descripción de ellos.

2.5. Principales protocolos compatibles con módulos RF XBee

2.5.1. Zigbee

Protocolo para redes con topologías de malla y estrella. Permite trabajar con elementos de varias marcas dado que es un protocolo abierto, no obstante, está limitado a productos que operan en la banda de 2.4 GHz. Distingue a los nodos entre tres roles: coordinador, enrutadores y dispositivos finales. Todos los nodos pueden enviar y recibir información, sin embargo, existen ciertas diferencias dependiendo de su rol.

El coordinador se encarga de administrar la red, así como de direccionar el tráfico de datos. Cuando se utiliza el protocolo Zigbee es necesario que se denomine a uno de los nodos como coordinador. Este nodo es capaz de almacenar información acerca de la red tales como claves de seguridad.

Un enrutador se encarga de redireccionar el tráfico proveniente de otros dispositivos y pueden colocarse múltiples nodos con este rol dentro de la red. Un enrutador puede ser considerado como un dispositivo final con la diferencia de que no puede entrar en modo

de suspensión, es decir, los enrutadores deben permanecer siempre activos.

Un dispositivo final o nodo final no puede dirigir el tráfico de datos y solo pueden comunicarse con el coordinador o un enrutador al que esté asignado. Este tipo de nodo pueden suspender su funcionamiento por lo cual se pueden usar tecnologías móviles, de baja potencia o alimentados por batería. Un nodo que tiene asignado uno o varios dispositivos finales se le denomina padre de dichos dispositivos. Cada padre puede tener asignado hasta 20 dispositivos finales [11]

2.5.2. DigiMesh

Protocolo propietario para los dispositivos de marca Digi que operan en las bandas de 900 MHz o 2.4 GHz. Cataloga todos los nodos por un solo tipo. La red es homogénea por lo cual todos los nodos pueden direccionar el tráfico y pueden intercambiarse. Debido a esto, la instalación de la red es más sencilla y permite una mayor flexibilidad para escalar la red.

Con DigiMesh, cualquier nodo puede entrar en modo suspendido lo cual ayuda a reducir significativamente el consumo de energía. Esto es conveniente para la utilización de dispositivos alimentados por batería. Este protocolo permite configurar ciclos de suspensión síncronos de manera que todos los dispositivos puedan suspender sus funciones y reactivarse al mismo tiempo, esta función es especialmente útil si existen periodos de tiempo en los que no es requerido el funcionamiento de la red. También permite ciclos de suspensión asíncronos, sin embargo, esta función requiere nodos que permanezcan siempre activos para funcionar como enrutadores [11].

2.6. Diferencias entre Zigbee y DigiMesh

Zigbee y DigiMesh son protocolos de malla con diferentes características dependiendo de la aplicación en que se las empleé. La tabla 2.3 muestra las diferencias de cada una.

Tabla 2. 3 Diferencias Zigbee y DigiMesh [12]

	Zigbee	DigiMesh
Tipos de nodos	Múltiples: Coordinadores, routers y dispositivos finales.	Único: un solo tipo de nodo. Permite simplificar la red y brinda mayor confiabilidad.
Alimentación	Coordinadores y routers deben ser alimentados por la red.	Todos los nodos son capaces de funcionar con batería. Ahorro de energía en modo suspendido.
Actualizaciones de firmware por aire	Sí	Sí
Rango	Menor a 3.2 km por cada salto.	Hasta 64 Km por cada salto.
Carga de trama y rendimiento	Hasta 80 bytes.	Hasta 256 bytes (dependiendo del producto).
Frecuencias y tasa de datos de RF	2.4 GHz (250 kbps).	900 MHz (hasta 250 kbps). 868 MHz. 2.4 GHz (hasta 250 kbps).
Interoperabilidad	Interoperabilidad entre proveedores.	Propietario de Digi.
Direccionamiento	Dirección MAC: 64 bits. Dirección de red: 16 bits.	Dirección MAC: 64 bits.

2.7. Modo de comunicación API

API (Application Programmign Interface) es uno de los modos de comunicación de XBee. Consiste en transmitir datos de forma segura y estructurada mediante tramas permitiendo tener un control del estado de comunicación de la red ya que las tramas API contienen información para detectar errores en el envío o recepción de los paquetes RF transmitidos enviando estatus de éxito o falla. Además, permite la configuración remota de los demás nodos de la red [13].

Una trama API contiene dirección de origen y destino y deben estar estructuradas como se indica en la figura 2.4.

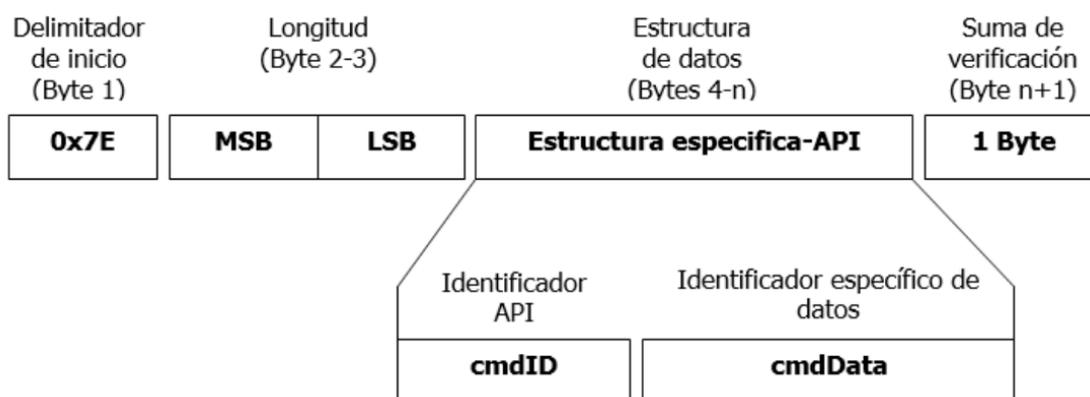


Figura 2. 4 Estructura de una trama en modo API [13]

El Delimitador de Inicio indica el inicio de la trama y está conformada por 8 bits. Se descarta cualquier paquete que se haya enviado antes del delimitador. El campo de Longitud consta de MSB, byte más significativo, y LSB, byte menos significativo.

La Estructura de Datos está formada por dos campos: el Identificador API y el Identificador específico de datos. Permite conocer información específica, estados y respuestas de cada paquete transmitido o recibido.

El último campo de la trama API es la Suma de Verificación, la cual es útil para verificar el correcto envío o recepción del mensaje. Si existe alguna falla en el envío del mensaje o en la suma de verificación, el dispositivo emite un estado de error indicando el fallo. El campo Suma de Verificación está formado por 8 bits [14].

2.7.1. Modos de operación

Existen dos modos de operación en API: API sin escape (API1) y API con escape de caracteres (API2). Dependiendo del modo de operación que se escoja, cambia la estructura de la trama API.

La diferencia entre ellos es que en API 2 se escapan caracteres para evitar interferencia en la secuencia de la trama. Como se sabe

que siempre el primer campo en una trama API es el delimitador de inicio y que por ende es un parámetro único e irrepetible en la trama puede considerarse como un carácter de escape [7] [15], así como los caracteres mostrados en la tabla 2.4.

En el modo de operación API1, si existe un error en la recepción entonces habría un fallo en la suma de verificación y la próxima trama se afectará también.

Tabla 2. 4 Bytes escapados en modo API2 [7]

Byte	Descripción
0x7E	Delimitador de trama
0x7D	Carácter de escape
0x11	XON
0x13	XOFF

2.8. Radio Mobile

Radio Mobile es un software con licencia libre especializado para el diseño y simulación de una red de Telecomunicaciones que permite realizar el análisis del enlace de una red, muestra sus niveles de perfil topográfico, las posibles pérdidas que puedan existir usando el modelo de predicción de Longley Rice y todas las características más relevantes para la consideración de un buen presupuesto de enlace.

Para su simulación es necesario colocar las coordenadas de los puntos o nodos que se van a analizar, detallar el perfil del terreno, indicar características de los equipos a usar como potencia de transmisión, sensibilidad, características de las antenas y detalles del enlace como frecuencia de operación y distancia entre los nodos [16].

Es una herramienta muy útil ya que permite exportar el trabajo realizado a Google Earth y obtener una vista en mapas geográficos actualizados mostrando todos los relieves e irregularidades del terreno y a su vez evaluar datos y señales en entornos reales.

2.9 Zonas de Fresnel

La zona de Fresnel es el área entre un emisor y receptor en donde se transmite una onda electromagnética, de modo que en dicha área se debe conseguir que no hay interferencias u obstáculos que puedan degradar la señal emitida.

La línea recta que une el emisor y receptor, llamada línea de vista (LOS) produce una fase mínima de cero. Las zonas de Fresnel se forman alrededor de esta línea recta en forma de un elipsoide tridimensional [17].

Como criterio para determinar si un objeto debe considerarse como una obstrucción significativa se toma en consideración si dicho objeto ocupa el espacio correspondiente a 0.6 veces el radio de la primera zona de Fresnel a lo largo de la línea de vista dado que cualquier objeto fuera de ese espacio no afecta considerablemente a la propagación de las ondas [18] , esto se aprecia en la figura 2.5.

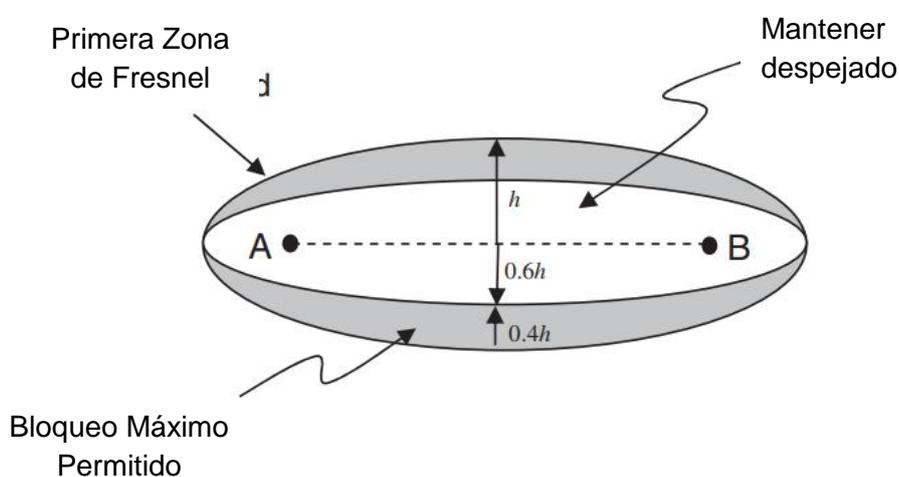


Figura 2. 5 Geometría de primera zona de Fresnel [16]

2.10 Sistema Embebido

Los sistemas embebidos son dispositivos electrónicos fabricados para crear una tarea específica generalmente en tiempo real. Durante las

últimas décadas se ha elevado su uso en diferentes áreas, una de ellas y la más usada es en la industria 4.0. [19]

Debido a su auge, son muy fáciles de encontrar en el mercado y a costos accesibles. Ya que se usan para cubrir tareas específicas, existen diferentes plataformas basadas en sistemas embebidos como Arduino, Raspberry Pi, BeagleBone, mbed, etc.

Para la realización de este proyecto se utilizó una Raspberry Pi 3 modelo B el cual está basado en el sistema operativo de Linux.

2.10.1. Raspberry Pi 3 modelo B

La Raspberry Pi 3 modelo B posee características mejoradas a sus versiones anteriores, cuenta con un procesador de 1.2 GHz de velocidad brindando una mayor capacidad de procesamiento. Sin embargo, la novedad de este modelo es que posee conectividad WiFi y Bluetooth 4.1 LE [20].

Sus principales características son las siguientes:

- LAN inalámbrica 802.11 b/g/n.
- Bluetooth 4.1 (Classic y Low Energy).
- Procesador BCM2837 ARMv8 de 64bits a 1.2 GHz
- Memoria LPDDR2 de 1 GB.
- Compatible con ARM GNU/Linux y Windows 10 IoT.
- 40 pines GPIO.
- Ranura de tarjeta microSD.
- Puerto Ethernet 10/100.
- Dimensiones: 85 x 56 x 17 mm.
- Alimentación: 5.1V y 2.5 A.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se describe el diseño y análisis de la red inalámbrica obtenida de las simulaciones de Radio Mobile y pruebas reales en el ambiente camaronero. Así como la integración de los dispositivos a usar y la metodología a seguir para obtener una red de comunicación estable y de largo alcance.

3.1. Diseño de la red inalámbrica

Se realizaron dos pruebas, una primera prueba de estrés dentro de las instalaciones de la ESPOL para verificar diseño y analizar datos en un entorno de vegetación media y una segunda prueba realizada en una camaronera. Para ambas pruebas se utilizaron las XBee de 2.4GHz y 900MHz.

3.1.1. Recursos energéticos

En cada nodo de la red se colocó un módulo de radio XBee conectado a su correspondiente Xplorer USB y para la alimentación se contó con dos modelos de baterías cuyas características se describen en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Características de las baterías usadas en la red

Modelo	PB-Y14	PB-N39
Capacidad	20000 mAh / 74 Wh	30000 mAh / 111 Wh
Salida	DC 5V 3A Max	DC 5V 2.4A Max

En la tabla 3.2 se describe el consumo de energía para cada módulo tomando en cuenta que cada Xplorer requiere una alimentación de 5V y asumiendo la tasa de datos y potencias de transmisión más altas de acuerdo a las hojas de datos correspondientes.

Tabla 3. 2 Consumo de energía de los módulos de radio

Dispositivo	Amperaje	Voltaje	Potencia
XBee PRO DigiMesh 2.4	63,67 mA	5 V	318.35 mW
XBee PRO 900 HP	148.57 mA	5 V	742.85 mW

3.1.2. Primera prueba

La primera prueba se realizó en un terreno dentro del Campus Prosperina de la ESPOL usando dos escenarios:

- Escenario #1: enlace formado por XBee-PRO 900HP (900MHz).
- Escenario #2: enlace formado por XBee-PRO DigiMesh 2.4 (2.4GHz).

