



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS
CON TECNOLOGÍA ZIGBEE PARA MONITOREO DE MINAS
ARTESANALES SUBTERRÁNEAS EN ECUADOR”**

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO/A EN TELECOMUNICACIONES

JANNETH GABRIELA PABLO ESPINOSA

XAVIER ANTONIO MERINO ZAMBRANO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haber sido mi guía, a mis padres Manuel y Janneth por ser mi motor y apoyo absoluto en cada momento de esta etapa académica que he concluido, a mis hermanos Manuel Alejandro, Karla y Manuel Andree por haber creído en mí y a mi abuelita Luz por sus oraciones y su gran anhelo de verme salir adelante siempre. A mi compañero Xavier por su paciencia y empeño que demostró a lo largo del desarrollo de nuestro proyecto integrador.

A la familia Blacio-Romero por su interés y ayuda incondicional para la ejecución de este proyecto.

A ESPOLE por los conocimientos adquiridos, por las amistades realizadas, por mis mentores de carrera y por haber sido mi hogar estos últimos años.

Janneth Pablo

AGRADECIMIENTO

Mi mayor agradecimiento va dirigido a mis padres Xavier y Grace quienes siempre han demostrado su apoyo y confianza ante cada una de las decisiones que tomé en el transcurso de esta etapa de formación profesional, a mis hermanos Gabriela y Alfonso los cuales me hacen sentir como pilar importante en sus vidas y ser su ejemplo a seguir, motivándome a continuar y lograr este propósito fijado, a mis queridos abuelos Vicente, Leonor, Germania y quien en vida fue Arturo, agradezco por sus sabios consejos, sus palabras oportunas, ejemplo de superación e infinito engreimiento que tienen hacia mí, impidiendo que me dé por vencido, creyendo en mí aunque yo lo haya dejado de hacer, a mis amadas primas Verónica, Johanna, Andrea quienes son mis hermanas de crianza y mi ejemplo de éxito.

Agradezco a mis más fraternos amigos a los que han estado presente siempre desde mucho antes del inicio de este sueño y a los que llegaron en el transcurso de este proceso, demostrando ser solidarios y grandes confidentes y a todas aquellas personas que se presentaron en esta etapa de vida dando sus aportaciones. En especial agradezco a mi compañera y ahora colega Gabriela Pablo quien desde un principio mostró su más sincera amistad y tenacidad para lograr sus objetivos.

Agradezco a las familias Pablo-Espinosa y Blacio-Romero por la predisposición y apoyo incondicional brindado durante la elaboración de este proyecto.

Para culminar, pero no menos importante, agradezco a cada uno de los docentes, que tienen esa vocación de enseñar, compartir sus conocimientos y experiencias vividas en el ámbito laboral, profesores que a lo largo de esta etapa muy aparte de ser mentores se convirtieron en amigos y consejeros, mi sincero agradecimiento a la Ing. Maricela Freire, Ing. Verónica Ojeda y Ph.D. Boris Ramos por haber sido los guías en el desarrollo y éxito de este proyecto con el cual alcanzo el título de Ingeniero.

Xavier Merino

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedica a los mineros artesanales de Ecuador, quienes a diario trabajan explotando la tierra a pesar de los riesgos que esta labor implica, siendo esta actividad sustento de muchos hogares y a su vez es un aporte a la matriz económica del país.

Al cantón Zaruma, en la provincia de El Oro, por la calidez de sus habitantes, en especial a los artesanos que laboran en la mina Reina del Cisne III, que durante el tiempo en el cual se desarrolló este proyecto fueron amables y predispuestos hacia las necesidades y eventualidades que se presentaron.

A los profesionales y futuros colegas ingenieros, extendiendo la carta de invitación hacia la investigación en esta área laboral, siendo este proyecto primicia en el pro desarrollo de la actividad minera del país, dando pie al avance tecnológico en el entorno minero.

Janneth Gabriela Pablo Espinosa
Xavier Antonio Merino Zambrano

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



**Ph.D. Boris Gabriel
Ramos Sánchez**

PROFESOR DE MATERIA
INTEGRADORA

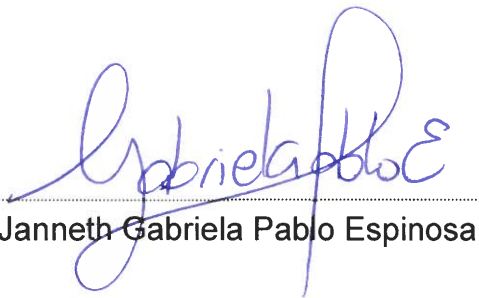


**MSc. Carlos Enrique
Valdivieso Armendáriz**

TUTOR ACADÉMICO

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y 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"



Janneth Gabriela Pablo Espinosa



Xavier Antonio Merino Zambrano

RESUMEN

En Ecuador, la minería artesanal ha sido el sustento económico de muchas familias a través del tiempo, esta labor se ha realizado de manera empírica a través de las décadas sin el aprovechamiento de los avances tecnológicos. Este proyecto realizado en la mina Sociedad Minera Reina del Cisne III, ubicada a 15 minutos de la ciudad de Zaruma, provincia de El Oro, tiene el afán de mejorar la producción minera y más aún preservar la salud y el bienestar de los artesanos mineros, presentando a continuación el proceso de desarrollo del diseño de una red de sensores inalámbricos basada en tecnología ZigBee, para el monitoreo de minas artesanales subterráneas, fundamentado en estudios y metodologías realizadas en galerías extranjeras sobre la propagación de señales RF, con el fin de desarrollar tecnológicamente la labor minera. Zigbee trabaja bajo el estándar IEEE 802.15.4, haciéndola apropiada para estos ambientes debido a la baja tasa de datos y bajo consumo de energía. Este tipo de módulos inalámbricos son de bajo costo adquisitivo y de mantenimiento simple.

La metodología empleada para poder diseñar la red se basa en el modelo de propagación por desvanecimiento, aplicado a los escenarios: LOS y NLOS definidos en el interior de la mina. Este modelo estima los valores de pérdida causada por las atenuaciones a la que se ve expuesta la señal transmitida, debido a los mecanismos de propagación presentes en el canal radio, a su vez permite determinar la distancia de separación deseadas entre los nodos para el diseño de la red, con esta distancia teóricamente hallada se procede a ubicar los módulos, y como técnica final se comprueban los indicadores de potencia de recepción y calidad de enlace para cada nodo mediante el software XCTU, permitiendo realizar las correcciones pertinentes en cada caso.

Palabras Clave: ZigBee, XCTU, pérdida de trayecto, línea de vista, no línea de vista, minas subterráneas, modelo de propagación.

ABSTRACT

In Ecuador, artisanal mining has been the economic support of many families over time. This work has been done empirically through the decades without taking advantage of technological advances. This project carried out at “Sociedad Minera Reina del Cisne III” mine, located 15 minutes from the city of Zaruma, El Oro province, has the desire to improve mining production and even more to preserve the health and well-being of the mining artisans, presenting then the process of developing the design of a wireless sensor network based on ZigBee technology, for the monitoring of underground artisanal mines, based on studies and methodologies carried out in galleries about the propagation of RF signals, to develop the technology mining work. Zigbee works under the IEEE 802.15.4 standard, making it suitable for these environments due to the low data rate and low power consumption. This type of wireless modules are low purchasing cost and simple maintenance.

The methodology used to design the network is based on the fade propagation model, applied to the scenarios: LOS and NLOS defined at the inside of the mine. This model estimates the loss values caused by the attenuations, to which the transmitted signal is exposed due to the propagation mechanisms present in the radio channel, in turn allows to determine the desired separation distance between the nodes for the design of the network, with this distance theoretically found, the modules can be located, and as a final technique the indicators of reception power and link quality for each node are checked using XCTU software, allowing to make the pertinent corrections in each case.

Keywords: ZigBee, XCTU, path loss, line of sight, non-line of sight, under-ground mines, propagation model.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| RESUMEN | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| ÍNDICE GENERAL..... | iii |
| ABREVIATURAS | v |
| SIMBOLOGÍA | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS | ix |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1. RECONOCIMIENTO DEL OBJETO DE ESTUDIO DEL PROYECTO | 1 |
| 1.1 Introducción | 1 |
| 1.2 Descripción del problema..... | 3 |
| 1.3 Objetivos..... | 5 |
| 1.3.1 Objetivo General | 5 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 5 |
| 1.4 Contexto Ambiental..... | 6 |
| 1.4.1 Coordenadas del lugar..... | 6 |
| 1.4.2 Mapa geográfico | 8 |
| 1.4.3 Descripción del ambiente..... | 8 |
| 1.5 Fundamentación Teórica..... | 10 |
| CAPÍTULO 2..... | 14 |
| 2. DETALLES DE LAS HERRAMIENTAS A UTILIZAR PARA EL DISEÑO DE LA RED DE SENSORES INAMLÁMBRICOS A IMPLEMENTAR EN LA MINA SUBTERRÁNEA | 14 |
| 2.1 ZigBee IEEE 802.15.4..... | 14 |
| 2.1.1 Protocolo ZigBee | 16 |
| 2.1.2 Pila de protocolo ZigBee | 19 |
| 2.1.3 Topologías | 21 |
| 2.2 XBee | 23 |
| 2.3 XCTU | 25 |
| 2.3.1 RSSI | 27 |
| 2.4 Modelo de propagación..... | 28 |

| | |
|---|----|
| 2.4.1 Pérdida de trayecto | 28 |
| 2.4.2 Tipos de desvanecimientos | 29 |
| 2.4.3 Propagación multipaso..... | 32 |
| 2.4.4 Mecanismos de propagación | 32 |
| CAPÍTULO 3..... | 34 |
| 3. INTERPRETACIÓN DE DATOS ADQUIRIDOS, ESTIMACIÓN DE GRADIENTE E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED SENSORES INALÁMBRICOS | 34 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 44 |
| BIBLIOGRAFÍA | 46 |
| ANEXOS..... | 49 |

ABREVIATURAS

| | |
|---------------|--|
| BCE | Banco Central del Ecuador |
| PIB | Producto Interno Bruto |
| SRI | Servicio de Rentas Internas |
| INEC | Instituto Nacional de Estadísticas y Censos |
| IoT | Internet of Things |
| RF | Radio Frecuencia |
| CANMET | Canadian Center for Minerals and Energy Technology |
| WSN | Wireless Sensor Networks |
| MSNM | Metros Sobre el Nivel del Mar |
| ISM | Industrial, Scientific and Medical |
| PL | Path Loss |
| RSSI | Received Signal Strength Indicator |
| LQI | Link Quality Indicator |
| WPAN | Wireless Personal Area Network |
| DSSS | Direct Sequence Spread Spectrum |
| Wi-Fi | Wireless Fidelity |
| SNR | Signal to Noise Ratio |
| FDD | Full Function Device |
| RFD | Reduced Function Devised |
| ZC | ZigBee Coordinator |
| ZR | ZigBee Router |
| ZED | ZigBee End Device |
| PAN | Personal Area Network |
| GTS | Guaranteed Time Slots |
| OSI | Open System Interconnection |
| PHY | Physical |
| MAC | Media Access Control |
| NTW | Network |
| APL | Application Layer |
| APO | Application Objects |
| APS | Application Support |

| | |
|-------------|-----------------------------------|
| LOS | Line of Sight |
| NLOS | Non Line of Sight |
| API | Application Programming Interface |
| ZDO | ZigBee Objects Device |
| PLdB | Path Loss (decibels) |
| BW | Bandwidth |
| RMS | Root Mean Square |
| ISI | Intersymbol Interference |