Las ubicaciones de los nodos, latitud y longitud, que conforman los escenarios 1 y 2 se muestran en los mapas de las figuras 3.1 y 3.2 respectivamente. Ambos escenarios estaban formados por tres nodos: un coordinador, un repetidor y un nodo final.

En los mapas de las figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 se muestran los perfiles de elevación de los nodos que conforman los escenarios 1 y 2: coordinador-repetidor y repetidor-nodo final.



Figura 3. 3 Ubicación de nodos del escenario #1



Figura 3. 2 Ubicación de nodos del escenario #2



Figura 3. 1 Perfil de elevación de Escenario #1: Admisiones-CTI

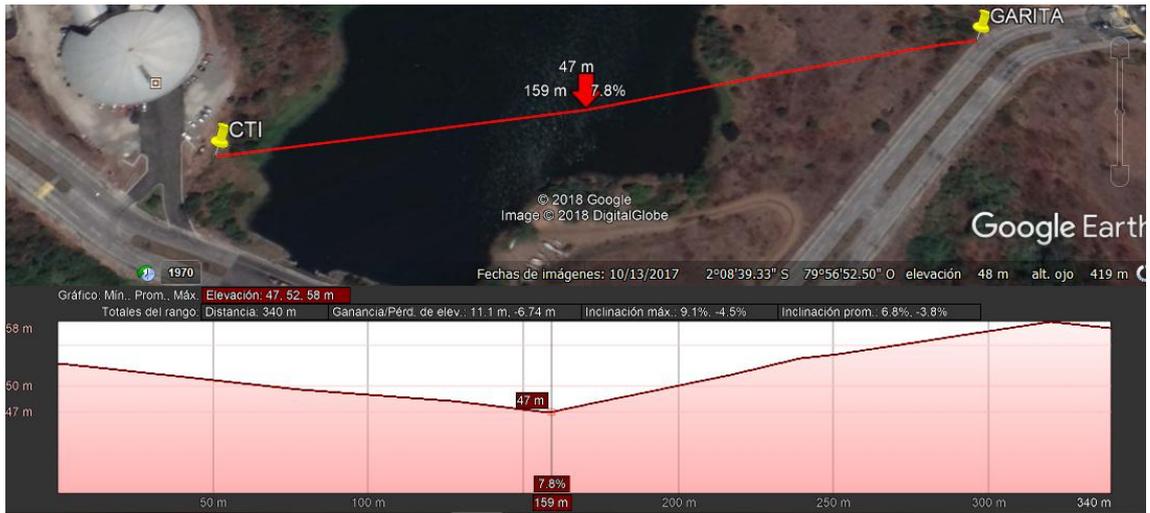


Figura 3. 4 Perfil de elevación de Escenario #1: CTI-Garita

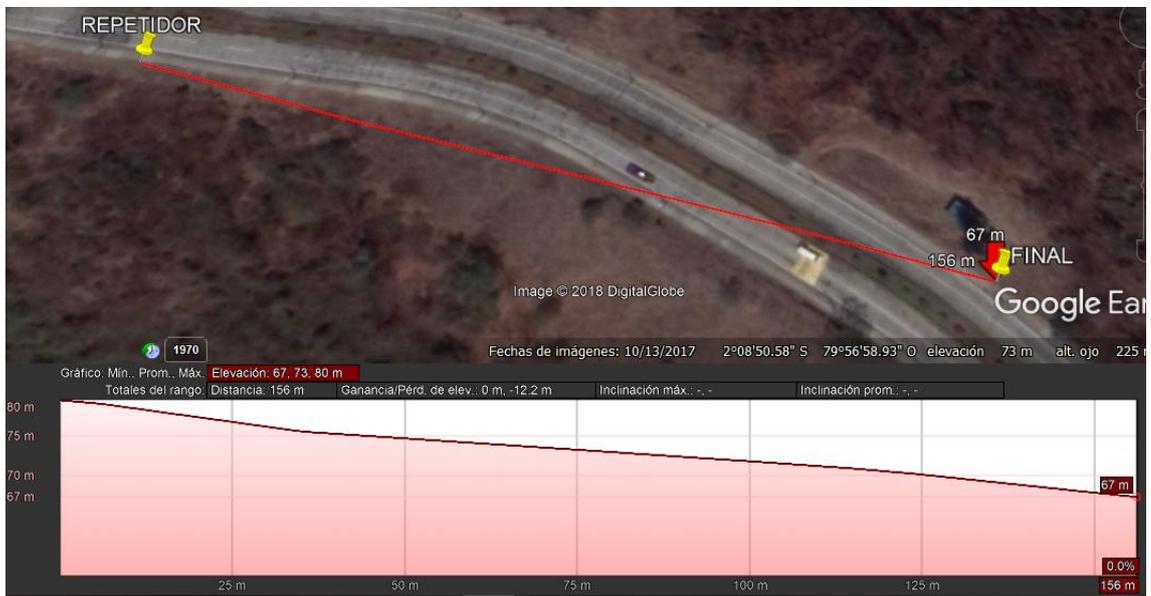


Figura 3. 6 Perfil de elevación de Escenario #2: Poste-Repetidor

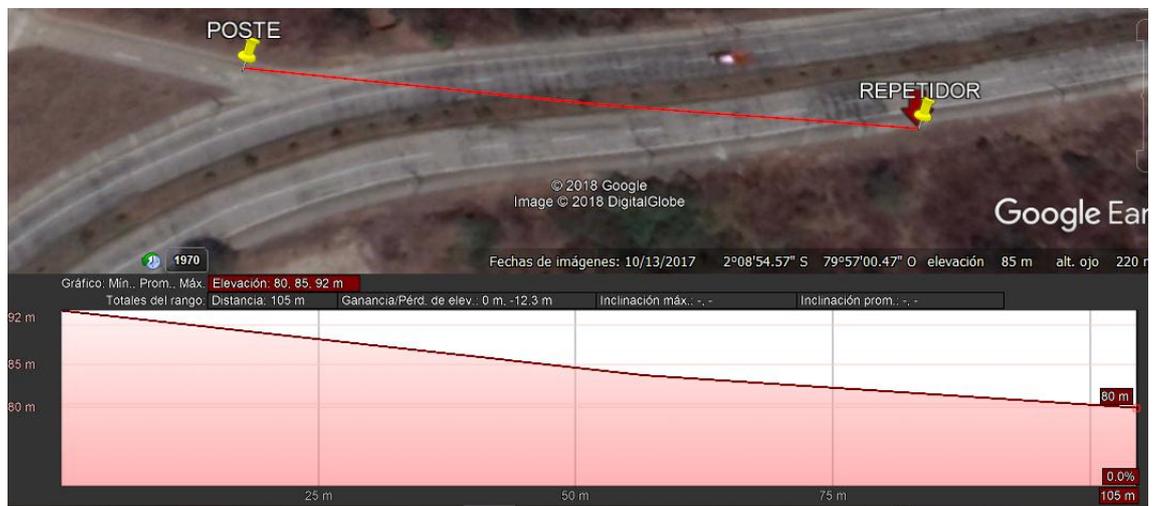


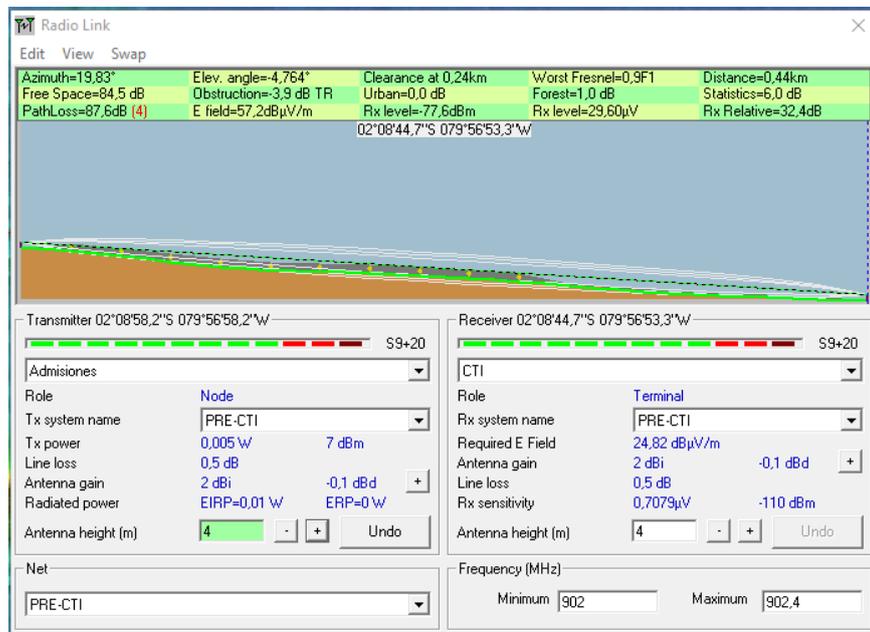
Figura 3. 5 Perfil de elevación de Escenario #2: Repetidor-Final

En la tabla 3.3 se detallan las distancias entre los nodos de los Escenarios 1 y 2.

Tabla 3. 3 Distancia de los nodos

	Escenario #1 [m]	Escenario #2 [m]
Coordinador- Repetidor	445	104
Repetidor-Nodo Final	337	155

Con la información previa se procedió a realizar las simulaciones de los enlaces de comunicación en Radio Mobile. Donde se obtuvieron los perfiles topográficos, pérdidas por ambiente, afectación de la zona de Fresnel y parámetros relevantes que se tomaron en cuenta para realizar un buen presupuesto de enlace. Los resultados obtenidos de la simulación para el Escenario #1 se evidencian en las figuras 3.7 y 3.8. Las figuras 3.9 y 3.10 muestran las simulaciones del Escenario #2.