SIMBOLOGÍA

| | |
|--|---|
| <i>ha</i> | Hectáreas |
| <i>km</i> | Kilómetros |
| <i>m</i> | Metros |
| <i>GHz</i> | Gigahercios |
| α | Exponente de pérdida de trayecto o gradiente de propagación |
| σ_x | Desviación estándar |
| <i>mW</i> | Mili vatio |
| <i>dBm</i> | Decibelios-mili vatios |
| <i>MHz</i> | Megahercios |
| <i>Kbps</i> | Kilobit por segundo |
| P_t | Potencia de transmisión |
| P_r | Potencia de recepción |
| <i>d</i> | Distancia |
| G_t | Ganancia de la antena de transmisión |
| G_r | Ganancia de la antena de recepción |
| <i>L</i> | Factor de pérdida del sistema |
| λ | Longitud de onda |
| d_o | Distancia de referencia |
| <i>X</i> | Variable Gaussiana aleatoria de desvanecimiento |
| $h(t)$ | Respuesta impulso del canal |
| <i>N</i> | Impulsos de retraso de tiempo |
| A_n | Atenuación del camino |
| τ_n | Retraso en tiempo de arribo |
| φ_n | Fase |
| <i>n</i> | Número de trayectos |
| \overline{PL}_{dB} | Pérdida promedio de trayecto |
| P_{Tx} | Potencia de transmisión |
| P_{Rx} | Potencia de recepción |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Imagen Satelital: Trayecto Zaruma - Sociedad Minera Reina del Cisne III | 6 |
| Figura 1.2 Mapa: Trayecto Guayaquil – Zaruma | 6 |
| Figura 1.3 Mapa: Trayecto Machala – Zaruma..... | 7 |
| Figura 1.4 Imagen Satelital: Mina Reina del Cisne III | 8 |
| Figura 1.5 Aspecto interior de la galería Reina del Cisne III | 8 |
| Figura 1.6 Entrada de la mina Reina del Cisne III | 9 |
| Figura 2.1 Logotipo ZigBee | 14 |
| Figura 2.2 Topología tipo malla de dispositivos FFD y RFD | 16 |
| Figura 2.3 Elementos de una red ZigBee | 17 |
| Figura 2.4 Pila de protocolo ZigBee | 19 |
| Figura 2.5 Topología tipo Estrella..... | 21 |
| Figura 2.6 Topología tipo Árbol | 22 |
| Figura 2.7 Topología tipo Malla | 22 |
| Figura 2.8 Módulo XBee S2 | 23 |
| Figura 2.9 Módulos XBee Serie 2..... | 24 |
| Figura 2.10 Interfaz de la multiplataforma XCTU..... | 25 |
| Figura 2.11 Range Test XCTU..... | 26 |
| Figura 2.12 Tipos de desvanecimientos | 31 |
| Figura 3.1 Ubicación del ZC en el interior de la mina Reina del Cisne III | 34 |
| Figura 3.2 Ubicación del ZC y ZR dentro de la mina | 35 |
| Figura 3.3 Plano de la mina Reina del Cisne III: Escenarios LOS y NLOS..... | 36 |
| Figura 3.4 RSSI vs DISTANCIA | 37 |
| Figura 3.5 PATH LOSS vs DISTANCIA..... | 38 |
| Figura 3.7 PATH LOSS vs DISTANCIA NLOS | 39 |
| Figura 3.6 PATH LOSS vs DISTANCIA LOS | 39 |
| Figura 3.8 Test LQI de la red WSN | 42 |
| Figura 3.9 Diseño de red ZigBee..... | 43 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1 Bandas de frecuencia ZigBee..... | 20 |
| Tabla 3.1 Tabla de resultados Modelo de Propagación..... | 40 |
| Tabla 3.2 Tabla de resultados enlaces entre módulos | 42 |

CAPÍTULO 1

1. RECONOCIMIENTO DEL OBJETO DE ESTUDIO DEL PROYECTO

1.1 Introducción

En los últimos 10 años la actividad minera en el Ecuador se ha posicionado como una fuente de recursos económicos para el erario nacional, con la finalidad de establecer un sector atractivo y competitivo para lograr mayores beneficios para el estado ecuatoriano; según el Reporte de Minería del Banco Central del Ecuador (BCE), se indica que el Producto Interno Bruto (PIB) del año 2016 el aporte minero alcanzó el 1.61% [1], y para el año 2017 se indica un aporte de USD 717 millones por el pago de impuestos, según el informe de gestión del Servicio de Rentas Internas (SRI), ratificando las proyecciones del BCE [2].

De acuerdo con el censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el 2010, la minería artesanal se desarrolla principalmente en tres provincias: Azuay, Pichincha y El Oro, siendo esta última la de mayor actividad minera con 6,745 personas que laboraron en la actividad de explotación de minas y canteras [1].

En el año 2015 el gobierno, mediante acuerdos con empresas transnacionales conforme a los Proyectos Mineros Estratégicos, da privilegio a dos tipos de explotación: Cielo Abierto y Subterránea de régimen a gran escala, sin embargo, esta actividad se ha realizado durante más de un siglo bajo el régimen de pequeña minería y artesanal, que están sometidas a un marco legal establecido en la Ley de Minería y sus leyes conexas [3].

En segunda instancia, en Ecuador existe alrededor de 40,000 mineros informales, de los cuales solo 6,000 han sido regularizados, debido a que el proceso de formalización y legalización es extenso, según expresa el Diario la Hora (2017), [4]. Se estima que esta regularización genere 9,000 fuentes de empleo directa e indirectamente en el país [5]. Esta actividad se realiza en muchos casos sin controles legales, ambientales y de seguridad laboral, lo que expone a los operarios a accidentes como los ocurridos en

minas ubicadas en la provincia de El Oro, sucesos reportados por los diarios nacionales como El Universo, La Hora [6]-[7]-[8]-[9], entre los inconvenientes más relevantes se identifica la falta de comunicación fluida, ya que las minas subterráneas artesanales no cuentan con la tecnología que posibilite un contacto continuo con el exterior, lo cual pone en riesgo la integridad de los mineros.

Una de las grandes ambiciones del ser humano ha sido permanecer comunicado con el medio que lo rodea, priorizando reducir el tiempo de las comunicaciones sin importar las distancias intermediarias, como resultado de este afán se han implementado sistemas de comunicación de acceso inalámbrico, los mismos que tienden a ser evolutivos con respecto al transcurso del tiempo, que logran enlazar exitosamente diferentes tipos de dispositivos, dando paso al avance tecnológico de la nueva era conocido como Internet de las Cosas (en inglés; Internet of Things, IoT). Cabe destacar que parte de este avance tecnológico de características inalámbricas no pudo ser concretado sin los numerosos estudios de propagación de las ondas de Radio Frecuencia (RF).

Dicho lo anterior, las telecomunicaciones se aplican para los diferentes ambientes siendo estos de preferencia para los entornos interiores de casas y edificios, y entornos exteriores para las áreas urbanas y suburbanas, sin embargo en las últimas 3 décadas se han efectuado estudios situados en ambientes subterráneos, como túneles de automóviles y vías de trenes [10]-[11], obteniendo como resultado un exitoso servicio de comunicación permanente en estos ambientes; en contraste con el sector minero que alrededor del mundo ha sido desatendido.

Con la ambición de incorporar y posteriormente optimizar vías de comunicación permanentes con el exterior de las mismas, ejemplo de estos estudios tenemos el realizado en Montreal–Canadá operado por el Centro Canadiense para Minerales y Tecnología Energética (en inglés; Canadian Center for Minerals and Energy Technology, CANMET) [12]-[13], en los cuales se analiza y propone un modelo de propagación adecuándose a las condiciones y características del entorno.

En nuestro país la minería artesanal ha sido el sustento económico de muchas familias a través del tiempo y se ha desarrollado de manera empírica sin el aprovechamiento de los avances tecnológicos, lo cual ha tenido incidencia en la productividad y la seguridad de los ciudadanos dedicados a esta actividad. Por esta razón el proyecto integrador propone impulsar la utilización de los recursos tecnológicos que existen actualmente con miras a una alternativa tecnológica fundamentada en teorías de la comunicación de RF, que permitan diseñar una Red de Sensores Inalámbricos (en inglés; Wireless Sensor Networks, WSN) con el fin de posibilitar la comunicación desde el interior de la mina subterránea con el exterior, ya que es de vital importancia la introducción de tecnología que establezca comunicación que coadyuve a reducir riesgos laborales tales como prevenir la exposición de gases nocivos, agilizar la localización del personal, y/u optimizar el tiempo de detección de minerales, por mencionar alguna de las aplicaciones posibles.

1.2 Descripción del problema

La minería artesanal es una actividad cultural y ancestral la cual se manifiesta de manera directa en el movimiento económico y el crecimiento del índice monetario del Ecuador, sin dejar de mencionar que esta ardua labor representa el sustento principal para las familias que optaron por continuar con esta tradición minera, por esta razón, con el fin de mejorar las condiciones de trabajo para que el ambiente laboral sea más seguro, minimizando los riesgos perennes a los que se exponen los mineros mientras cumplen con su jornada diaria, e incluso para que la salud de cada hombre que ingresa a una mina también sea favorecida, previniéndolos de los niveles de toxicidad presentes en el ambiente salvaguardándolos a una exposición innecesaria de gases nocivos dañinos para el ser humano, y como mayor ambición, lograr disminuir los repetitivos incidentes y a la vez evitando que estos alcancen un carácter de fatalidad o infortunio para el minero artesano y su familia, se plantea la implementación de tecnología basada en principios de telecomunicaciones enfocada al desempeño y desarrollo de la actividad minera.

Este tipo de dispositivos ya han sido aplicados en ámbitos industriales y también domésticos, por su fácil adquisición, instalación, uso y mantenimiento, cumpliendo funciones de control y alertas en el área que monitorean aumentando el desempeño, la producción y principalmente la seguridad tanto para el inmueble como para el personal dentro del mismo. Haciendo referencia al marco legal, el Reglamento de Seguridad Minera garantiza el bienestar de los trabajadores y enfatiza siempre una comunicación continua dentro y fuera de la mina, más no especifica el tipo de tecnología que debe de ser usada para que dichas normativas sean aplicadas.

Se citan los capítulos de mayor relevancia del Reglamento de Seguridad Minera (2004), con sus correspondientes artículos sobre esta problemática: **(ANEXO 1)** [14].