**Figura 3. 7 Simulación del Escenario #1: Coordinador-
Repetidor**

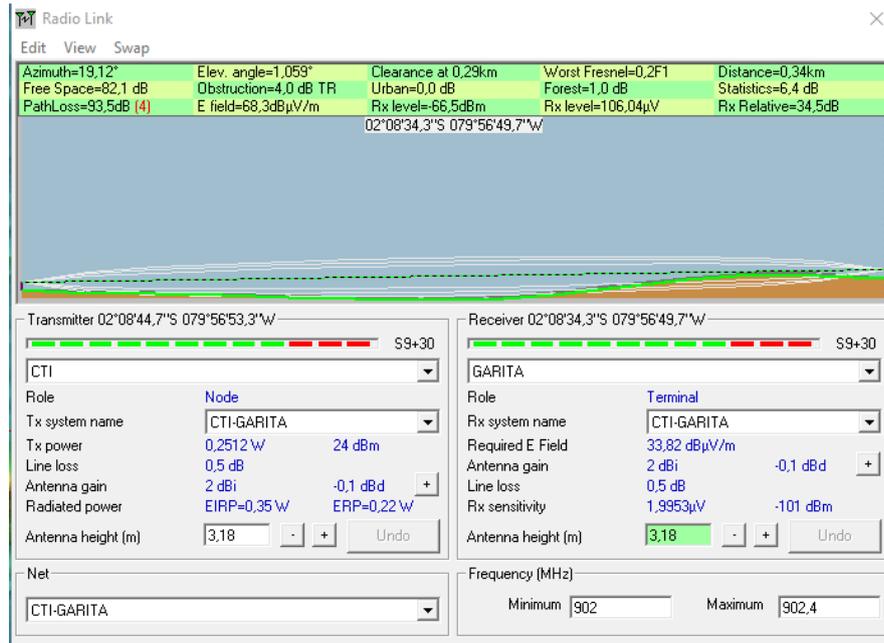


Figura 3. 8 Simulación del Escenario #1: Repetidor-Nodo

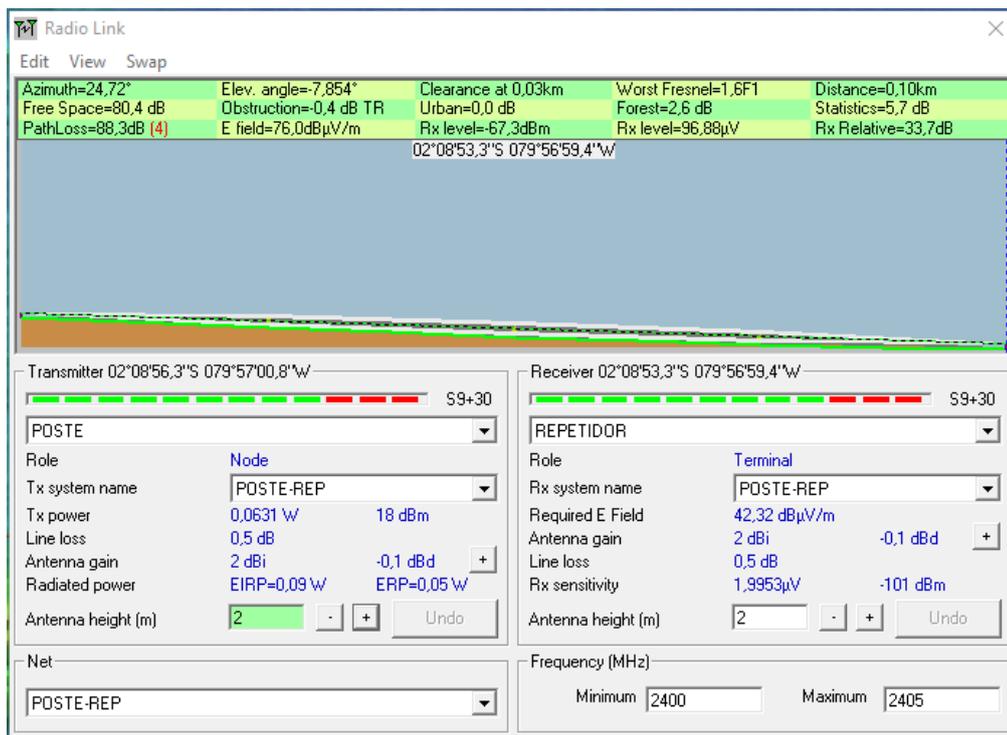


Figura 3. 9 Simulación del Escenario #2: Coordinador-Repetidor

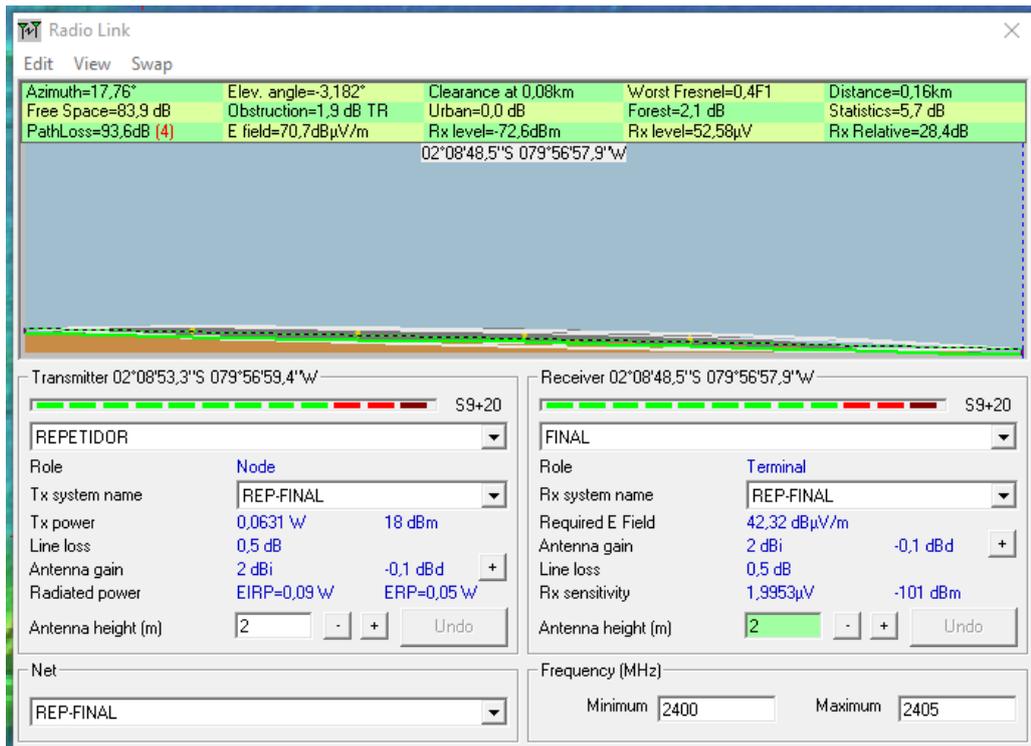


Figura 3. 10 Simulación del Escenario #2: Repetidor-NodoFinal

3.1.3. Programación de los módulos XBee

La configuración de los módulos XBee se realizó mediante el programa XCTU, donde se configuraron parámetros de radiofrecuencia de acuerdo a la funcionalidad de cada nodo en la red. Al conectar el módulo XBee al computador mediante el USB Explorer, se abre el programa XCTU y lo primero que se realiza es agregar el módulo RF que se conectó.

En el lado izquierdo del área de trabajo, se visualiza la lista de los módulos RF conectados, seleccionando uno de ellos se abre una pantalla con parámetros de configuración RF. A continuación, se muestran las configuraciones realizadas para los diferentes nodos de la red.

3.1.4. Configuración del XBee-PRO 900HP

En las tablas 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 se muestran las configuraciones realizadas para las diferentes funcionalidades de los nodos dentro de la red.

Tabla 3. 4 Parámetros de configuración del nodo coordinador de 900 MHz

Parámetro	Valor
Máscara de canal	0x0000000001FFFFFF
Canales activos	0 - 24
Potencia de transmisión	+24 dBm
Direccionamiento	0013A2004174F41D (dirección MAC del repetidor #1)
Modo de operación	Coordinador de mensajería indirecto

Tabla 3. 5 Parámetros de configuración del nodo repetidor #1 de 900 MHz

Parámetro	Valor
Máscara de canal	0x0000007FFFFFFF000
Canales activos	12 - 38
Potencia de transmisión	+24 dBm
Direccionamiento	0013A2004174F42F (dirección MAC del nodo final)
Modo de operación	Enrutador estándar

Tabla 3. 6 Parámetros de configuración del nodo final de 900 MHz

Parámetro	Valor
Máscara de canal	0x000FFFFFFE000000
Canales activos	25 – 51
Potencia de transmisión	+24 dBm
Direccionamiento	0013A2004174F41D (dirección MAC del nodo repetidor #1)
Modo de operación	Enrutador estándar

3.1.5. Configuración del XBee-PRO DigiMesh 2.4

En las tablas 3.8, 3.9 y 3.10 se muestran las configuraciones realizadas para las diferentes funcionalidades de los nodos dentro de la red.

Tabla 3. 7 Parámetros de configuración del nodo coordinador de 2.4 GHz

Parámetro	Valor
Canal activo	0x10
Potencia de transmisión	+0 dBm
Direccionamiento	0013A200417728AD (dirección MAC del nodo repetidor)
Modo de operación	Coordinador de mensajería indirecta

Tabla 3. 8 Parámetros de configuración del nodo repetidor de 2.4 GHz

Parámetro	Valor
Canal activo	0x10
Potencia de transmisión	+18 dBm
Direccionamiento	0013A200417728AA (dirección MAC del nodo final)
Modo de operación	Enrutador estándar

Tabla 3. 9 Parámetros de configuración del nodo final de 2.4 GHz

Parámetro	Valor
Canal activo	0x10
Potencia de transmisión	+0 dBm
Direccionamiento	0013A200417728AD (dirección MAC del nodo repetidor)
Modo de operación	Enrutador estándar

3.1.6. Metodología y resultados de la Primera Prueba

Una vez realizadas las configuraciones de parámetros de radio para cada módulo XBee, se ensamblaron las bases (torres, módulos XBee y antenas) en los puntos indicados que se muestran en la sección 3.1.2 dentro del campus de la ESPOL y se energizó con baterías, luego, se procedió a la obtención de datos realizando pruebas de tasa de datos y potencias recibidas en los nodos de la red mediante el software XCTU.

En primera instancia, se realizó un mapeo de la red para que se desplieguen las topologías, esto se realizó para los escenarios 1 y 2 por separado, como se puede ver en las figuras 3.11a y 3.11b respectivamente. Para esto, se usó el modo de Proceso de

Descubrimiento de Red en el XCTU cuyo símbolo se indica la figura 3.12. el cual permite descubrir y ver la topología de una red.

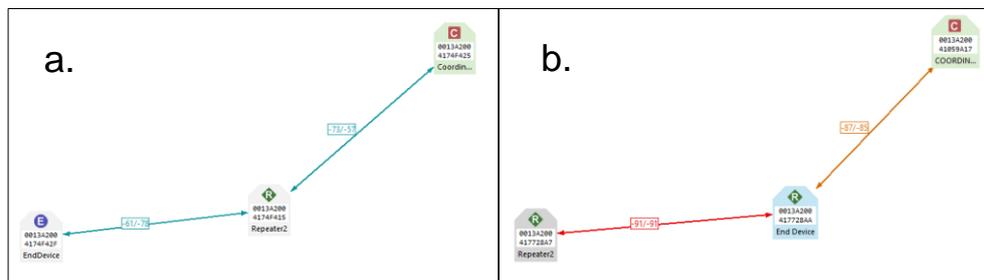


Figura 3. 11 (a)Topología de red del escenario 1. (b) Topología de red del escenario 2



Figura 3. 12 Modo Descubrimiento de Red

En la barra principal del XCTU se encuentra la sección de Herramientas XCTU, al desplegar su menú se encuentran un listado de herramientas integradas con diferentes funcionalidades. Para esta primera prueba, se hizo uso de la Herramienta de Prueba de Rango y la Herramienta de Rendimiento que se muestran en la figura 3.13. y se describen en las secciones posteriores.

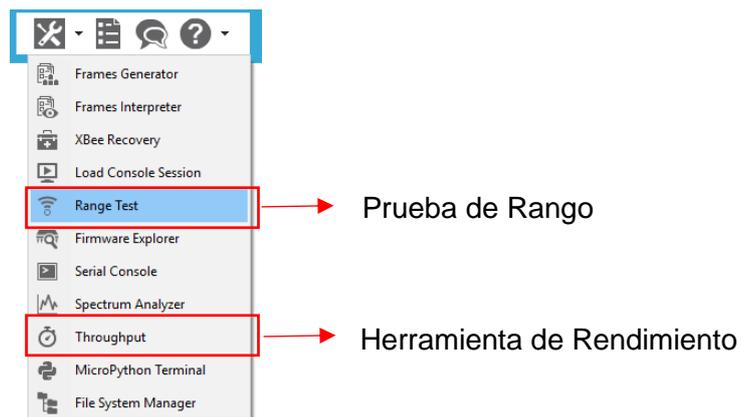


Figura 3. 13 Sección de herramientas del XCTU

3.1.7. Pruebas de Rango

Para realizar las Pruebas de Rango de los escenarios 1 y 2, se necesitó que un módulo XBee esté conectado a la laptop y añadido al XCTU, en este caso el coordinador, que funcionó como dispositivo local. A su vez, agregar la dirección de un módulo remoto en la misma red, los cuales fueron el repetidor y el nodo final.

Posteriormente, se seleccionó el número de paquetes que se enviaron desde el dispositivo local al remoto, en este caso se enviaron 50 paquetes, y por último se da clic en Comenzar Prueba de Rango, este proceso se visualiza en la figura 3.14.

Los resultados obtenidos de los escenarios 1 y 2 se muestran en las tablas 3.11 y 3.12 respetivamente.

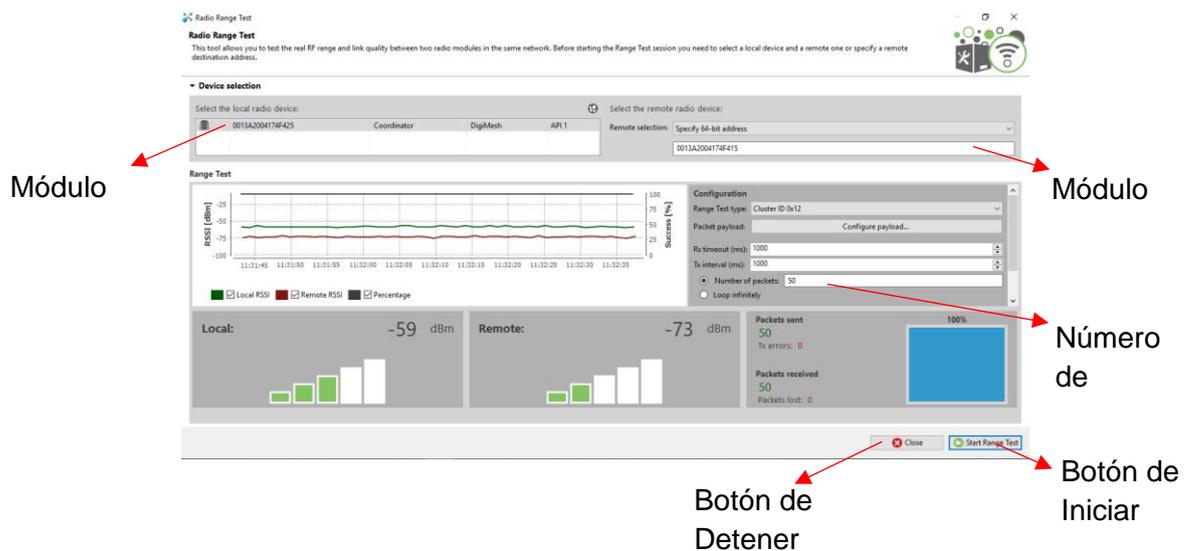
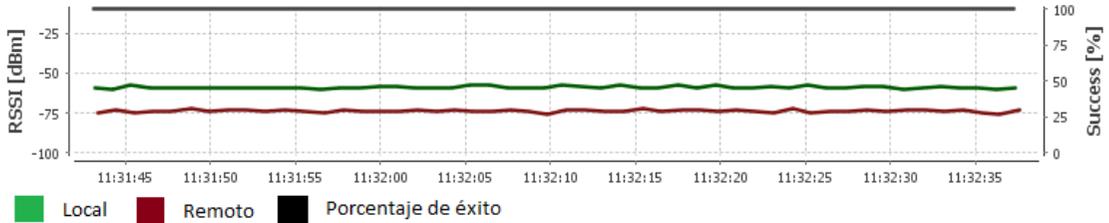
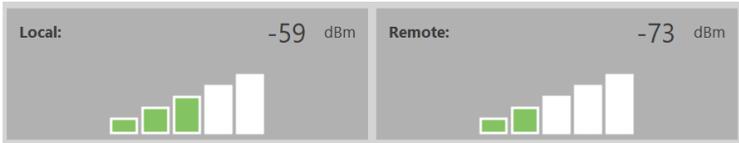


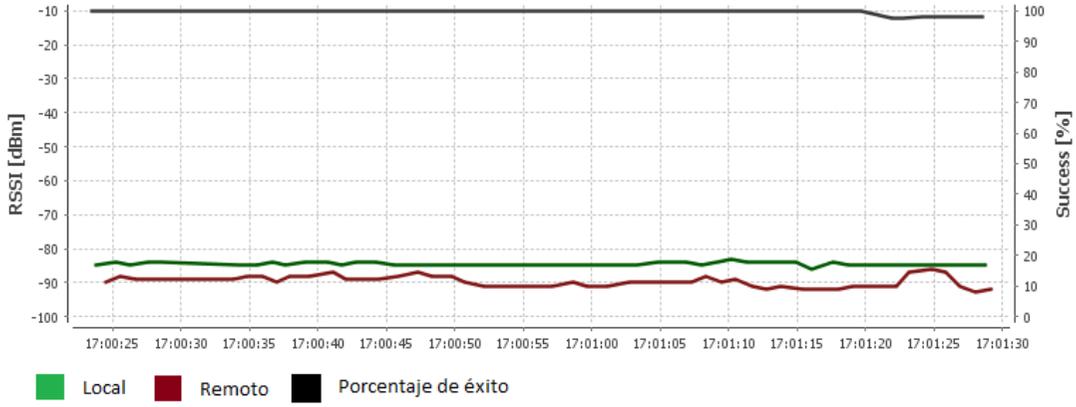
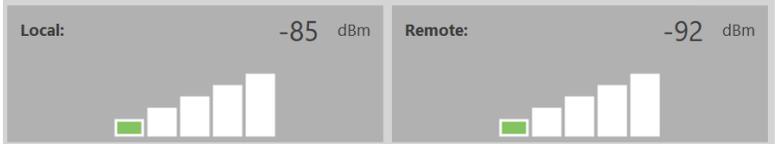
Figura 3. 14 Pasos para realizar una Prueba de Rango

Tabla 3. 10 Resultados de Prueba de Rango del Escenario #1 (XBee S3B)

Resultado	Campo	Descripción
<p>Coordinador a Repetidor</p>  <p>Gráfico RSSI: Indicador de fuerza de señal recibida</p>	<p>Gráfico RSSI: Indicador de fuerza de señal recibida</p>	<p>Representa la fuerza de la señal recibida en dBm del dispositivo local (coordinador) y dispositivo remoto (repetidor) durante la prueba.</p> <p>También contiene el porcentaje de éxito del total de paquetes enviados.</p>
	<p>Valores RSSI local y remoto</p>	<p>Muestra el valor instantáneo del RSSI, en dBm, del dispositivo local y remoto para el último paquete transmitido</p>
	<p>Estado de paquete</p>	<p>Indica el número total de paquetes enviados y recibidos, error de transmisión y paquetes perdidos.</p> <p>También muestra el porcentaje de éxito al enviar y recibir paquetes durante la prueba.</p>

<p>Coordinador a Nodo</p> <p>Legend: Local (Green), Remoto (Red), Porcentaje de éxito (Black)</p>	<p>Gráfico RSSI</p>	<p>Potencias recibidas en dBm del dispositivo local (coordinador) y dispositivo remoto (nodo) durante la prueba.</p>
	<p>Valores RSSI local y remoto</p>	<p>Potencia Coordinador=-58dBm Potencia del Nodo=-58 dBm</p>
	<p>Estado de paquete</p>	<p>% Éxito=78.43%</p> <p>Existe una pérdida de paquetes en la comunicación.</p>

Tabla 3. 11 Resultados de Prueba de Rango del Escenario #2 (XBee S2C)

Resultado	Campo	Descripción
<p>Coordinador a Repetidor</p>  <p>Legend: Local (Green), Remoto (Red), Porcentaje de éxito (Black)</p>	<p>Gráfico RSSI: Indicador de fuerza de señal recibida</p>	<p>Potencias recibidas en dBm del dispositivo local (coordinador) y dispositivo remoto (repetidor) durante la prueba.</p>
	<p>Valores RSSI local y remoto</p>	<p>Potencia Coordinador=-85dBm Potencia Repetidor= -92dBm</p>
	<p>Estado de paquete</p>	<p>Paquete perdido=1 %Éxito=98%</p>

Coordinador a Nodo

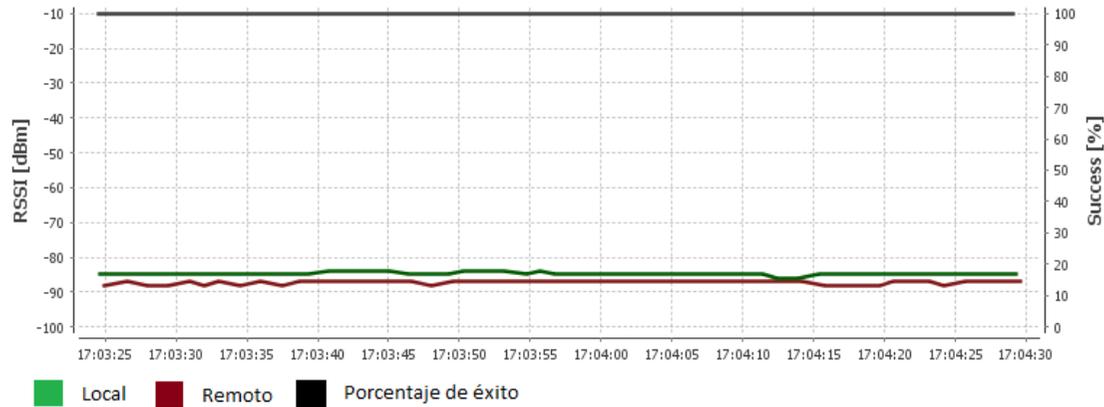
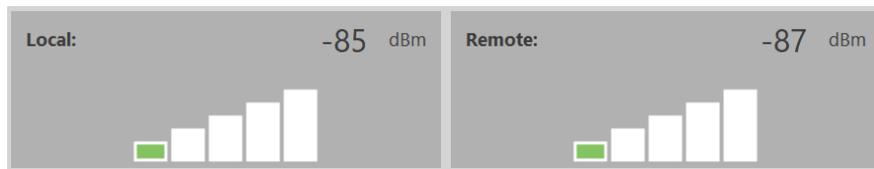


Gráfico RSSI

Potencias recibidas en dBm del dispositivo local (coordinador) y dispositivo remoto (nodo) durante la prueba.



Valores RSSI local y remoto

Potencia Coordinador=-85dBm

Potencia Nodo= -87dBm



Estado de paquete

Transmisión de paquetes completa

3.1.8. Pruebas de rendimiento

Con esta herramienta obtuvimos la tasa de transferencia entre dos módulos XBee dentro de la misma red. Al igual que la prueba de rango, se seleccionó un módulo local conectado al XCTU y otro módulo remoto que recibió los datos.

En la pestaña de configuración se configuró el número de paquetes enviados, en este caso se enviaron 50 paquetes. Finalmente, se da clic en Iniciar Prueba tal como se muestra en la figura 3.15.

Los resultados obtenidos de los escenarios 1 y 2 se muestran en las tablas 3.13 y 3.14 respectivamente.

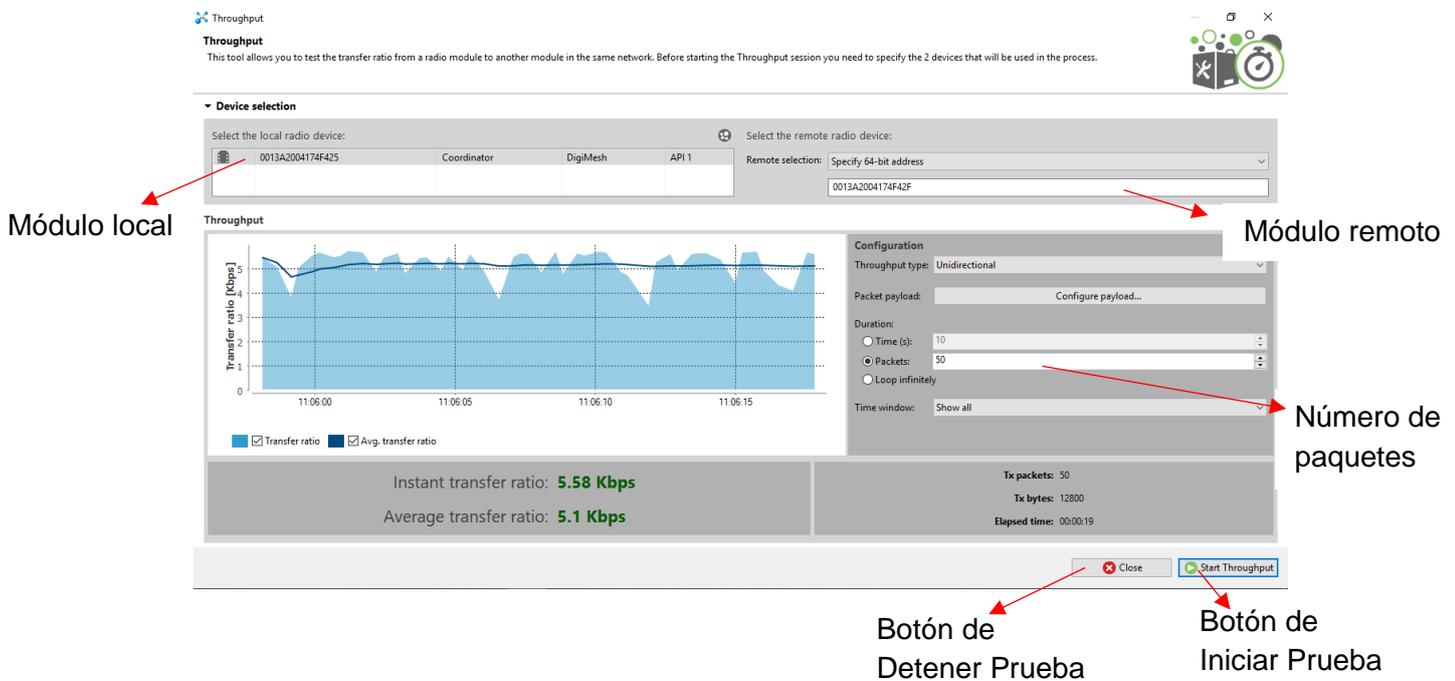
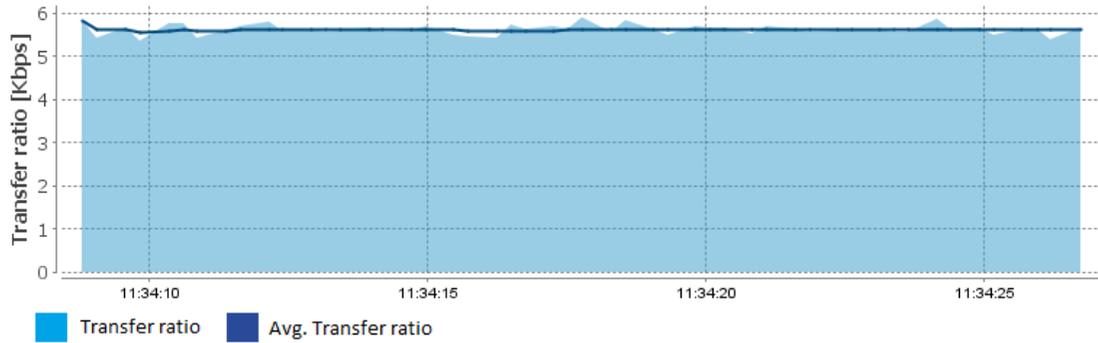


Figura 3. 15 Pasos para realizar una Prueba de Rendimiento

Tabla 3. 12 Resultados de Prueba de Rango del Escenario #1 (XBee S3B)

Resultado	Campo	Descripción
<p>Coordinador a Repetidor</p> 	<p>Gráfico de tasa de transferencia</p>	<p>El área azul claro representa la relación de transferencia instantánea.</p> <p>La línea azul oscura representa la relación de transferencia promedio.</p>
<p>Instant transfer ratio: 5.66 Kbps</p> <p>Average transfer ratio: 5.62 Kbps</p>	<p>Valores de tasa de datos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de datos instantánea=5.66 kbps • Tasa de datos promedio=5.62 kbps
<p>Tx packets: 50</p> <p>Tx bytes: 12800</p> <p>Elapsed time: 00:00:18</p>	<p>Estado</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Paquetes enviados=50 • Número de bytes transferidos=12800 • Duración de Sesión=18[s]

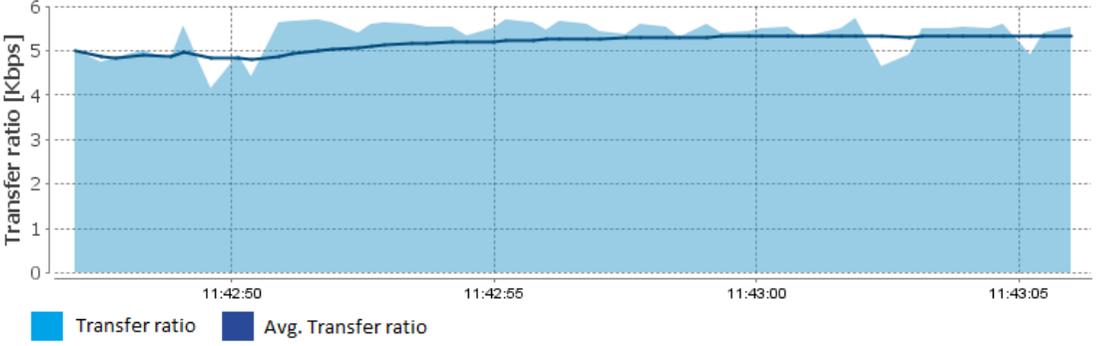
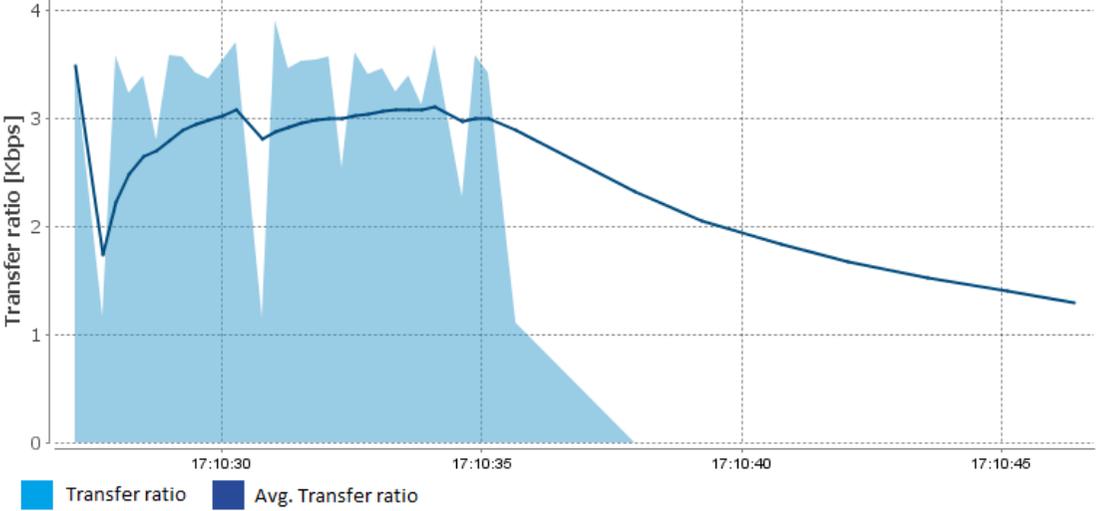
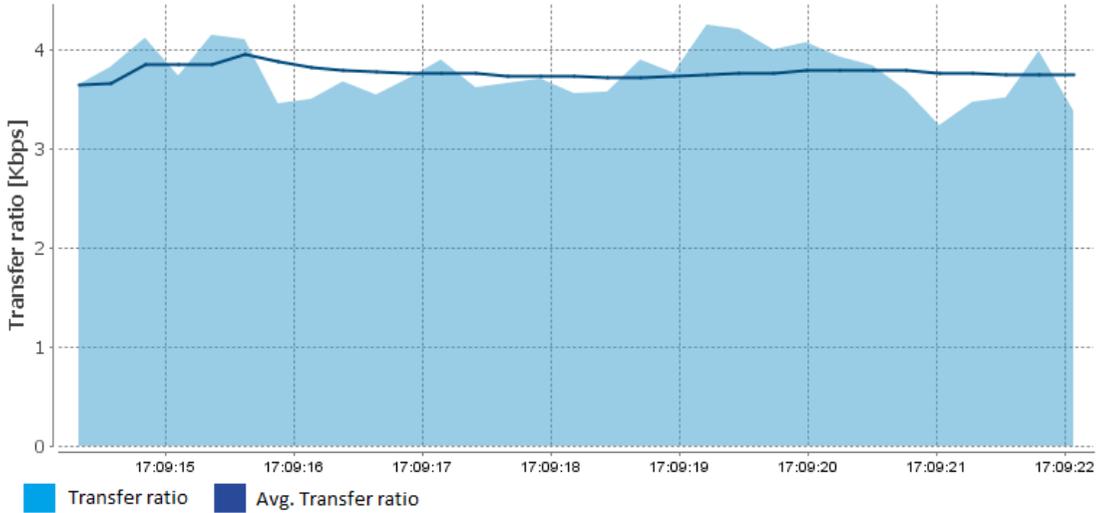
<p>Coordinador a Nodo</p>  <p>Transfer ratio [Kbps]</p> <p>11:42:50 11:42:55 11:43:00 11:43:05</p> <p>Transfer ratio Avg. Transfer ratio</p>	<p>Gráfico de tasa de transferencia</p>	<p>Relación promedio de transferencia= aprox. 5kbps</p>
<p>Instant transfer ratio: 5.52 Kbps</p> <p>Average transfer ratio: 5.33 Kbps</p>	<p>Valores de tasa de datos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de datos instantánea=5.52 kbps • Tasa de datos promedio=5.33 kbps
<p>Tx packets: 50</p> <p>Tx bytes: 12800</p> <p>Elapsed time: 00:00:19</p>	<p>Estado</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Paquetes enviados=50 • Número de bytes transferidos=12800 • Duración de Sesión=19[s]