En consecuente, el problema observado al que se enfrenta la minería en Ecuador y que no ha sido atendido a pesar de existir estudios en galerías externas al país, donde se demuestra que tan posible y benefactor sería para las personas que se desenvuelven en el arte de la extracción de minerales, implementar dispositivos que permitan elevar la seguridad del trabajador, por lo cual, por medio de este proyecto se presenta una solución tentativa para erradicar la falta de tecnología en las minas artesanales, que permita optimizar el ambiente de trabajo, y como principal objetivo emprender una metodología avante que reduzca la brecha existente entre la tecnología y el clásico desempeño minero vigente durante décadas en las minas ecuatorianas [1].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una red de sensores inalámbricos para minas subterráneas, utilizando tecnología ZigBee.

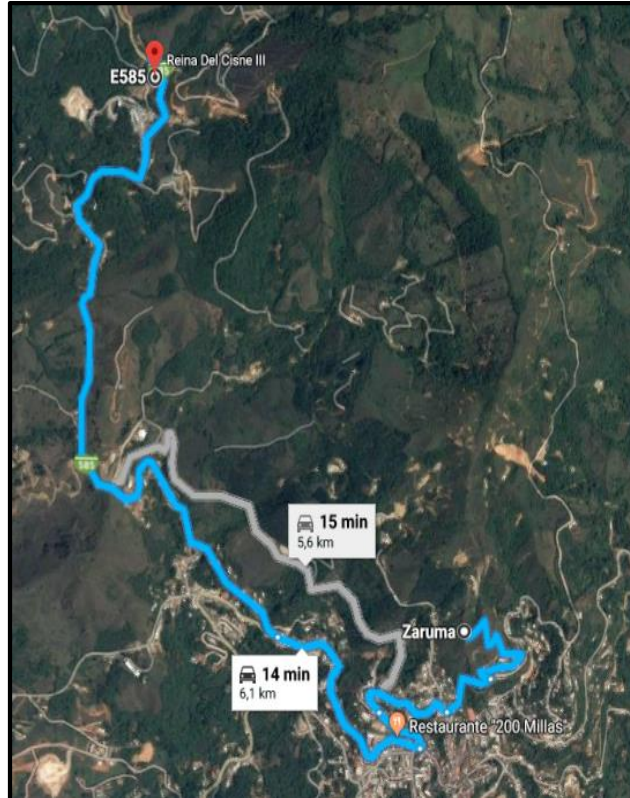
1.3.2 Objetivos Específicos

- Establecer e identificar el área en la cual se desarrollará el proyecto integrador, definiendo dos escenarios: Línea de Vista y No Línea de Vista.
- Determinar el alcance máximo del enlace entre transmisor y receptor dentro de la mina, mediante el software XCTU, para los escenarios considerados entre un transmisor de posición fija y el receptor de posición variable.
- Diseñar una red de topología tipo malla de acuerdo a los resultados obtenidos de la adquisición de datos, de acuerdo al valor del gradiente característico para cada escenario establecido, con el fin de obtener una eficaz calidad de enlace, mayor cobertura y optimización de recursos dentro de la mina subterránea.

1.4 Contexto Ambiental

1.4.1 Coordenadas del lugar

VÍA MALVAS



Sociedad Minera Reina del Cisne III cuenta con 323.46 hectáreas (*ha*), se encuentra ubicada en vía Malvas a una latitud de $3^{\circ} 40' 06.1''S$ y longitud de $79^{\circ} 37' 23.6''W$ en la provincia de El Oro.

Figura 1.1 Imagen Satelital: Trayecto Zaruma - Sociedad Minera Reina del Cisne III
Fuente: Google Maps, 2018.



Zaruma, provincia de El Oro. A 5.7 kilómetros (*km*) de Vía Malvas. 15 minutos desde Vía Malvas a Zaruma.

Figura 1.2 Mapa: Trayecto Guayaquil – Zaruma
Fuente: Google Maps, 2018.

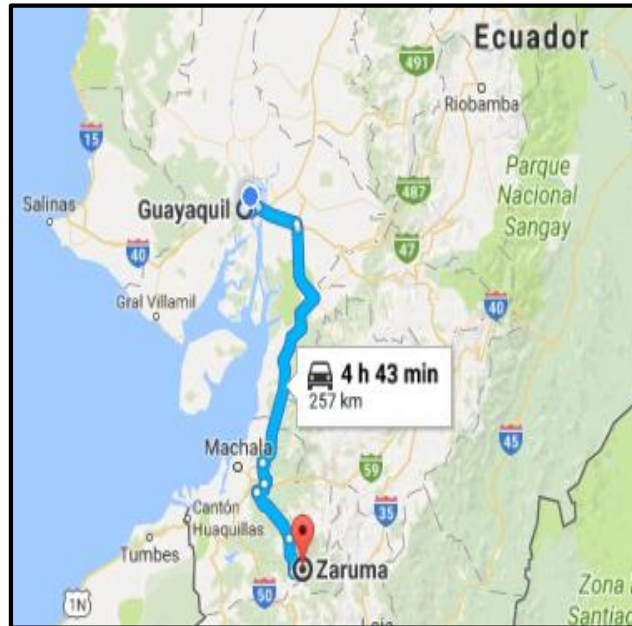


Figura 1.3 Mapa: Trayecto Machala – Zaruma
Fuente: Google Maps, 2018.

Zaruma, provincia de El Oro. A 257 *km* de Guayaquil. 4h43 minutos viajando desde Guayaquil a Zaruma.

ZARUMA

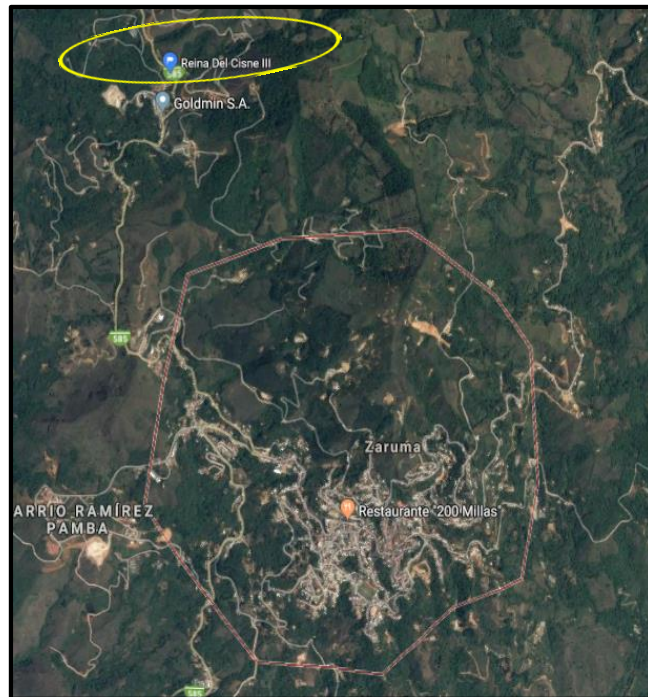
En 1595 fue fundada por españoles, cobrando importancia por ser un yacimiento aurífero.

En 1990, Zaruma fue declarada Patrimonio Cultural del Estado Ecuatoriano.

Zaruma es reconocida por su gente amable, su arquitectura colonial y su actividad minera. Tiene un clima sub-tropical y su temperatura fluctúa entre 10°C a 24°C.

Zaruma, provincia de El Oro, Ecuador. 1,200 Metros Sobre el Nivel del Mar (MSNM) en el Callejón Interandino. A 92.2 *km* de Machala. 1h57minutos viajando desde Machala a Zaruma.

1.4.2 Mapa geográfico



La mina Reina del Cisne III no es considerada como atentado al ecosistema de Zaruma, ya que se encuentra alejada de la zona de exclusión como se observa en la Figura 1.4.

Figura 1.4 Imagen Satelital: Mina Reina del Cisne III

Fuente: Google Maps, 2018.

1.4.3 Descripción del ambiente



Reina del Cisne III, es la mina en donde se lleva a cabo la instalación de los módulos inalámbricos XBee, con la finalidad de obtener una base de datos con las potencias de transmisión y recepción que el software XCTU evalúa.

Figura 1.5 Aspecto interior de la galería Reina del Cisne III

Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2017.

El tipo de minería que se realiza en este lugar es subterránea y el área seleccionada para este proyecto tiene 1 *ha* de explotación aproximadamente.

Esta mina tiene una vía principal de alrededor de 1 *km* y ramales que varían entre los 70, 100, y 300 metros (*m*) de longitud.



Figura 1.6 Entrada de la mina Reina del Cisne III
Fuente: J. Pablo, X, Merino, 2017.

Dentro de la mina existe un ambiente de alta humedad, su altura varía de 2 a 3 *m* a lo largo de la mina, cuenta con ductos de ventilación y tuberías de agua.

En la galería Reina del Cisne III operan 15 mineros que durante la jornada de trabajo se dividen en grupos de 3 para acceder a los diferentes ramales.

La mina no posee un registro donde se evidencie el ingreso o salida del personal, este control lo realiza el minero que se encuentre al cuidado y vigilancia de la galería.

En caso de presentarse algún inconveniente o sea necesario reunir al personal, el medio de alerta es el sonido que emite el compresor de aire que se propaga por la tubería de ventilación.

De manera que la instalación de una WSN en el interior de la mina permitirá resolver estos y otros inconvenientes posibles en este ambiente laboral.

1.5 Fundamentación Teórica

La propagación de ondas electromagnéticas a diferentes frecuencias en minas subterráneas, ha sido objeto de estudio los últimos años con mayor periodicidad. La primera investigación relacionada al ambiente minero fue realizada en 1975 [15], este estudio propuso implementar la tecnología de la época la cual permitiría establecer comunicación en el interior de estos yacimientos; los resultados obtenidos fueron precursores para expandir la ciencia de la comunicación a un nuevo ambiente, hasta llegar a las conexiones inalámbricas en la actualidad.

La instalación de una red inalámbrica en minas subterráneas puede estar enfocada a diferentes aspectos, siendo las aplicaciones de mayor relevancia y prioridad la prevención de incidentes laborales disminuyendo el riesgo para el personal mediante prontas señales de alerta e influyendo de manera directa a la reducción de las afecciones típicas consecuentes de la actividad minera.

La industria tecnológica orientada a las telecomunicaciones ha desarrollado diferentes tipos de dispositivos que en conjunto forman una WSN cuyo protocolo de operación característico para ambientes industriales es ZigBee basado en el estándar IEEE 802.15.4, este tipo de red desempeña múltiples aplicaciones en la automatización y control de establecimientos industriales. Considerando que estos dispositivos inalámbricos son ideales por su pequeño tamaño, gran cantidad de nodos y rápido tiempo de transmisión, además que operan en la banda no licenciada Industrial, Científica y Médica (en inglés; Industrial, Scientific and Medical, ISM) en la frecuencia de 2.4 gigahercios (*GHz*), los dispositivos ZigBee califican como idóneos para el montaje de una red de control y prevención en minas subterráneas [16].

No obstante, previo a cualquier enlace inalámbrico debe existir un estudio de reconocimiento que defina las características del entorno de propagación por el cual las señales de radio serán transferidas, este análisis es necesario para prevenir altos niveles de atenuación en la potencia transmitida original, evitando así pérdida de información en el receptor destino. Para cuantificar los valores de pérdida de intensidad de

potencia a causa del ruido multiplicativo en el trayecto y a su vez estimar la cantidad y la localidad de los terminales receptores o nodos que conforman una red optimizando los recursos en función al área de interés sin dejarla desprovista de cobertura, es posible formular una ecuación cuyo resultado asemeje las pérdidas reales en la potencia y determine una ubicación fija para cada elemento según la topología de la red estructurada, a esta ecuación se la denomina modelo de propagación.