Tabla 3. 13 Resultados de Prueba de Rango del Escenario #2 (XBee S2C)

Resultado	Campo	Descripción
<p>Coordinador a Repetidor</p>  <p>Transfer ratio [Kbps]</p> <p>17:10:30 17:10:35 17:10:40 17:10:45</p> <p>Transfer ratio Avg. Transfer ratio</p>	<p>Gráfico de tasa de transferencia</p>	<p>Se observa una variación en la transferencia de datos representada por los picos azul claro.</p> <p>También se observa que la línea azul oscuro decrece, representando una pérdida en la transmisión de datos.</p>
<p>Instant transfer ratio: 0.0 Kbps</p> <p>Average transfer ratio: 1.3 Kbps</p>	<p>Valores de tasa de datos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de datos instantánea=0 kbps • Tasa de datos promedio=1.3 kbps
<p>Tx packets: 43</p> <p>Tx bytes: 3139</p> <p>Elapsed time: 00:00:19</p>	<p>Estado</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Paquetes enviados=43 • Número de bytes transferidos=3139 • Duración de Sesión=19[s]

<p>Coordinador a Nodo</p> 	<p>Gráfico de tasa de transferencia</p>	<p>La relación promedio de transferencia de datos se mantiene estable durante toda la sesión.</p>
<p>Instant transfer ratio: 3.38 Kbps Average transfer ratio: 3.75 Kbps</p>	<p>Valores de tasa de datos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de datos instantánea=3.38 kbps • Tasa de datos promedio=3.75 kbps
<p>Tx packets: 50 Tx bytes: 3650 Elapsed time: 00:00:07</p>	<p>Estado</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Paquetes enviados=50 • Número de bytes transferidos=3650 • Duración de Sesión=7[s]

3.1.9. Segunda Prueba

La segunda prueba se realizó en las piscinas de camarones de la Estación Experimental Palmar CENAIM-ESPOL, consistió en obtener datos del desempeño de la red (potencia, tiempo de envío de tramas, transmisión de datos) en el ambiente camaronero para los Escenarios 1 y 2: XBee 900MHz y 2.4GHz respectivamente, variando la ganancia de las antenas y ubicación de los nodos. La figura 3.16 muestra un esquema general de esta prueba.

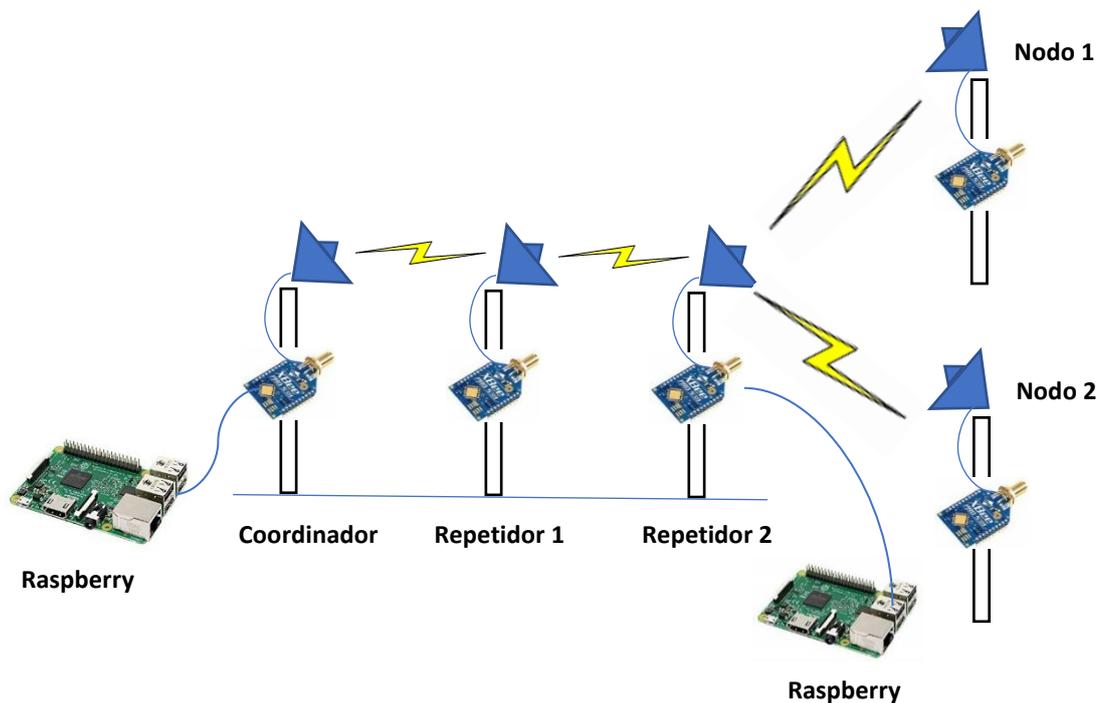


Figura 3. 16 Esquema general del sistema de la segunda prueba

La ubicación de los nodos que conforman esta red se muestra en la figura 3.17. La imagen de la derecha, figura 3.17a, es la red formada por los módulos XBee S3B. La imagen de la izquierda, figura 3.17b, es la red formada por los XBee S2C.

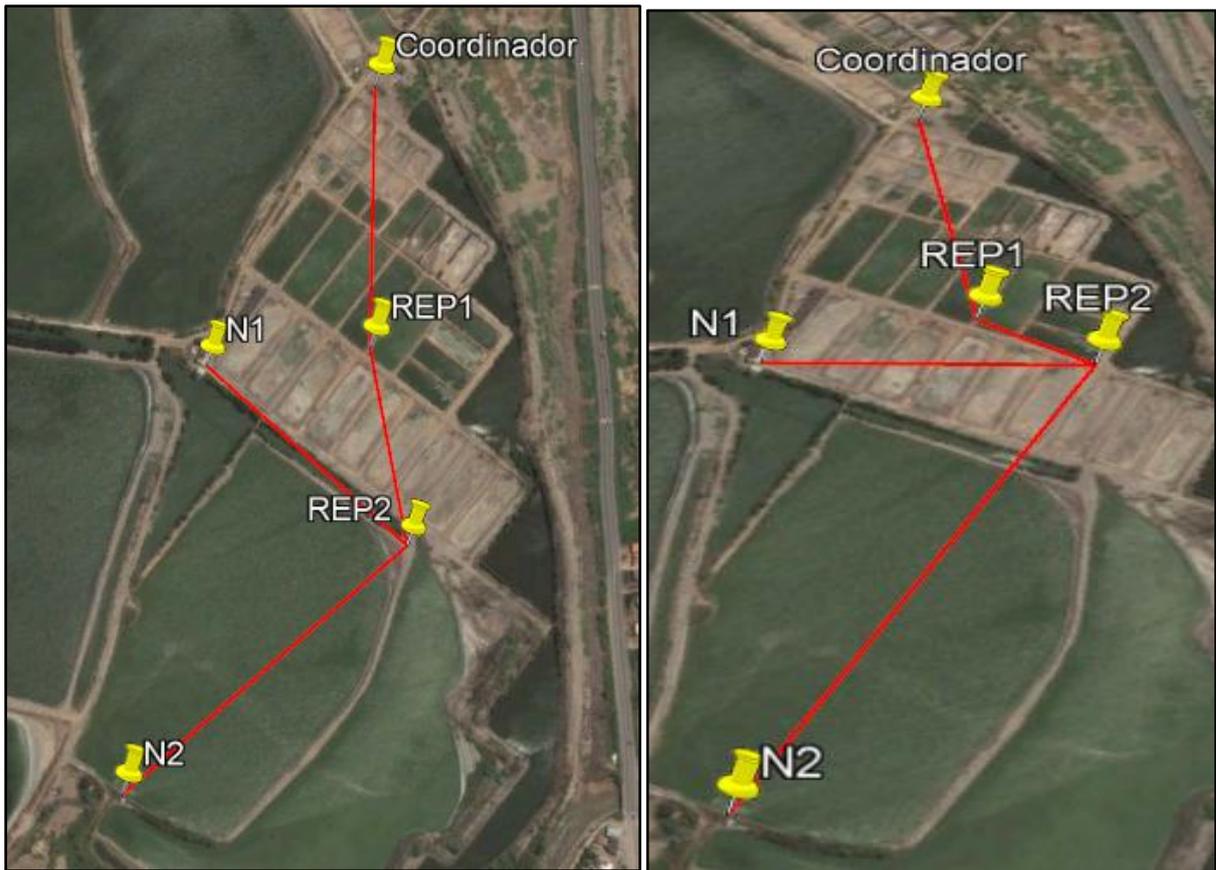


Figura 3. 17 (a) Topología de red usando XBee S3B (b) Topología de red usando XBee S2C

3.2. Captura de datos

Para la obtención de datos de potencia de recepción, tiempo de transmisión y estado de éxito se dispuso de un archivo de código en C que fue usado en dos computadoras y en 2 sistemas embebidos.

El programa se encarga de iniciar una comunicación entre 2 nodos para enviar un mensaje de prueba desde el módulo local hacia el módulo remoto y mediante una función llamada “myCB” que escribe los datos mencionados anteriormente en un archivo de texto. En la figura 3.18 se muestra un diagrama de flujo general del código del programa. Para que el programa se ejecute de forma repetitiva se utiliza un archivo bash que coloca la ejecución del programa en C dentro de un lazo que debe ser interrumpido por el usuario para detenerlo. En el caso de los sistemas embebidos, se modificó su

configuración para que la captura de datos se realizara inmediatamente luego de encenderse como un proceso en segundo plano.