En la galería experimental canadiense CANMET, tomada como mención para este proyecto, se han realizado numerosos estudios de propagación de enlaces inalámbricos definiendo secciones en el interior de la mina acorde a la finalidad u orientación de la investigación propuesta. Es preciso destacar que el factor de interés para la elaboración de este proyecto de entorno subterráneo es la ecuación matemática con la cual se estima el debilitamiento de la potencia transmitida.

En los informes escogidos como referencias y antecedentes investigativos, el común denominador con el cual se determina la pérdida de potencia en el medio propagado corresponde al modelo de desvanecimiento utilizado en ambientes interiores, el cual determina que la Pérdida de Trayecto (en inglés; PATH LOSS, PL_{dB}) en el canal está distribuida normalmente en decibelios (dB) con media que cambia linealmente con respecto a la distancia [17].

Este modelo de desvanecimiento posee dos constantes características correspondientes al exponente de pérdida de trayecto o gradiente (α) y la desviación estándar (σ_x) relacionada al efecto del Desvanecimiento de Sombra (en inglés; Shadow-Fading) en el medio de propagación. Estos valores se muestran variantes principalmente por la distancia existente entre transmisor y receptor, la frecuencia de operación y las condiciones del ambiente del enlace, los cuales influyen debido a que durante el trayecto la señal se ve expuesta a los fenómenos característicos de la propagación de onda como son la difracción, reflexión y dispersión [17].

Existen diversos modelos establecidos utilizados para el despliegue de enlaces de radio frecuencia ya sean estos en ambientes exteriores, así como en ambientes interiores. Sin embargo, no siempre es posible aplicar

estos modelos teóricos en todos los entornos donde se desea establecer un enlace inalámbrico, ya que sus características físicas difieren a los establecidos como parámetros al definir la ecuación. Dado este caso, es posible reformular un modelo existente, para lo cual, como primer paso es necesario obtener mediciones de potencia en el área de interés que son utilizadas como guía para las alteraciones del modelo con la finalidad de que los resultados del modelo modificado se aproximen a las pérdidas en el trayecto medidas en el nuevo entorno.

Dicho lo anterior el modelo de propagación estima las pérdidas de la potencia inicial durante el trayecto que recorre la señal hasta que esta es receptada, y se menciona que en el caso de reformular un modelo existente se deben hacer en base a mediciones de potencia, pero cómo saber hasta cuándo es conveniente adquirir datos de potencia cuando la distancia aumenta referente al transmisor; para aquello es posible recurrir al Indicador de Potencia de la Señal Recibida (en inglés; Received Signal Strength Indicator, RSSI), el cual es una escala de referencia en relación 1 mili vatio (mW) a menudo en unidades de decibelios-mili vatios (dBm) que describe si la señal recibida es excelente, buena, mala o pobre.

Por otro lado, existe el Indicador de Calidad del Enlace (en inglés; Link Quality Indicator, LQI) que es la medida de corriente en la calidad de la señal recibida RSSI. Este indicador no se enfoca en la fuerza de la señal recibida, pero si está ligado ya que una señal fuerte es menos probable a ser afectada por el ruido haciendo que esta sea mejor vista por el receptor. El LQI proporciona un estimado de cuán fácil puede ser demodulada la información en señal acumulando la magnitud de los errores entre la constelación ideal y la señal recibida. Un alto valor de LQI indica un enlace débil, por el contrario, para un enlace fuerte el valor de LQI será mucho menor [18].

El hardware utilizado para el desarrollo del proyecto corresponde a los módulos XBee de segunda generación o serie 2 (XBee S2); estos dispositivos trabajan con el protocolo ZigBee característico de las WSN. El minúsculo tamaño de estos dispositivos los convierten en equipos cómodos al momento de su manipulación y colocación en el interior de la mina,

además que el costo de adquisición en el mercado es de alrededor de los USD 25,00; XCTU es el software con el cual es posible programar los módulos XBee ya que la red necesita de un coordinador que administre los demás dispositivos sean estos definidos como enrutadores o terminales, XCTU también tiene la opción de realizar simulaciones de envío de paquetes de información entre un par de dispositivos, los cuales son medidos en la escala del RSSI, así como la efectividad de la recepción de estos paquetes transmitidos. Los resultados mostrados por el RSSI son los datos de interés que en consecuencia serán tabulados y posteriormente formulados en un modelo de propagación característico para este ambiente minero subterráneo; en cuanto al diseño de la red, el software evalúa todos los enlaces posibles entre los equipos presentes en el área en disposición, para establecer la conexión más óptima entre nodos que constituyen la red, el software se vale de la medición definida por las condiciones del LQI, con este resultado se garantiza la menor pérdida de información dentro de la red construida [19].

El valor de LQI es el resultado de la evaluación del Indicador de Calidad del Enlace de Subida (en inglés; Uplink Quality Index), Indicador de Calidad del Enlace de Bajada (en inglés; Downlink Quality Index). Este Indicador es provisto por el software y permitirá evaluar la calidad y efectividad del enlace para los procesos de transmisión y recepción entre los equipos que formarán la red en el interior de la mina, corroborando la localización para cada módulo o a su vez aportando con ajustes en la colocación de estos los cuales fueron ubicados en los puntos determinados por el modelo de propagación resultante previo de acuerdo al procedimiento definido en este proyecto.

CAPÍTULO 2

2. DETALLES DE LAS HERRAMIENTAS A UTILIZAR PARA EL DISEÑO DE LA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS A IMPLEMENTAR EN LA MINA SUBTERRÁNEA

Zaruma es un cantón icónico en Ecuador debido a su alta productividad minera, las condiciones de trabajo se han mantenido de manera tradicional en la extracción de los minerales.

En el desarrollo de proyectos en el área de telecomunicaciones, es imprescindible identificar las necesidades del usuario final, facilitando diferentes alternativas al momento de presentar la idea, como ejemplo; escoger una frecuencia de operación que maneje tasa de datos que satisfagan los requerimientos del tipo de información a transmitir.

En este caso en particular, las minas artesanales en Ecuador son el usuario final idóneo para poner en práctica la investigación realizada sobre las WSN, ya que con la implementación de estas redes se puede mejorar el entorno de trabajo o turístico.

Para este proyecto se propuso utilizar módulos XBee los mismos que operan bajo el protocolo ZigBee, dicho protocolo está basado en el estándar IEEE 802.15.4, idóneo para este proyecto ya que se ajusta a las necesidades planteadas con el fin de impulsar la comunicación en el ambiente minero subterráneo.

2.1 ZigBee IEEE 802.15.4



Figura 2.1 Logotipo ZigBee
Fuente: ZigBee Alliance, 2018.

ZigBee es una tecnología basada en las especificaciones de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica, basados en el estándar IEEE 802.15.4. Esta tecnología es soportada y desarrollada por

Alianza ZigBee (en inglés; ZigBee Alliance); organización sin fines de lucro formada por más de 180 empresas. ZigBee Alliance es el software que define la red, seguridad y aplicaciones de capa, e IEE 802.15.4 es el hardware que define el acceso físico y el control de acceso al medio de una Red de Área Personal Inalámbrica (en inglés; Wireless Personal Area Network, WPAN), en donde el alcance del enlace estará en función de la potencia de transmisión y velocidad de transmisión [20]. El principal motivo de que esta tecnología maneje velocidades bajas de transmisión es porque necesita de sensores con transceptores de bajo consumo energético que ayuden a mantener estable y segura la red inalámbrica que se desea crear. La potencia requerida por ZigBee es muy pequeña y en la mayoría de los casos es de hasta 1 *mW*, opera en tres frecuencias; 868 megahercios *MHz* (Europa), 915 *MHz* (América del Norte y Australia) y 2.4 *GHz* (válido alrededor del mundo), utiliza Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (en inglés; Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) como método de codificación de canal, con tasa de subida de 20, 40 y 250 kilobits por segundo (*Kbps*) para cada frecuencia respectivamente [21].

Debido a este método de codificación, las señales emitidas por los equipos que funcionan bajo el protocolo ZigBee son poco propensas a presentar interferencia a causa de otras tecnologías inalámbricas como Wireless USB, Bluetooth, Wireless Fidelity (Wi-Fi), ya que estas tecnologías trabajan en un entorno con baja Relación Señal Ruido (en inglés; Signal to Noise Ratio, SNR).

La red ZigBee soporta una cantidad de 255 nodos, sin embargo, cada nodo puede ser un conjunto/cluster de 255 nodos conectados entre sí, dando un total de 65,536 dispositivos que han sido asignados aleatoriamente utilizando un PAN ID de 16 bits, sincronizados por un solo Coordinador [22]. La creación de una nueva red solo puede ser iniciada por dispositivos Coordinadores que no pertenezcan a redes ZigBee existentes, ya que si un dispositivo Coordinador externo intenta enlazarse a la red establecida, este proceso sería denegado por la capa de Red específicamente en la subcapa MAC evitando interferencias [21].

2.1.1 Protocolo ZigBee

Una red ZigBee no cuenta con infraestructura, por lo tanto, las tareas como mantenimiento y gestión de la red global o dispositivos de configuración lo asumen sus propios equipos. Los dispositivos de ZigBee se dividen en tres tipos de protocolos:

1. **Dispositivos ZigBee de tipo físico.-** IEEE 802.15.4 provee dos tipos de funcionalidades basado en la capacidad de procesamiento de datos:

a) **Dispositivo de Funcionalidad Completa (en inglés; Full Function Device, FFD):** Un dispositivo configurado como FFD es capaz asociarse con cualquier topología, esto quiere decir que los dispositivos pueden actuar como Coordinador de red o Enrutador y comunicarse con cualquier tipo de terminal entre lo que se puede destacar de esta funcionalidad [20].

b) **Dispositivo de Funcionalidad Reducida (en inglés; Reduced Function Device, RFD):** Los Dispositivos finales están configurados como RFD ya que no pueden encaminar paquetes de datos, por lo tanto, debe de estar asociado a un dispositivo FFD. Se caracteriza por su bajo consumo de potencia y memoria debido a que solo tienen tareas como monitorear, controlar y adquirir datos [20].