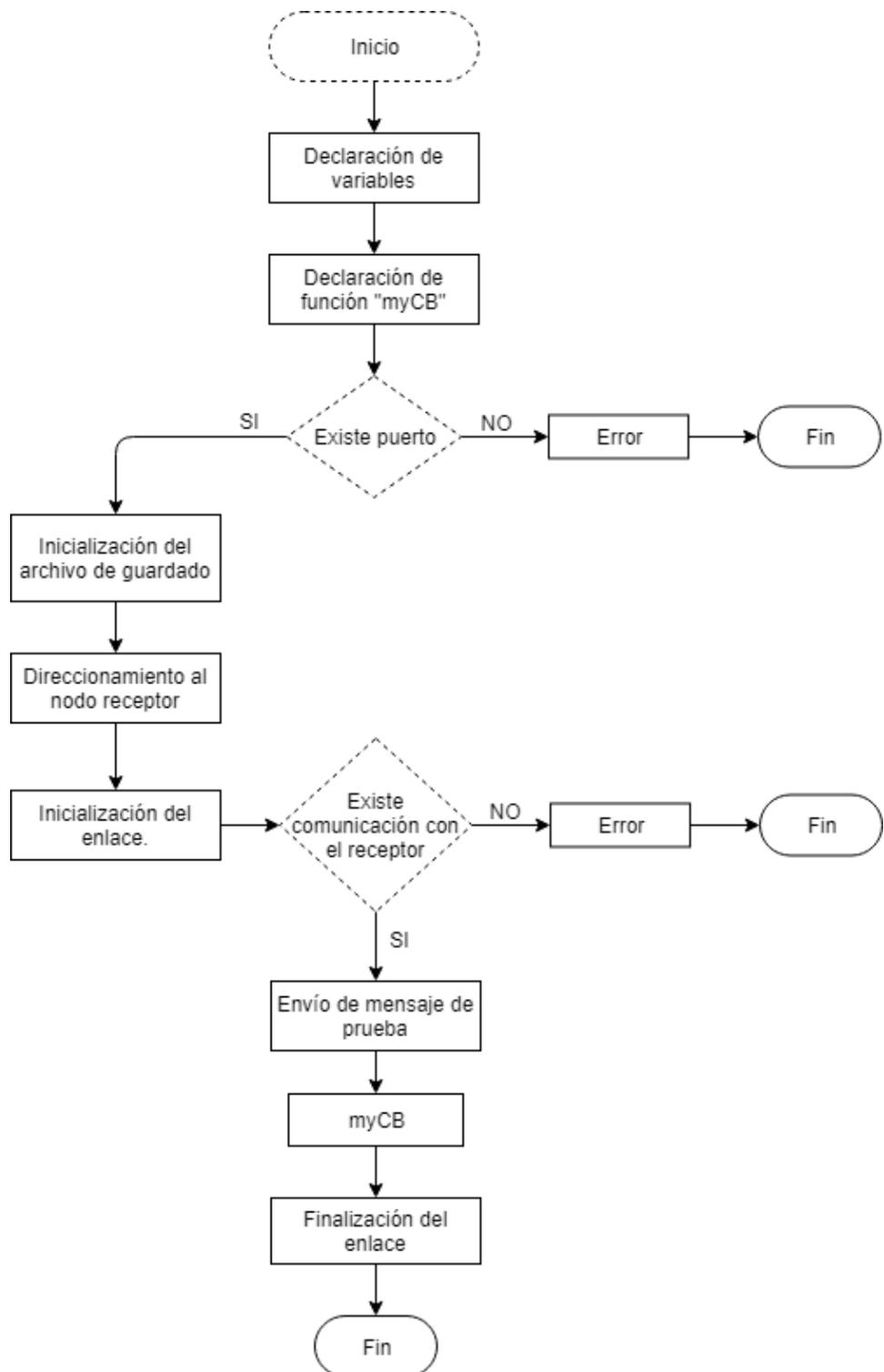


Figura 3. 18 Diagrama de flujo general del código para la captura de datos

3.3. Análisis Económico

El análisis de los costos del presente proyecto está compuesto por los materiales, dispositivos y módulos usados para el diseño y prueba de la red inalámbrica en campo real como se presenta en la tabla 3.15. La mayoría de los materiales se los obtiene fácilmente en tiendas electrónicas o por páginas de venta en Internet.

Tabla 3. 14 Materiales utilizados en la prueba #2

ÍTEM	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Módulo RF XBee-PRO 900HP (XBee S3B)	5	\$30.00	\$150.00
2	Módulo RF Xbee-PRO DigiMesh 2.4 (XBee S2C)	3	\$30.00	\$90.00
3	XBee Explorer USB	7	\$5.00	\$35.00
4	Raspberry Pi 3 modelo B	2	\$70.00	\$140.00
5	Batería portátil modelo PB-N39	3	\$19	\$57.00
6	Antena omnidireccional 2.4 GHz 0dBi y 10dBi	3	\$7.00	\$21.00
8	Antena omnidireccional 900Hz 0dBi y 4.5dBi	5	\$7.00	\$35.00
11	Cable extensor de antena 1mt hembra-hembra	5	\$3.00	\$15.00
			\$TOTAL	\$543.00

El precio total obtenido en la tabla 3.15 fue basado únicamente para el análisis previo al diseño final, realizándose diversas pruebas cambiando el modelo de antenas y los módulos RF XBee para determinar con cual se obtendría un mejor resultado en transmisión de datos y cobertura.

3.3.1. Viabilidad económica

Este sistema de comunicación inalámbrico también puede ser implementado en la industria, teniendo en cuenta la exposición al medio ambiente: temperaturas, condiciones climáticas, polvo, etc.

El valor total obtenido del diseño de este sistema, mostrado en la tabla 3.15, es un valor bajo en comparación con los beneficios que traería a la empresa. Ya que al tener grandes extensiones de terreno es mejor contar con un sistema inalámbrico que con un sistema de cableado tradicional, debido a que este último requiere un mayor costo en instalación y un manteniendo respectivo más riguroso. Considerando la extensión que se logró cubrir en las pruebas de campo y los resultados obtenidos en la transmisión de datos, se concluye que este diseño es económicamente viable.

Cabe destacar que existen en el mercado una amplia gama de módulos RF y antenas de mayor ganancia que las usadas en el diseño propuesto, con las que se podría tener mejores resultados de cobertura y transmisión a un mayor costo económico. Sin embargo, para fines de investigación académica, se buscó diseñar la red inalámbrica a un bajo costo monetario cuyos resultados fueron aceptables para el ambiente camaronero.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de la red de comunicación realizadas en la camaronera usando el programa que se detalla en la sección 3.2. Finalmente, se realiza el análisis del desempeño de los módulos XBee S3B Y S2C.

4.1. Simulación en Radio Mobile

A continuación, se presenta la simulación realizada en el software Radio Mobile de algunos de los puntos que conforman ambas redes. Para el Escenario 1 (XBeeS3B), se realizaron dos pruebas, ambas usando la máxima potencia de transmisión de 24 dBm. La primera fue usando antenas omnidireccionales de ganancias de 0dBi en todos los puntos de la red. En la segunda se utilizaron 3 antenas omnidireccionales de ganancias 4.5dBi colocadas en el Repetidor 1, Repetidor 2 y en el Nodo 2, en los nodos restantes se usaron las antenas de 0dbi. La figura 4.1a, 4.1b y 4.1c muestra estas simulaciones con las antenas de 0dbi. La figura 4.2a, 4.2b y 4.2c muestra estas simulaciones usando las antenas de 4.5dBi.

Para el Escenario 2 (XBee S2c) la potencia de trasmisión usada fue la máxima de valor 18 dBm, se realizaron dos pruebas usando antenas omnidireccionales de ganancias de 0dBi y 9.3dBi en todos sus nodos. Las figuras 4.3 y 4.4 muestra dichas simulaciones.

Para todas las pruebas se usaron bases para las antenas con alturas de 3 metros al igual que en la simulación.

a)	Azimuth=180,66°	Elev. angle=-0,015°	Clearance at 0,11km	Worst Fresnel=0,7F1	Distance=0,22km
	Free Space=78,4 dB	Obstruction=-2,9 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,2 dB
	PathLoss=79,7dB (4)	E field=80,1dB μ V/m	Rx level=-56,7dBm	Rx level=328,58 μ V	Rx Relative=44,3dB
b)	Azimuth=263,31°	Elev. angle=-0,002°	Clearance at 0,07km	Worst Fresnel=0,9F1	Distance=0,14km
	Free Space=74,3 dB	Obstruction=-5,5 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,6 dB
	PathLoss=73,3dB (4)	E field=86,5dB μ V/m	Rx level=-50,3dBm	Rx level=683,36 μ V	Rx Relative=50,7dB
c)	Azimuth=228,13°	Elev. angle=-0,010°	Clearance at 0,16km	Worst Fresnel=0,6F1	Distance=0,31km
	Free Space=81,4 dB	Obstruction=0,7 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,2 dB
	PathLoss=86,3dB (4)	E field=73,5dB μ V/m	Rx level=-63,3dBm	Rx level=153,26 μ V	Rx Relative=37,7dB

Figura 4. 1 Resultados de simulación entre los puntos S3B con antenas omnidireccionales de 0dBi: a) Coordinador-Repetidor1 b) Repetidor1-Nodo1 c) Repetidor2-Nodo2

a)	Azimuth=180,66°	Elev. angle=-0,015°	Clearance at 0,11km	Worst Fresnel=0,7F1	Distance=0,22km
	Free Space=78,4 dB	Obstruction=-2,9 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,2 dB
	PathLoss=79,7dB (4)	E field=84,6dB μ V/m	Rx level=-47,7dBm	Rx level=926,08 μ V	Rx Relative=53,3dB
b)	Azimuth=263,31°	Elev. angle=-0,002°	Clearance at 0,07km	Worst Fresnel=0,9F1	Distance=0,14km
	Free Space=74,3 dB	Obstruction=-5,5 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,6 dB
	PathLoss=73,3dB (4)	E field=91,0dB μ V/m	Rx level=-41,3dBm	Rx level=1925,98 μ V	Rx Relative=59,7dB
c)	Azimuth=228,13°	Elev. angle=-0,010°	Clearance at 0,16km	Worst Fresnel=0,6F1	Distance=0,31km
	Free Space=81,4 dB	Obstruction=0,7 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,2 dB
	PathLoss=86,3dB (4)	E field=78,0dB μ V/m	Rx level=-54,3dBm	Rx level=431,94 μ V	Rx Relative=46,7dB

Figura 4. 2 Resultados de simulación entre los puntos S3B con antenas omnidireccionales de 4.5dBi: a) Coordinador-Repetidor1 b) Repetidor1-Nodo1 c) Repetidor2-Nodo2

a)	Azimuth=210,29°	Elev. angle=-0,013°	Clearance at 0,14km	Worst Fresnel=1,0F1	Distance=0,27km
	Free Space=88,8 dB	Obstruction=-6,0 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,8 dB
	PathLoss=87,6dB (4)	E field=74,7dB μ V/m	Rx level=-70,6dBm	Rx level=66,22 μ V	Rx Relative=30,4dB
b)	Azimuth=219,49°	Elev. angle=-0,012°	Clearance at 0,21km	Worst Fresnel=0,8F1	Distance=0,41km
	Free Space=92,4 dB	Obstruction=-5,0 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,3 dB
	PathLoss=91,7dB (4)	E field=70,6dB μ V/m	Rx level=-74,7dBm	Rx level=41,14 μ V	Rx Relative=26,3dB

Figura 4. 3 Resultados de simulación s entre los puntos S2C con antenas omnidireccionales de 0dBi: a) Coordinador-Nodo1 b) Repetidor2-Nodo2

a)	Azimuth=0,66°	Elev. angle=0,013°	Clearance at 0,11km	Worst Fresnel=1,1F1	Distance=0,22km
	Free Space=86,9 dB	Obstruction=-5,0 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,3 dB
	PathLoss=86,2dB (4)	E field=85,4dB μ V/m	Rx level=-50,6dBm	Rx level=657,29 μ V	Rx Relative=50,4dB
b)	Azimuth=167,73°	Elev. angle=-0,015°	Clearance at 0,14km	Worst Fresnel=1,0F1	Distance=0,28km
	Free Space=89,1 dB	Obstruction=-6,0 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,8 dB
	PathLoss=87,9dB (4)	E field=83,8dB μ V/m	Rx level=-52,3dBm	Rx level=546,05 μ V	Rx Relative=48,7dB
c)	Azimuth=219,49°	Elev. angle=-0,012°	Clearance at 0,21km	Worst Fresnel=0,8F1	Distance=0,41km
	Free Space=92,4 dB	Obstruction=-5,0 dB TR	Urban=0,0 dB	Forest=0,0 dB	Statistics=4,3 dB
	PathLoss=91,7dB (4)	E field=79,9dB μ V/m	Rx level=-56,1dBm	Rx level=350,17 μ V	Rx Relative=44,9dB

Figura 4. 4 Resultados de simulación entre los puntos S2C con antenas omnidireccionales de 9.3dBi: a) Repetidor1-Coordinador b) Coordinador-Repetidor2 c) Repetidor2-Nodo2

La calidad del enlace se determina según el color de la línea entre los módulos. El color verde significa que la conexión es muy fuerte, la línea color amarillo representa una conexión moderada y el color rojo indica un enlace débil.

Existen enlaces que poseen una mejor calidad de conexión con sus nodos adyacentes que otros, esto es debido a que las ondas electromagnéticas tienen mayor refracción en medios acuáticos que en medios terrestres, por lo que las moléculas de agua de las piscinas camaroneras capturan algo de la energía transmitida [2].

4.2. Evaluación de los resultados de la red de comunicación

En esta parte se realizó la supervisión de la captura de datos, tal como se describe en la sección 3.2, desde diferentes puntos de la red. En la figura 4.5 se muestran los datos arrojados por el programa el cual está compuesto por cuatro columnas separadas por comas. La primera columna representa la fecha actual (hora y año), en la segunda columna se muestra la potencia recibida en dBm del módulo remoto, la tercera columna indica el estado de éxito de envío de una trama siendo el número 0 la representación de estado exitoso y el 1 como no exitoso, y en la cuarta columna se muestra el tiempo de transmisión en nanosegundos.

Para ambos módulos se capturaron datos del programa durante 15 minutos, enviando tramas cada 5 segundos.

Fecha/hora	Potencia	Estado de éxito	Tiempo de transmisión
Tue Jan 15 17:18:54 2019	-40,0	352902412	
Tue Jan 15 17:18:58 2019	-40,0	562077931	
Tue Jan 15 17:19:02 2019	-40,0	784297430	
Tue Jan 15 17:19:07 2019	-40,0	10302384	
Tue Jan 15 17:19:11 2019	-40,0	28493161	
Tue Jan 15 17:19:15 2019	-40,0	438574841	
Tue Jan 15 17:19:19 2019	-40,0	661543687	
Tue Jan 15 17:19:23 2019	-40,0	885160399	
Tue Jan 15 17:19:28 2019	-40,0	124468389	
Tue Jan 15 17:19:32 2019	-40,0	349879046	
Tue Jan 15 17:19:36 2019	-40,0	572143335	
Tue Jan 15 17:19:40 2019	-40,0	796156138	
Tue Jan 15 17:19:45 2019	-40,0	19659644	
Tue Jan 15 17:19:49 2019	-40,0	245252002	
Tue Jan 15 17:19:53 2019	-40,0	467776497	
Tue Jan 15 17:19:57 2019	-40,0	691435645	
Tue Jan 15 17:20:01 2019	-40,0	931221426	
Tue Jan 15 17:20:06 2019	-40,0	154007879	
Tue Jan 15 17:20:10 2019	-40,0	361580003	
Tue Jan 15 17:20:14 2019	-40,0	584791457	
Tue Jan 15 17:20:18 2019	-40,0	809015870	
Tue Jan 15 17:20:23 2019	-40,0	32389468	
Tue Jan 15 17:20:27 2019	-40,0	255946020	
Tue Jan 15 17:20:31 2019	-40,0	479684221	
Tue Jan 15 17:20:35 2019	-40,0	702907748	
Tue Jan 15 17:20:39 2019	-40,0	928333388	

Figura 4. 5 Datos obtenidos por el programa en código C

Para la obtención de datos a través del programa, se seleccionó un módulo local que recibió los datos enviados por un módulo remoto de la red. Con estos datos obtenidos se hizo uso del programa Matlab para procesar toda la información adquirida. A continuación, en las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 se muestran las gráficas obtenidas de Matlab para los Escenarios 1 y 2 usando las antenas mencionadas en la sección 4.1. En la parte izquierda se observa la tasa de datos en kbps obtenida entre los nodos especificados y también muestra una tasa de datos promedio. En la parte derecha se muestra un gráfico de las potencias recibidas en dBm y un promedio de este.