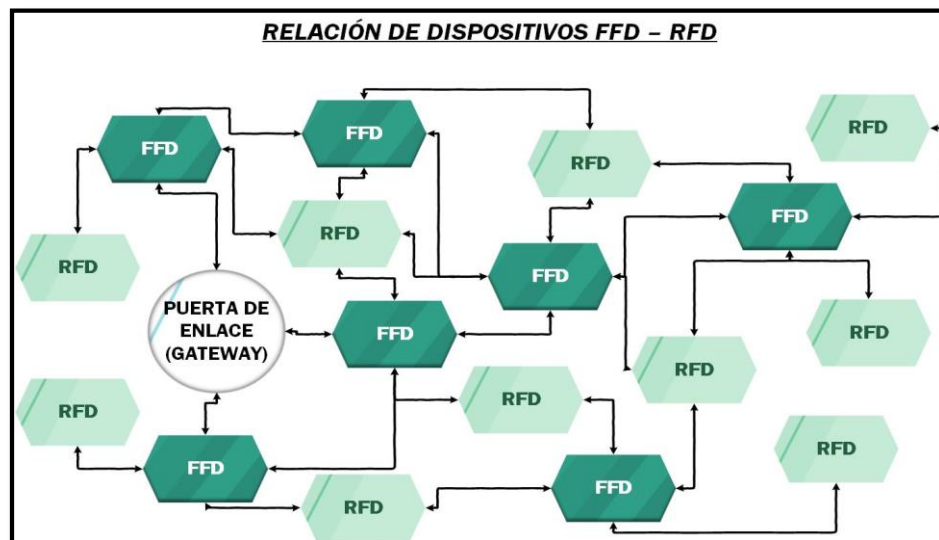


Figura 2.2 Topología tipo malla de dispositivos FFD y RFD
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

Cabe destacar que los dispositivos FFD pueden comunicarse con dispositivos RFD o entre sí. Por el contrario, los dispositivos RFD sólo pueden comunicarse con dispositivos FFD.

2. **Dispositivos ZigBee de tipo lógico.-** Según la función del dispositivo, existe tres categorías de nodos en un sistema ZigBee:

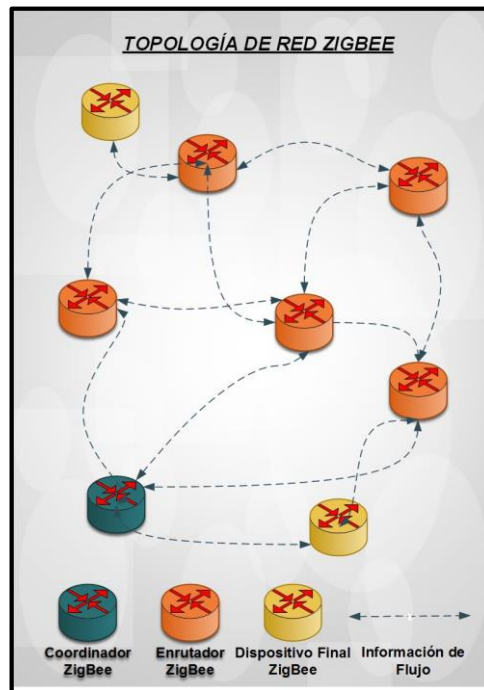


Figura 2.3 Elementos de una red ZigBee

Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

- a) **Coordinador ZigBee (en inglés; ZigBee Coordinator, ZC):** ZC se encarga de controlar la formación y seguridad de la red. Cabe destacar que solo puede existir uno por red. Es el dispositivo responsable de inicializar la red y seleccionar los parámetros de RF del canal o los caminos a seguir por otros dispositivos para conectarse entre ellos [20].
- b) **Enrutador ZigBee (en inglés; ZigBee Router, ZR):** ZR se encarga del enrutamiento de saltos múltiples de los mensajes, extiende el rango de la red interconectándose con dispositivos separados en la topología de red [20].

c) **Dispositivo Final ZigBee (en inglés; ZigBee End Device, ZED):** Este elemento es aquel que se instala junto a los diferentes sensores que constantemente evalúan el estado de los parámetros de interés dentro de la mina subterránea como temperatura, humedad, presión, etc. ZED es el elemento básico de la red, actúa específicamente censando o controlando funciones. Estos dispositivos son de bajo consumo de energía a tal punto que puede permanecer en modo de hibernación hasta que sea requerido su participación. No puede establecer conexión con otro dispositivo final, pero puede comunicarse con el nodo padre (Coordinador o Enrutador) para transmitir la información recompilada [20].

3. **Modos de Acceso.-** Existen dos vías de acceso múltiple en la tecnología ZigBee que son:

a) **Redes habilitadas Beacon:** Los nodos solo pueden transmitir datos en predeterminados intervalos de tiempo.

b) **Redes habilitadas Non-Beacon:** Cada nodo en la red puede transmitir datos cuando el canal está libre.

El ZC en una Red de Área Personal (en inglés; Personal Area Network, PAN), es el responsable de transmitir las señales Beacon con el fin de sincronizar todos los dispositivos enlazados a este, asignando Intervalos de Tiempo Garantizados (en inglés; Guaranteed Time Slots, GTS), para cada dispositivo; sin embargo, cada dispositivo transmitirá sus propios datos durante sus propios intervalos tiempo. Si en una red el ZC no transmite señales Beacon, es conocida como una red Non-Beacon, por lo tanto, no tendrá GTS ni conexión de periodos libres ya que sus dispositivos no estarán sincronizados [20].

2.1.2 Pila de protocolo ZigBee

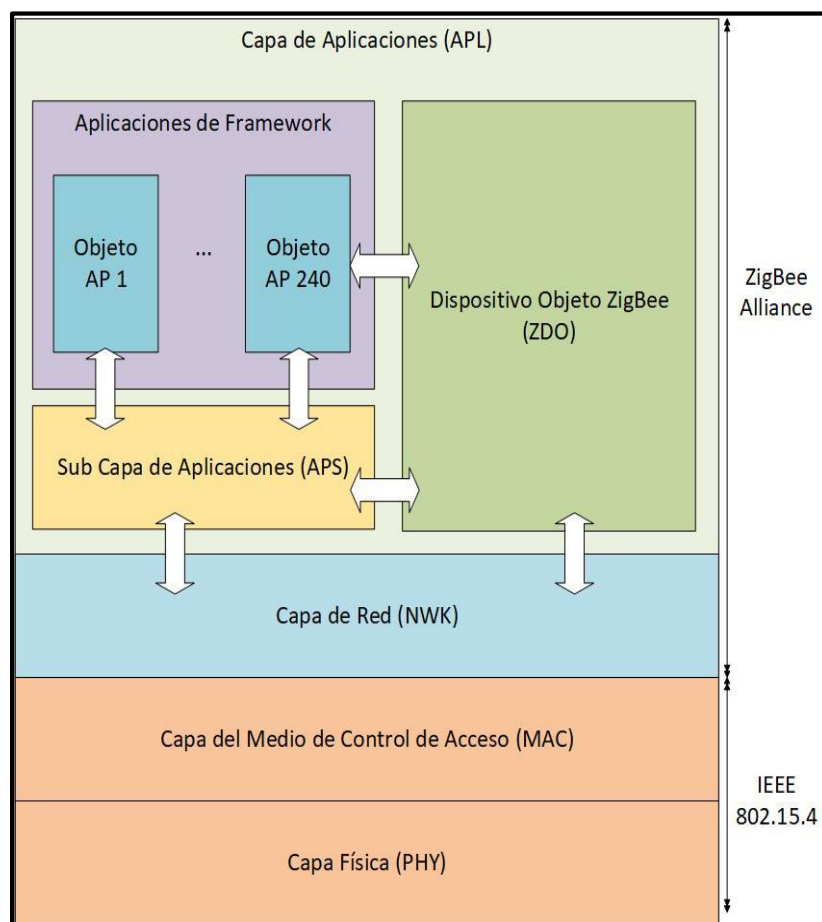


Figura 2.4 Pila de protocolo ZigBee
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

La arquitectura del protocolo está basada en el modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (en inglés; Open System Interconnection, OSI). ZigBee trabaja sobre el estándar IEEE 802.15.4 que define la capas; Física (en inglés; Physical, PHY) y Control de Acceso al Medio (en inglés; Media Access Control, MAC).

- a) **Capa Física.-** PHY en el estándar IEEE 802.15.4 es la más cercana al hardware, que controla y comunica directamente con el radio transceptor. Este maneja todas las tareas incluyendo el acceso al hardware del ZigBee [21].

Soporta tres bandas de frecuencia:

| FRECUENCIA | CANALES | TASA DE DATOS | HABILITADO |
|-----------------|---------|---------------|-----------------|
| 868.3 MHz | 0 | 20 Kbps | Europa |
| 902 - 928 MHz | 1 - 10 | 40 Kbps | USA |
| 2450 - 2448 MHz | 11 - 26 | 250 Kbps | Resto del Mundo |

Tabla 2.1 Bandas de frecuencia ZigBee
Fuente: IJEST, 2018.

- b) **Capa MAC.-** Esta capa provee una interfaz entre la capa PHY y la capa de Red (en inglés; Network, NTW), además provee servicios de datos MAC y administrador de la interfaz de MAC. Es responsable por generar Beacons y sincronización de dispositivos a través de la señal Beacon habilitada. Define cuatro tipos de estructura que son; Trama Beacon, Trama de Datos, Trama de Confirmación y Trama de Comando MAC [20].
- c) **Capa de Red.-** Esta capa provee una interfaz entre la capa de Aplicación (en inglés; Application Layer, APL) y la capa MAC. Es responsable por la formación y enrutamiento de la red, el cual es el proceso de selección de ruta para retransmitir los mensajes al nodo de destino. Además, proporciona una amplia seguridad de red y permite maximizar el tiempo de vida útil de las baterías de los dispositivos de baja potencia [20].
- d) **Capa de Aplicación.-** Es la capa de protocolo más alta y contiene los objetos de aplicación. Las especificaciones de ZigBee separa las APL en tres diferentes sub-capas:
- 1) **Objetos de Aplicación (en inglés; Application Objects, APO):** Controla y administra las capas de protocolo en los dispositivos ZigBee. Es una parte del software que controla el hardware [20].
 - 2) **Objetos de Dispositivos ZigBee:** Asigna tres operaciones principales; descubrimiento de servicios, seguridad y enlace. El rol de descubrimiento es encontrar nodos y preguntar las direcciones MAC del ZC o ZR usando mensajes unicast. El servicio de seguridad tiene

el rol de autenticar y dirigir las claves necesarias para encriptar los datos. El administrador de enlace cumple el rol de enlazar los nodos a los recursos y aplicaciones, además de enlazar los dispositivos a los canales de la red [20].

3) Subcapa de Soporte de Aplicaciones: La subcapa de Soporte de Aplicación (en inglés; Application Support, APS) provee una interfaz entre la capa NTW y las capas de APL a través de una configuración general de los servicios dados por los datos de la subcapa APS y entidades de gestión. La subcapa APS procesa tramas entrantes y salientes de modo que las tramas transmitidas y recibidas de manera segura, sean establecidas y administradas por claves criptográficas [20].

4) Proveedor de Servicios de Seguridad: ZigBee provee un mecanismo de seguridad para la capa NTW y subcapa APS, en donde cada una es responsable de la seguridad de sus tramas [20].

2.1.3 Topologías

IEEE 802.15.4 considera tres tipos de topologías de red:

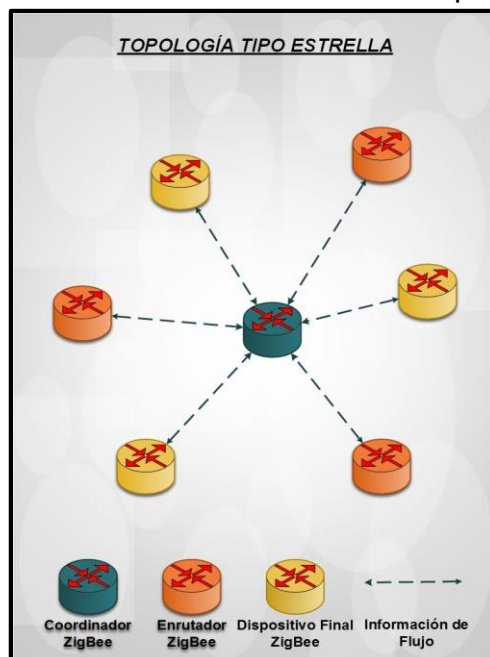


Figura 2.5 Topología tipo Estrella
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

1) Topología tipo Estrella:

Esta topología consiste en un solo ZC y un sin número de ZED, un modelo de red de esclavo maestro es adoptado dónde el maestro el al ZC que es FFD y como esclavo será también FFD o RFD [21].

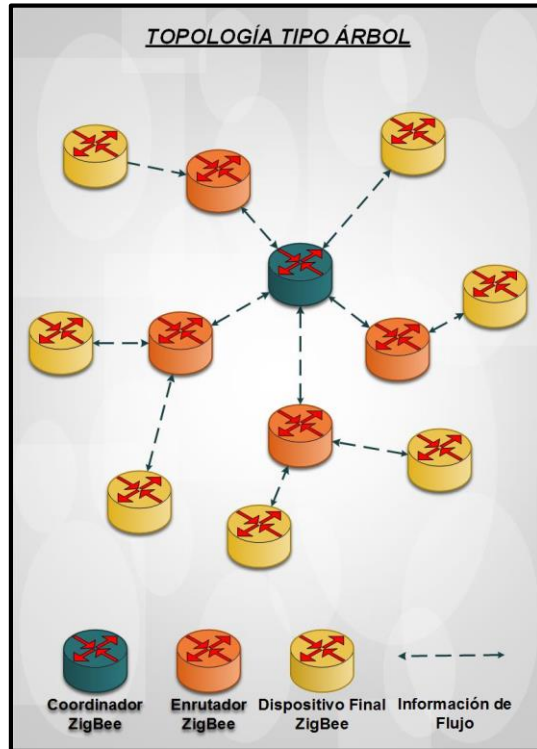


Figura 2.6 Topología tipo Árbol
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

2) Topología tipo Árbol:

La topología tipo árbol es parecida a la topología tipo estrella. La diferencia es que otros nodos pueden comunicarse entre sí, dando paso a que los dispositivos configurados como RFD/FFD puedan estar conectados a los no-coordinadores FFD. Es posible que con esta topología exista una expansión de la red geográficamente [21].

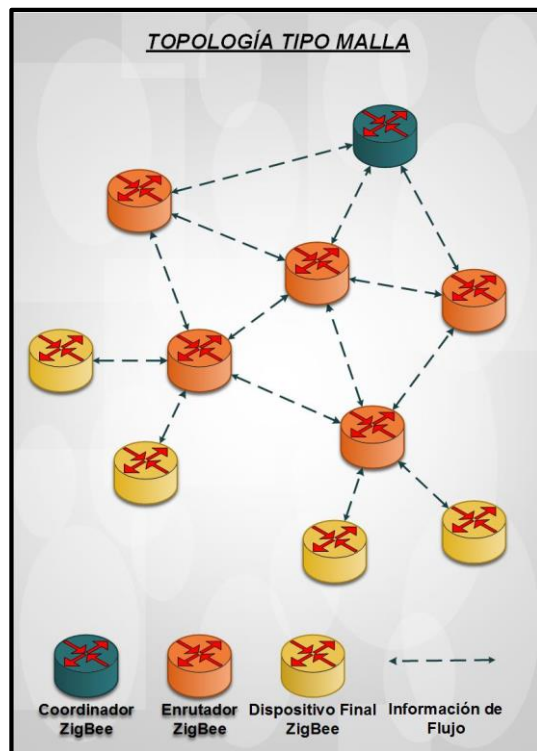


Figura 2.7 Topología tipo Malla
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

3) Topología tipo Malla:

Esta topología se caracteriza porque cada nodo puede estar comunicado con cualquier nodo dentro de su rango, es decir, por la complejidad de la topología de esta red todos los nodos se encuentran interconectados, logrando que la comunicación se dé sin interrupciones [21].

2.2 XBee

Los módulos XBee son soluciones integradas o chips que proporcionan conectividad inalámbrica a dispositivos de puntos finales. Estos módulos trabajan con el estándar de red IEEE 802.15.4 con la finalidad de obtener una red rápida de punto a multipunto o punto a punto. Los XBee han sido diseñados específicamente para aplicaciones de alto rendimiento que requieren sincronización de comunicación predecible y baja latencia [22].

XBee cuenta con 7 diferentes tipos de series:

- ***XBee Serie 1 conocido como XBee 802.15.4.***
- ***XBee Znet 2.5 conocido como Serie***
- ***ZB conocido como Serie2ish.***
- ***2B conocido como Serie2ish.***
- ***900 MHz***
- ***XSC***
- ***XSC S3B***

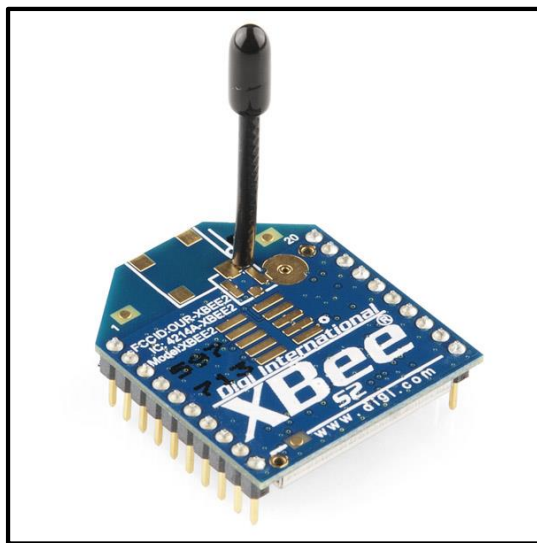


Figura 2.8 Módulo XBee S2
Fuente: Digi International Inc., 2018.

Los módulos se dividen en dos versiones: Regular y Pro. Son pequeñas las diferencias entre el módulo Regular XBee y el módulo Pro XBee. Los módulos Pro tienen un alcance de más de 1.6 km, a diferencia del módulo Regular que su alcance es de 90 m, el consumo energético es mayor y su costo en el mercado es más elevado.

La ventaja es que en una red se puede trabajar con las dos versiones siempre y cuando sean de la misma serie.

Actualmente existen decenas de módulos y cada uno va a variar dependiendo del tipo de antena que tenga y el tipo de serie que sea (**ANEXO 2**). Estos módulos cuentan con características que hacen posible el intercambio de una versión a otra, tomando en consideración que los

módulos sean de una misma serie ya que los pines que corresponde a la potencia, tierra y líneas de transmisión (Tx) y recepción (Rx) se encuentran en el mismo lugar [22].

Para poder construir la WSN dentro de la mina subterránea, se usaron módulos XBee Serie 2, debido a que este módulo permite crear complejas mallas de redes basados en la malla del firmware de dispositivos como XBee, ZB, ZigBee. Este módulo en específico permite una notable y simple comunicación entre microcontroladores, computadoras, o sistemas que tengan un puerto serial.

Se tomó en consideración el RSSI y el porcentaje de éxito de transmisión y recepción de paquete entre los módulos al momento de construir la malla dentro de la mina subterránea en donde los escenarios Línea de Vista (en inglés; Line of Sight, LOS) y No Línea de Vista (en inglés; Non Line of Sight, NLOS) no representaron inconvenientes para que la red funcione con éxito [23].



Figura 2.9 Módulos XBee Serie 2
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2017.

2.3 XCTU

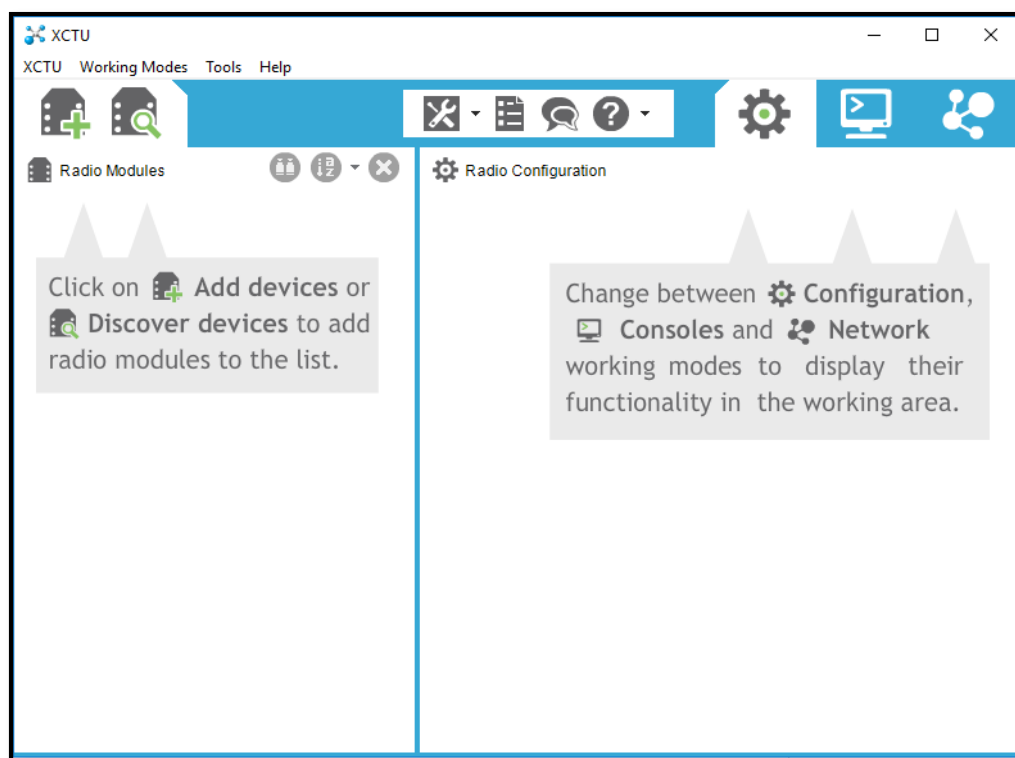


Figura 2.10 Interfaz de la multiplataforma XCTU

Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2017.

XCTU es una multiplataforma libre diseñada como aplicación para habilitar desarrolladores que interactúen con módulos de RF hechos por Digi a través del uso de una simple interfaz gráfica. Esta plataforma incluye herramientas para poder configurar y probar de una manera sencilla los módulos de RF XBee [19].

La herramienta utilizada para el desarrollo de este proyecto corresponde a *Radio Range Test*, esta herramienta es usada para evaluar el rango real RF y la calidad de enlace entre dos módulos pertenecientes a una misma red. La herramienta necesita seleccionar un dispositivo local y un dispositivo remoto como destinatario. Además configura el tipo de evaluación de rango, el tiempo de duración de recepción de los paquetes, el intervalo de tiempo de transmisión y el número de paquetes a transmitir.