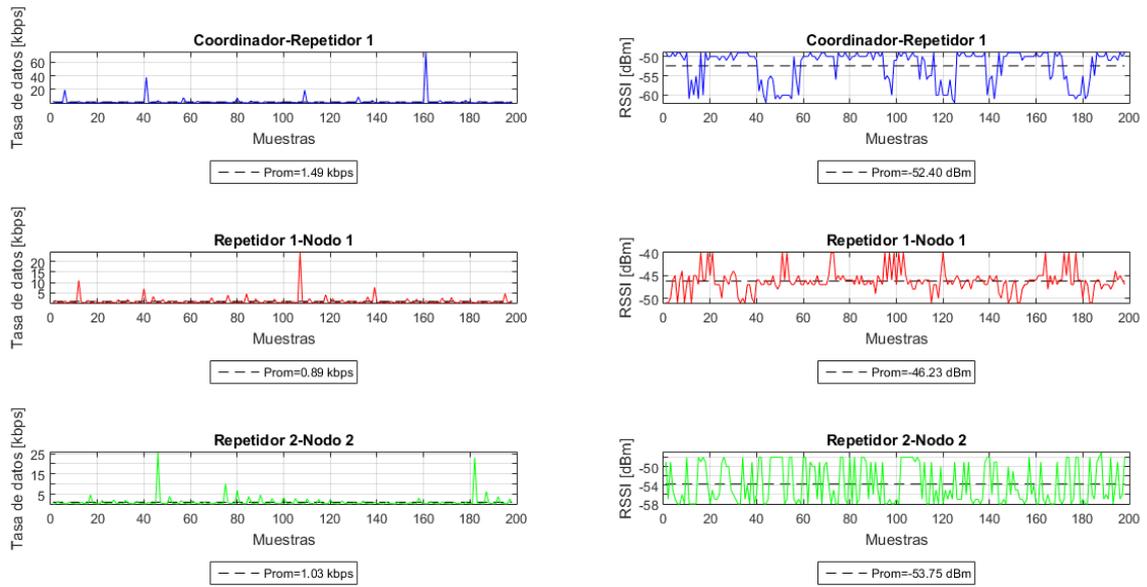


Figura 4. 6 Gráficas obtenidos en Matlab de la red de S3B usando antenas omnidireccionales de 0 dBi

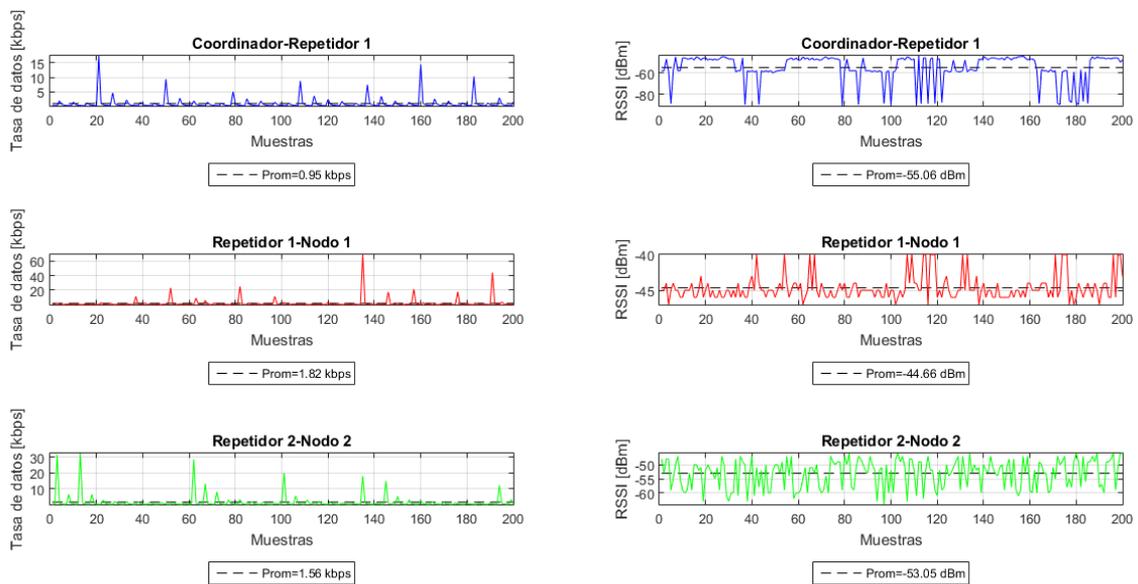


Figura 4. 7 Gráficas obtenidos en Matlab de la red de S3B usando antenas omnidireccionales de 4.5 dBi

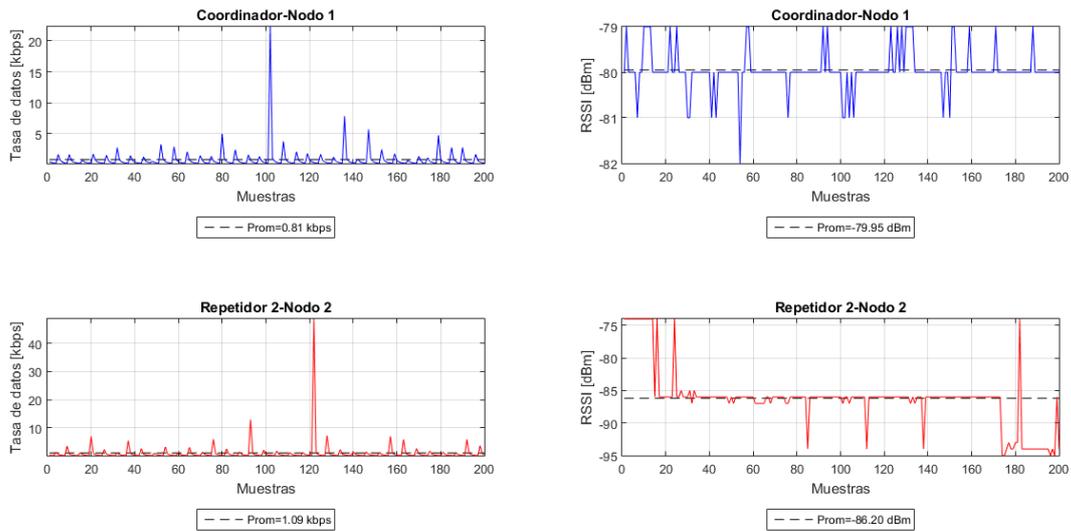


Figura 4. 8 Gráficas obtenidos en Matlab de la red de S2C usando antenas omnidireccionales de 0 dBi

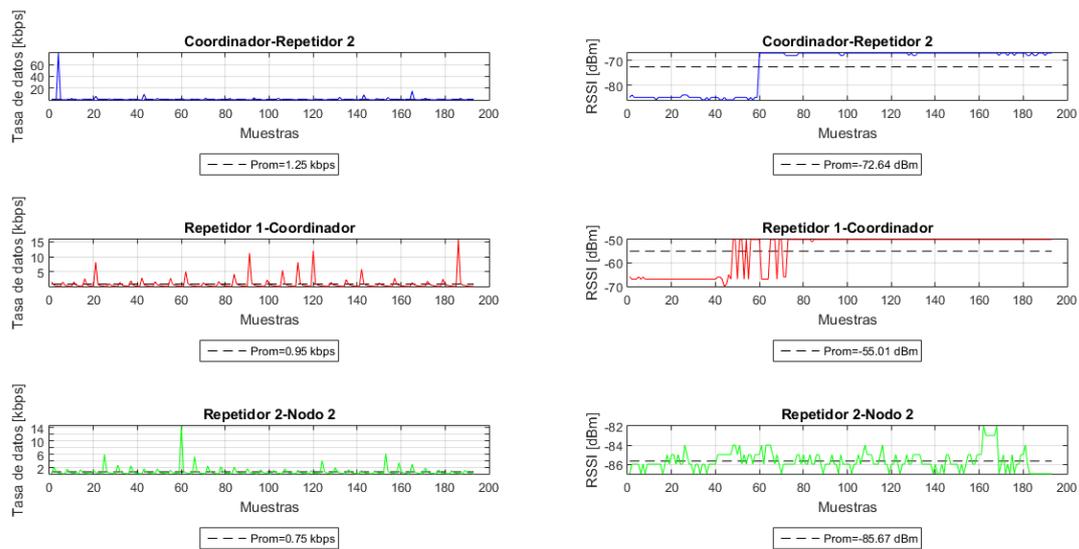


Figura 4. 9 Gráficas obtenidos en Matlab de la red de S2C usando antenas omnidireccionales de 9.3 dBi

Los datos obtenidos muestran una baja tasa de transmisión de datos, esto debido a que en un entorno acuático la onda electromagnética tiene mayor difracción que en un entorno de tierra.

Se observa que para los escenarios 1, con módulos XBee S3B, y 2, con módulos XBee S2C, se obtienen mayores potencias de recepción usando las antenas de ganancias 4.5dBi y 9.3dBi respectivamente. A continuación, se realiza la comparación de las potencias de recepción obtenida de los enlaces simulados en la sección 4.1 con las potencias recibidas de las pruebas de la camaronera mostradas en las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9. La ecuación 4.1 muestra el porcentaje de diferencia entre estos valores.

$$\%Diferencia = \frac{\text{Simulado} - \text{Experimental}}{\text{Simulado}} * 100\% \quad (4.1)$$

Tabla 4. 1 Cuadro de diferencias entre los valores de potencias recibidas en las simulaciones y campo real

Enlace	Valor de Potencia recibida Simulado [dBm]	Valor de Potencia recibida Experimental [dBm]	% Diferencia
S3B 0dBi Cordinador-Repetidor1	-56.7	-52.40	7.58%
S3B 0dBi Repetidor1-Nodo1	-50.3	-46.23	8.09%
S3B 0dBi Repetidor2-Nodo2	-63.3	53.75	15.08%
S3B 4.5dBi Cordinador-Repetidor1	-47.7	-55.06	15.4%
S3B 4.5dBi Repetidor1-Nodo1	-41.3	-44.66	7.99%
S3B 4.5dBi Repetidor2-Nodo2	-54.3	-53.05	2.30%
S2C 0dBi Coordinador-Nodo1	-70.6	-79.95	13.24%
S2C 0dBi Repetidor2-Nodo2	-74.7	86.20	15.3%

S2C 9.3 dBi Repetidor1- Coordinador	-50.6	-55.01	8.71%
S2C 9.3 dBi Coordinador- Repetidor2	-52.3	-72.64	38.8%
S2C 9.3 dBi Repetidor2-Nodo2	-56.1	-85.67	52.70%

Las simulaciones en RadioMobile no toman en cuenta ciertos factores del ambiente en el que se pretende colocar la red lo cual debe tomarse en cuenta si se desea utilizar esta herramienta para diseñar la red.

De acuerdo a la teoría de propagación por onda de espacio, las pérdidas en el trayecto para el caso de estudio pueden expresarse de la siguiente manera: [21]

$$L_T = L_{\text{free space}} + L_{\text{reflection}} \quad (4.2)$$

$$L_{\text{free space}} = -20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (4.3)$$

$$L_{\text{reflection}} = 20 \log \left[\left| 1 + \rho \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \right) \right| \right] \quad (4.4)$$

$$\Delta R = \sqrt{d^2 + h^2} - d \quad (4.5)$$

Donde:

$L_T \equiv$ Pérdida de trayecto.

$L_{\text{free space}} \equiv$ Pérdida en el espacio libre.

$L_{\text{reflection}} \equiv$ Pérdida por rayos reflejados en el terreno.

$\lambda \equiv$ Longitud de onda correspondiente a la banda de operación.

$d \equiv$ Distancia de separación entre transmisor y receptor.

$\rho \equiv$ Coeficiente de reflexión en la frontera aire – agua salada.

$\Delta R \equiv$ Diferencia de caminos entre los rayos.

$h \equiv$ Altura de las antenas.

En la figura 4.10 se muestra las representaciones gráficas para las frecuencias de 900 MHz y 2.4 GHz usando coeficientes de reflexión: -0.95 y -0.8 respectivamente y siguiendo modelo descrito por las ecuaciones 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6. [22]

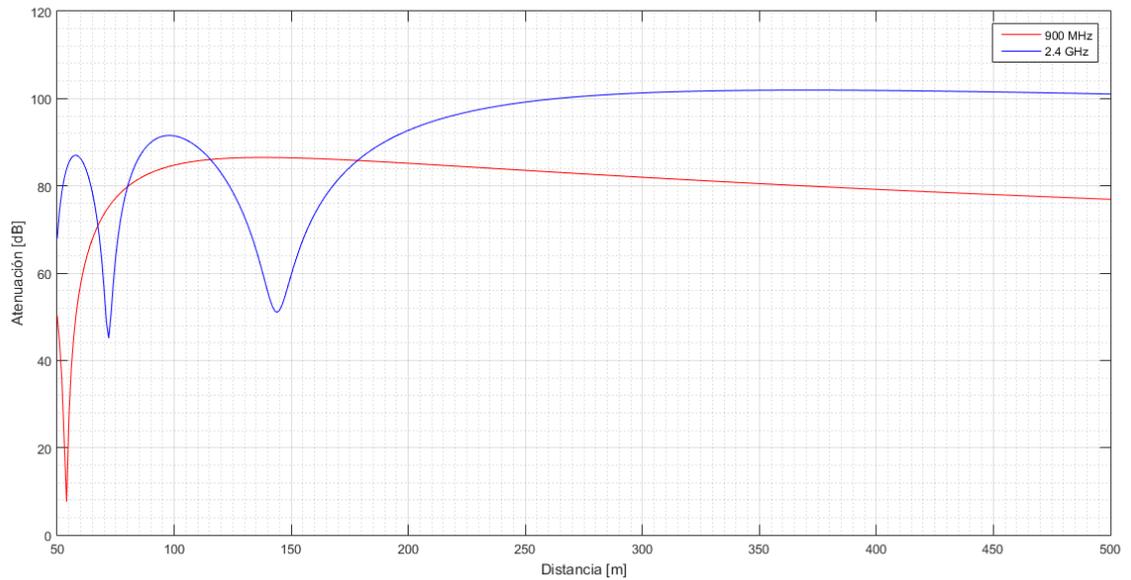


Figura 4. 10 Gráfica de pérdidas en el trayecto para el caso de estudio

CONCLUSIONES

Los módulos de 900 MHz son óptimos para usarse en una red inalámbrica en el ambiente de las piscinas camaroneras porque los efectos de la presencia de agua salada son menores en comparación a los módulos de 2.4 GHz.