Los resultados que muestra esta herramienta, en función del tiempo de transmisión y recepción son: el porcentaje de éxito de los paquetes enviados/recibidos, y el indicador RSSI para los dispositivos locales y remotos como se puede observar en la Figura 2.11.

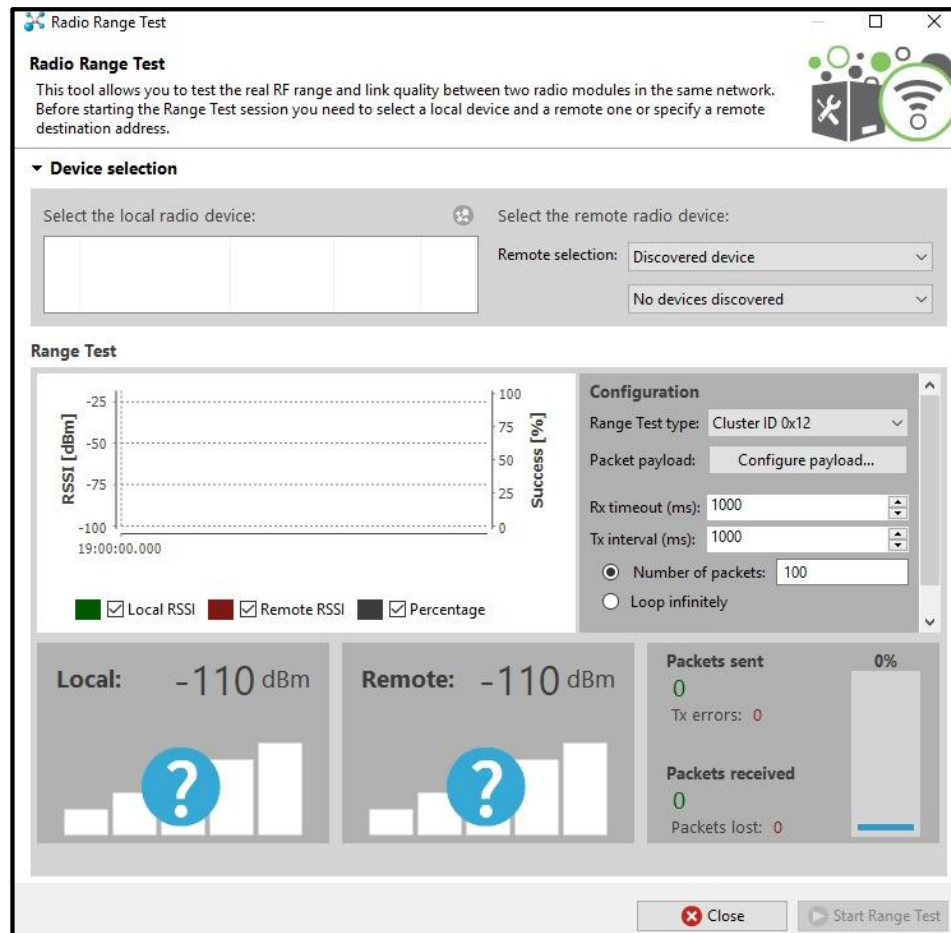


Figura 2.11 Range Test XCTU
Fuente: Digi International, 2017.

Esta plataforma representa gráficamente la potencia de la señal de cada conexión por la red de los módulos XBee.

Para realizar las mediciones con los módulos XBee estos debieron ser programados en modo de Interfaz de Programación de Aplicaciones (en inglés; Application Programming Interface, API), este modo provee una interfaz simple con los Dispositivos Objetos ZigBee (en inglés; ZigBee Objects Device, ZDO). La transmisión de trama en el modo API (en inglés; API Frame) permite fijar la fuente y dispositivo final en la transmisión de datos [19].

Los datos de interés deben estar contenidos en una secuencia de números como el primer byte (número de secuencia de transacción), seguido por todos los bytes útiles para el ZDO. Múltiples campos de bytes deben ser enviados en el orden de *Little-endian byte*.

El modo de operación API es una alternativa en la cual la trama basada en API extiende el nivel con el cual la aplicación el módulo *host* puede interactuar con las capacidades de la red, es decir todos los datos entrantes y salientes son contenidos en tramas que define las operaciones o eventos en el interior del módulo.

API provee un medio alternativo de configuración para los módulos y el enrutamiento de datos en la capa de aplicación en el host. Una aplicación host puede enviar trama de datos hacia el modulo que contiene la dirección e información válida en lugar de usar comandos para modificar las direcciones. El módulo enviará trama de datos hacia la aplicación y al ser recibidos en su contenido se encontrará el estado de los paquetes tanto como la fuente e información eficaz.

2.3.1 RSSI

Es posible medir la intensidad de la señal recibida en el dispositivo usando el indicador RSSI el cual retorna el valor medido en $-dBm$ del último paquete recibido, sin embargo, este valor pierde su confiabilidad, si en el lapso de la transmisión ocurren múltiples fluctuaciones de potencia [19]. El comando del RSSI no provee un índice general de todas las transmisiones realizadas o de la calidad del peor enlace, únicamente indica la calidad del último enlace.

El perfil del dispositivo ZigBee está provisto con la capacidad de encontrar dentro de una red todos los terminales que operen con ZigBee, para aquello se requiere dos parámetros, LQI que es usado para leer los dispositivos que se encuentran alrededor y de las actualizaciones de la red usado para tener un dispositivo remoto además de realizar un escaneo con el fin de encontrar todos los dispositivos ZigBee cercanos.

2.4 Modelo de propagación

Los modelos de propagación son el pilar fundamental para que un sistema inalámbrico de telecomunicaciones funcione debidamente, ya que estos pueden determinar propiedades de mayor interés como cobertura de red, tasa de datos, posición de una estación base, con el fin de facilitar y mejorar los diseños de estos sistemas.

Un modelo de propagación tiene como objetivo principal poder determinar la pérdida de trayecto.

2.4.1 Pérdida de trayecto

La pérdida de trayecto (PL_{dB}), es una medida promedio de atenuación RF que se refleja en el receptor y afecta a la señal transmitida, después de atravesar un trayecto con algunas longitudes de ondas. La pérdida de trayecto está definida como [24]:

$$PL_{(dB)} = 10 \log \frac{P_t}{P_r} \quad (2.1)$$

Dónde P_t es la potencia de transmisión y P_r es la potencia de recepción. En espacio libre, la potencia de ganancia de la antena de recepción que está separada de la antena de transmisión por una distancia d dada por la ecuación de espacio libre de Friss:

$$PL = (d) \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4)^2 d^2 L} \quad (2.2)$$

Dónde G_t es la ganancia de la antena de transmisión y G_r es la ganancia de recepción de la antena. L es el factor de pérdida del sistema, no relacionada a la propagación. λ es la longitud de onda en metros. La ecuación (2) no es válida para $d = 0$. Por lo tanto, muchos modelos de propagación usan representaciones diferentes para una distancia cercana, d_o , conocido como la potencia recibida en el punto de referencia. Esta distancia es comúnmente de 1 m. Para un canal real de radio móvil, el espacio libre no es considerado como un medio apropiado de propagación. Un modelo general de PL usa un parámetro α para denotar la relación entre la distancia de separación y la potencia recibida.

Así que la pérdida de trayecto (en decibelios) queda expresada como [24]:

$$PL_{(dB)} = PL(d_o) + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_o}\right) + X \quad (2.3)$$

Donde $\alpha = 2$ se caracteriza por ser el valor característico para el espacio libre. Sin embargo, α es generalmente un valor más elevado para canales inalámbricos. X es una variable Gaussiana aleatoria de media cero expresada en dB , de desviación estándar σ_x , que refleja la variación en promedio de la potencia recibida que ocurre cuando un modelo de PL de este tipo es usado.

2.4.2 Tipos de desvanecimientos

El tipo de desvanecimiento que una señal de propagación experimenta a través de un canal de radio móvil va a depender de la naturaleza de la señal transmitida, así como en la caracterización del canal. Diferentes tipos de señales transmitidas experimentarán diferentes tipos de desvanecimientos, de acuerdo con la relación entre los parámetros de la señal, como la pérdida de camino, el Ancho de Banda (en inglés; Bandwidth, BW), el periodo del símbolo, etc., y los parámetros del canal como el tiempo de Esparcimiento de Retraso (en inglés; Root Mean Square, RMS) y el esparcimiento Doppler (Doppler spread). Como se puede observar en la Figura 2.12, describe los diferentes tipos de desvanecimientos y las diferentes relaciones que existen entre estos [24].

El fenómeno de gran-escala de desvanecimiento es afectado primordialmente por la presencia de colinas, campos, y edificios entre el transmisor y receptor. La estadística de un desvanecimiento de gran escala proviene de un sistema computarizado que estima la pérdida de camino en función de la distancia y otros factores que son tomados en cuenta.

Se dice que un canal expuesto a desvanecimiento es selectivo en frecuencia cuando el tiempo de esparcimiento es mayor que el periodo del símbolo. Esta condición ocurre siempre que las componentes multipaso recibidas de un símbolo se extienden más allá del tiempo de

duración del símbolo. De manera que la dispersión multipaso de una señal produce un tipo de interferencia Interferencia Intersimbólica (en inglés; Intersymbol Interference, ISI) conocido como canal inducido ISI. Cuando el tiempo de esparcimiento es menor que el símbolo del periodo, se dice que el canal presenta desvanecimiento plano, y no existe distorsión a causa del canal inducido ISI. Pero aún puede presentarse degradación en su desempeño, debido a los fasores de las componentes que producen una reducción substancial de la SNR en el receptor.

El desvanecimiento rápido y el desvanecimiento lento están clasificados en base a qué tan rápidamente la señal banda base transmitida cambia, comparado a los cambios de la tasa de los parámetros eléctricos del canal. Si la respuesta impulso del canal cambia en una tasa mucho más rápida que la señal transmitida, se asume un canal de desvanecimiento rápido. Caso contrario, se podrá asumir un canal de desvanecimiento lento. Es importante notar la velocidad de la unidad móvil o la velocidad de los objetos usando un canal a través de una señal banda base que determina si una señal se somete a desvanecimiento rápido o desvanecimiento lento.