Los módulos de 2.4 GHz presentaron tasa de datos menores que los dispositivos de 900 MHz a pesar de contar con un mayor ancho de banda, esto es debido a que las potencias de recepción fueron inferiores lo que hacía que el enlace fuese menos estable.

Los módulos de 900 MHz permiten cubrir mayores distancias ante la presencia de obstáculos y vegetación debido a que pueden transmitir a potencias más altas que los módulos de 2.4 GHz y a las longitudes de onda relativamente largas propias de la banda de operación.

Las bajas tasas de datos de deben a las distancias entre los nodos y a las interferencias originadas por las transmisiones de datos desde varios nodos dentro de un mismo intervalo de tiempo.

RECOMENDACIONES

Las simulaciones en RadioMobile podrían no tomar en cuenta ciertos factores del ambiente en el que se pretende colocar la red lo cual debe tomarse en cuenta si se desea utilizar esta herramienta para diseñar la red.

El programa XCTU es una buena herramienta de mapeo de redes inalámbricas que utilizan los módulos XBee porque muestra un aproximado de las potencias recibidas y mediante colores muestra la calidad de los enlaces.

Si se desean utilizar los módulos de 2.4 GHz es importante considerar el efecto de las obstrucciones entre los enlaces dado que, en esta banda de frecuencias, los obstáculos provocan atenuaciones altas. También es bueno recordar que podrían existir muchas interferencias en esta banda.

Se recomienda que los dispositivos electrónicos, tales como los módulos XBee, tengan algún tipo de protección cuando se trabaje en ambientes con agua salada, la salinidad en el aire puede sulfatar los componentes electrónicos causando una reducción de la vida útil de los dispositivos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. d. A. y. Pesca, «Plan de Electrificación fue socializado en la provincia de Guayas,» [En línea]. Available: <http://www.acuaculturaypesca.gob.ec/subpesca3739-plan-de-electrificacion-fue-socializado-en-la-provincia-de-guayas.html>.
- [2] G. Sacarelo, Gabriela Romero y MSc. PatriciaChávez, «Implementación de un Sistema Experimental de Monitoreo Basado en una Red Inalámbrica para Comparar el Consumo de Energía y Calidad de Servicio de una Red de Sensores en un Entorno Acuático,» 2014.
- [3] V. Mayalarp, N. Limpaswadpaisarn, T. Poombansao y S. Kittipiyakul, «Wireless Mesh Networking with XBee». School of Information, Computer, and Communication Technology, SIIT, Thammasat University, Thailand.
- [4] C. Ouyang, «Design and Implementation of a Wireless ZigBee». VAASAN University of Applied Sciences, Finland 2014.
- [5] M. Rouse, «Topología de Red de Malla,» 2014. [En línea]. Available: <https://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/Topologia-de-red-de-malla-red-de-malla>.
- [6] «digi.com,» [En línea]. Available: <https://www.digi.com/>.
- [7] Digi, «Digi XBee-Pro 900HP Datasheet,» [En línea]. Available: https://www.digi.com/pdf/ds_xbeepro900hp.pdf.
- [8] Digi, «Digi XBee DigiMesh 2.4 datasheet,» [En línea]. Available: https://www.digi.com/pdf/ds_xbeedigimesh24.pdf.
- [9] «XBee Explorer USB,» [En línea]. Available: <https://www.gizmojo.com.ar/products/sparkfun-xbee-explorer-usb>.
- [10] Digi.com, «XCTU: Next Generation Configuration Platform for XBee/RF Solutions,» [En línea]. Available: <https://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/xctu-software/xctu>.
- [11] «Wireless Mesh Networking: Zigbee vs DigiMesh,» [En línea]. Available: https://www.digi.com/pdf/wp_zigbeevsdigimesh.pdf?fbclid=IwAR0dIDzHgsc-7eKsEPb3fSAUmTd-FEB45tY-EHGCVQRKF3BCn1JqcPgrmnE.
- [12] M. Bleakmore, «Differences between DigiMesh and Zigbee Mesh,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.digi.com/blog/what-are-the-differences-between-digimesh-and-zigbee-mesh/>.
- [13] J. Contreras Figueroa, «Integración de placa Raspberry Pi con shield Xbee,» 2017. [En línea]. Available: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-1000/UCC1489_01.pdf.

- [14] C. Vera, J. Barbosa y D. Pabón, «Parámetros de configuración en módulos XBee PRO S2B ZB para medición de variables ambientales,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257040047012.pdf>.
- [15] «ZigBee/XBee,» 2017. [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/16/zigbeexbee/>.
- [16] «Manual de uso de Radio Mobile,» [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6989/Anexo%2016.pdf> .
- [17] «Zona de Fresnel,» 2014. [En línea]. Available: <http://mundotelecomunicaciones1.blogspot.com/2014/10/zona-de-fresnel.html>.
- [18] J. Seybold, Introduction to RF Propagation, 1958.
- [19] T. C. Aguilar, «Los Sistemas Embebidos En La Industria 4.0». 2017.
- [20] «Raspberry Pi 3,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrystore.com/raspberry-pi-3.php>.
- [21] «Propagación de Ondas en Medio Natural,» [En línea]. Available: http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiacion-y-propagacion/contenidos/apuntes/tema3_2004.pdf.
- [22] G. Hattab, M. El-Tarhuni, M. Al-Ali, T. Joudeh y N. Qaddoumi, «An Underwater Wireless Sensor Network with Realistic Radio Frequency Path Loss Model». 2013.

ANEXOS

ANEXO A

Características de módulos y dispositivos electrónicos

- Datasheet XBee S3B 900

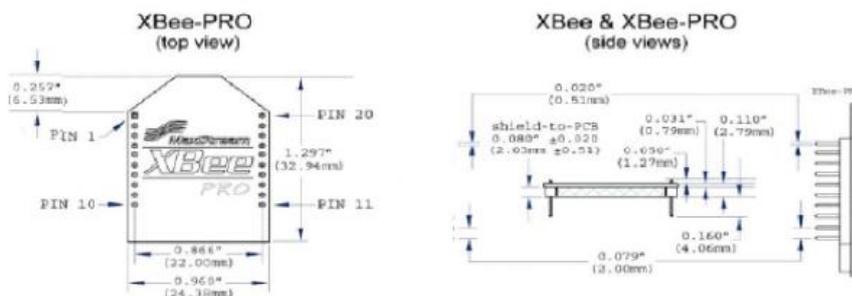
XBee-PRO 900HP Specifications

Specifications of the **XBee-PRO® 900HP/XBee-PRO® XSC RF Module**

Specification	XBee	General	
Performance		**Operating Frequency Band	902 to 928 MHz (software selectable channels)
* Indoor/Urban Range	10kbps: up to 2000 ft (610m) 200kbps: up to 1000 ft (305m)	Dimensions	1.297" x 0.962" x 0.215" (3.29cm x 2.44cm x 0.546cm) Note: Dimensions do not include connector/antenna or pin lengths
* Outdoor RF line-of-sight Range	10kbps: up to 9 miles (15.5km) 200kbps: up to 4 miles (6.5km) (with 2.1dB dipole antennas)	Weight	5 to 8 grams, depending on the antenna option
Transmit Power Output	24 dBm (250 mW) (software selectable)	Operating Temperature	-40° to 85° C (industrial)
RF Data Rate (High)	200 kbps	Antenna Options	Integrated wire, U. FL RF connector, Reverse-polarity SMA connector
RF Data Rate (Low)	10 kbps	Digital I/O	15 I/O lines,
Serial UART interface	CMOS Serial UART, baud rate stability of <1%	ADC	4 10-bit analog inputs
Serial Interface Data Rate (software selectable)	9600-230400 baud	Networking & Security	
Receiver Sensitivity (typical)	-101 dBm, high data rate, -110 dBm, low data rate	Supported Network Topologies	Mesh, point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer
Power Requirements		Number of Channels, user selectable channels	64 channels available
Supply Voltage	2.1 to 3.6 VDC** **Supply voltages of less than 3.0V may result in reduced performance. Output power and receiver sensitivity may be degraded.	Addressing Options	PAN ID, Preamble ID, and 64-bit addresses
Transmit Current	PL=4 : 215mA typical, (290mA max) PL=3 : 160mA typical PL=2 : 120mA typical PL=1 : 95mA typical PL=0 : 60mA typical	Encryption	128 bit AES
Idle / Receive Current	29mA typical at 3.3V, (35mA max)		
Sleep Current	2.5 µA (typical)		

XBee-PRO 900HP Mechanical Drawings

Mechanical drawings of the XBee-PRO 900HP RF Modules (antenna options not shown). All dimensions are in inches.



- Datasheet XBee S2C 2.4

SPECIFICATIONS	Digi XBee® S2C DigiMesh® 2.4	DigiXBee-PRO® S2C DigiMesh® 2.4
PERFORMANCE		
TRANSCIVER CHIPSET	Silicon Labs EM357 SoC	Silicon Labs EM357 SoC
DATA RATE	RF 250 Kbps, Serial up to 1 Mbps	RF 250 Kbps, Serial up to 1 Mbps
INDOOR/URBAN RANGE	200 ft (60 m)	300 ft (90 m)
OUTDOOR/RF LINE-OF-SIGHT RANGE	4000 ft (1200 m)	2 miles (3200 m)
TRANSMIT POWER	3.1 mW (+5 dBm) / 6.3 mW (+8 dBm) boost mode	63 mW (+18 dBm)
RECEIVER SENSITIVITY (1% PER)	-100 dBm / -102 dBm boost mode	-101 dBm
FEATURES		
SERIAL DATA INTERFACE	UART, SPI	UART, SPI
CONFIGURATION METHOD	API or AT commands, local or over-the-air (OTA)	API or AT commands, local or over-the-air (OTA)
FREQUENCY BAND	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
FORM FACTOR	Through-Hole, Surface Mount	Through-Hole, Surface Mount
HARDWARE	S2C	S2C
ADC INPUTS	(4) 10-bit ADC inputs	(4) 10-bit ADC inputs
DIGITAL I/O	15	15
ANTENNA OPTIONS	Through-Hole: PCB Antenna, U.FL Connector, RPSMA Connector, or Integrated Wire; SMT: RF Pad, PCB Antenna, or U.FL Connector	
OPERATING TEMPERATURE	-40° C to +85° C	-40° C to +85° C
DIMENSIONS (L X W X H) AND WEIGHT	Through-Hole: 0.960 x 1.087 in (2.438 x 2.761 cm) SMT: 0.866 x 1.33 x 0.120 in (2.199 x 3.4 x 0.305 cm)	Through-Hole: 0.960 x 1.297 in (2.438 x 3.294 cm) SMT: 0.866 x 1.33 x 0.120 in (2.199 x 3.4 x 0.305 cm)
NETWORKING AND SECURITY		
PROTOCOL	XBee DigiMesh 2.4 (Proprietary 802.15.4 based mesh protocol)	XBee DigiMesh 2.4 (Proprietary 802.15.4 based mesh protocol)
UPDATABLE TO DIGI 802.15.4 PROTOCOL	Yes	Yes
UPDATABLE TO ZIGBEE PROTOCOL	Yes	Yes
INTERFERENCE IMMUNITY	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
ENCRYPTION	128-bit AES	128-bit AES
RELIABLE PACKET DELIVERY	Retries/Acknowledgements	Retries/Acknowledgements
IDS	PAN ID and addresses, cluster IDs and endpoints (optional)	PAN ID and addresses, cluster IDs and endpoints (optional)
CHANNELS	16 channels	15 channels
POWER REQUIREMENTS		
SUPPLY VOLTAGE	2.1 to 3.6V	2.7 to 3.6V
TRANSMIT CURRENT	33 mA @ 3.3 VDC / 45 mA boost mode	120 mA @ 3.3 VDC
RECEIVE CURRENT	28 mA @ 3.3 VDC / 31 mA boost mode	31 mA @ 3.3 VDC
POWER-DOWN CURRENT	<1 µA @ 25° C	<1 µA @ 25° C

- Datasheet Raspberry Pi 3 Modelo B

Raspberry Pi 3 Model B+		2
Specifications		
Processor:	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4GHz	
Memory:	1GB LPDDR2 SDRAM	
Connectivity:	<ul style="list-style-type: none"> ■ 2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE ■ Gigabit Ethernet over USB 2.0 (maximum throughput 300Mbps) ■ 4 × USB 2.0 ports 	
Access:	Extended 40-pin GPIO header	
Video & sound:	<ul style="list-style-type: none"> ■ 1 × full size HDMI ■ MIPI DSI display port ■ MIPI CSI camera port ■ 4 pole stereo output and composite video port 	
Multimedia:	H.264, MPEG-4 decode (1080p30); H.264 encode (1080p30); OpenGL ES 1.1, 2.0 graphics	
SD card support:	Micro SD format for loading operating system and data storage	
Input power:	<ul style="list-style-type: none"> ■ 5V/2.5A DC via micro USB connector ■ 5V DC via GPIO header ■ Power over Ethernet (PoE)–enabled (requires separate PoE HAT) 	
Environment:	Operating temperature, 0–50 °C	
Compliance:	For a full list of local and regional product approvals, please visit www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b+	
Production lifetime:	The Raspberry Pi 3 Model B+ will remain in production	

Pruebas realizadas en las piscinas camaroneras del CENAIM