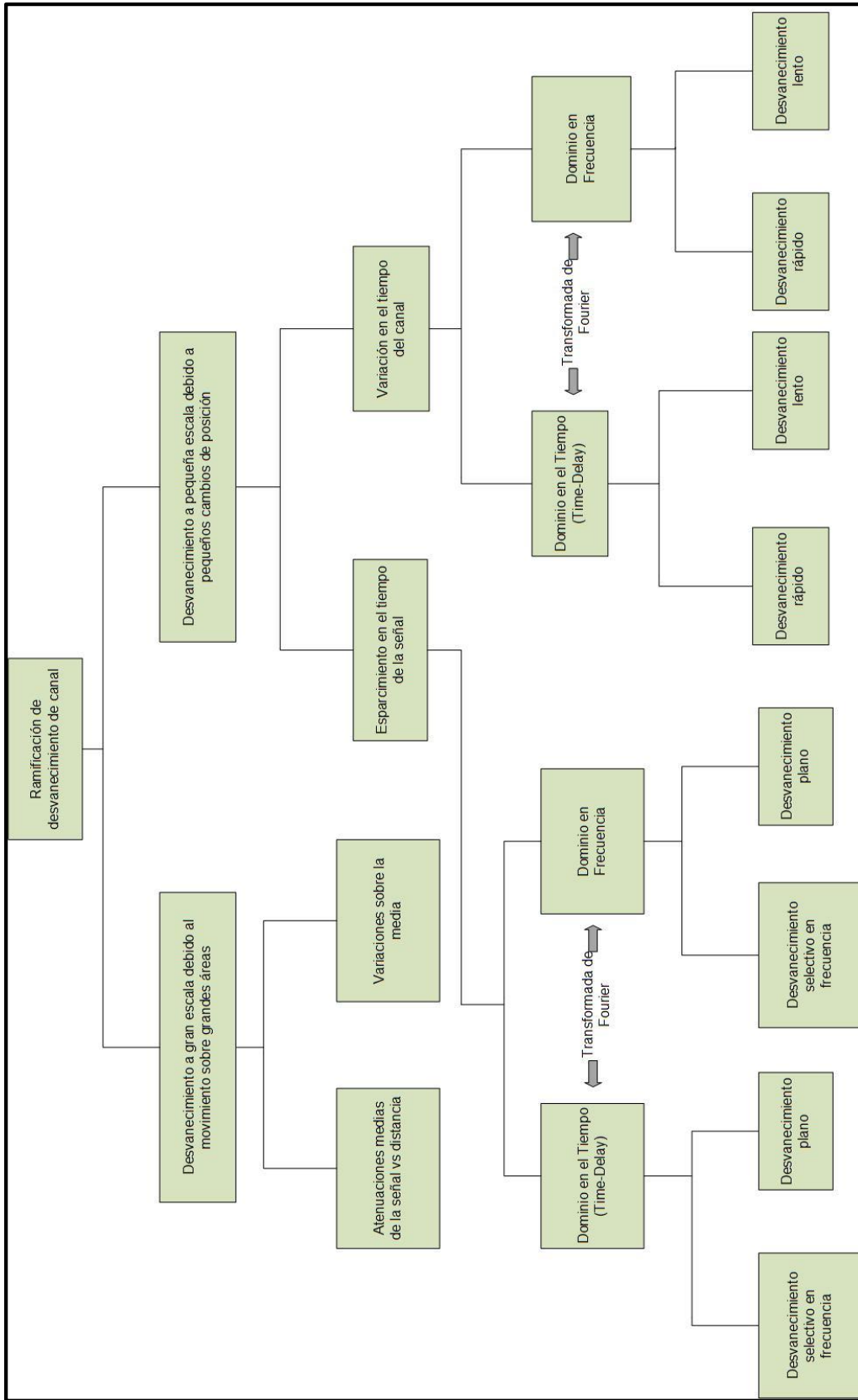


Figura 2.12 Tipos de desvanecimientos

Fuente: IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 45, No. 3, 2003.

2.4.3 Propagación multipaso

En una típica aplicación radio móvil, la estación base es de posición fija, mientras la unidad móvil se encuentra en desplazamiento. Esta es una usual condición sujeta a que la propagación entre ellos es en gran parte a través de dispersión, también por reflexión o difracción de edificios y terrenos u objetos dentro de los edificios, causantes de la obstrucción de LOS en el trayecto. Sin embargo, las ondas de radio convergen en el receptor móvil de diferentes direcciones con diferentes amplitudes, fases, y tiempos de retraso, este fenómeno es conocido como propagación multipaso. El canal de radio es obtenido producto de la sumatoria de las contribuciones de todos los caminos. Si la señal de entrada es una unidad de impulso, $\delta(t)$, la salida será la respuesta impulso del canal, que puede ser escrita como [24]:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N A_n \delta(t - \tau_n) e^{-i\varphi_n} \quad (2.4)$$

La respuesta impulso del canal puede así ser caracterizada por N impulsos de retraso de tiempo, cada uno es representado por una atenuación y desplazamiento de fase de la versión original del impulso transmitido. Aquí, A_n , τ_n , y φ_n representan la atenuación, retraso en tiempo de arribo, y fase, correspondientes al número de trayectos (path n), respectivamente.

Sin embargo, la interferencia multipaso degrada seriamente el rendimiento del sistema de comunicación, muy poco se puede hacer para eliminarlo. Sin embargo, si se caracteriza bien el medio multipaso, y cuenta con conocimientos influyentes en mecanismos de los sistemas de propagación, el mejor diseño para el sistema puede ser seleccionado para lograr un buen desempeño de la propagación y una mejor calidad de servicio.

2.4.4 Mecanismos de propagación

Existen tres mecanismos básicos de propagación que influyen en los sistemas de comunicaciones móviles [24].

1. Reflexión

La reflexión ocurre cuando las ondas electromagnéticas de propagación chocan sobre un objeto que tiene dimensiones muy grandes comparadas con la longitud de onda de la onda propagada. La reflexión puede ocurrir desde la superficie de la tierra, paredes, o muebles. Cuando la reflexión ocurre, la onda podría incluso ser reflejada parcialmente. Los coeficientes de reflexión y refracción son funciones de las propiedades de los materiales del medio, y generalmente depende de la polarización de la onda, el ángulo de incidencia, y la frecuencia de la onda de propagación.

2. Difracción

La difracción ocurre cuando el radio del camino entre el transmisor y receptor es obstruido por una superficie que tiene bordes agudos. La onda producida por la superficie de obstrucción está presente a través del espacio e incluso detrás del obstáculo, incluso cuando no existe LOS entre el transmisor y receptor. Para altas frecuencias, difracción como reflexión depende de la geometría de los obstáculos, así como en la amplitud, fase, y polarización de la onda incidente en el punto de difracción.

3. Dispersión

La dispersión ocurre cuando en el medio en el que la onda se está propagando existen objetos con dimensiones que son pequeñas en comparación a la longitud de onda, y donde el número de obstáculos por unidad de volumen es mayor. Las ondas de dispersión son producidas por las superficies rugosas, o por otro tipo de irregularidades en el canal. En la práctica, vegetación, señaléticas en la calle, iluminarias, y escaleras de emergencias en los exteriores de los edificios pueden inducir dispersión en sistemas de comunicaciones móviles. Tener un vasto conocimiento de los detalles físicos de los objetos puede ser usado para predecir acertadamente la intensidad de la señal de dispersión.

CAPÍTULO 3

3. INTERPRETACIÓN DE DATOS ADQUIRIDOS, ESTIMACIÓN DE GRADIENTE E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED SENSORES INALÁMBRICOS



Punto de referencia del transmisor ZC con respecto a la boca mina, para las mediciones de potencia de la señal.

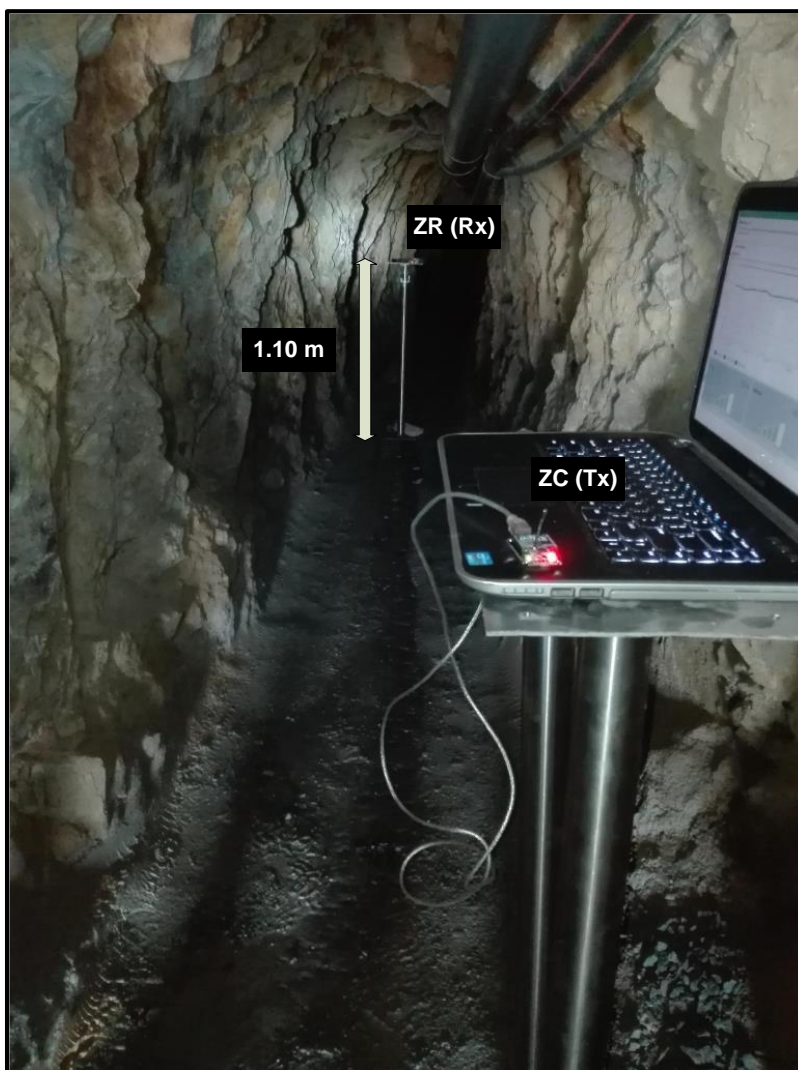
Figura 3.1 Ubicación del ZC en el interior de la mina Reina del Cisne III

Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2017.

El estudio realizado en la mina Reina del Cisne III se dividió en tres etapas: Iniciando con la adquisición de datos mediante el software XCTU; estos datos pertenecen a los niveles de potencia con la que llega la señal emitida al módulo receptor en función de la distancia existente de este con el módulo transmisor, a

continuación por los métodos de tabulación y esquematización de los datos adquiridos, se calcula los valores de gradientes característicos para el modelo de propagación que asemeje las pérdidas reales presentes en los ambientes definidos por sus características físicas, como proceso final en base al modelos de propagación resultante, se definieron las distancias donde se ubicaron los nodos que conforman el diseño de la WSN para una sección de la mina.

El punto de referencia en donde se ubicó el primer módulo de la red se encuentra pasando la puerta de seguridad de la mina, localizada 12 m de distancia hacia el interior de la mina con respecto a la boca mina como se observa en la Figura 3.1.



Toma de potencia de recepción a 10 m de distancia estimando la misma altura entre Tx y Rx.

Figura 3.2 Ubicación del ZC y ZR dentro de la mina
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2017.

Sobre una plataforma de 1.10 m de altura con respecto al nivel del suelo se situó un módulo XBee programado como ZC, este módulo cumple con la función de transmisor (Tx) y se mantuvo en posición fija durante las mediciones y adquisición de datos, otro módulo XBee fue programado como ZR, este módulo cumple con la función de receptor (Rx) y se mantuvo la misma altura con respecto al ZC como se puede observar en la Figura 3.2.

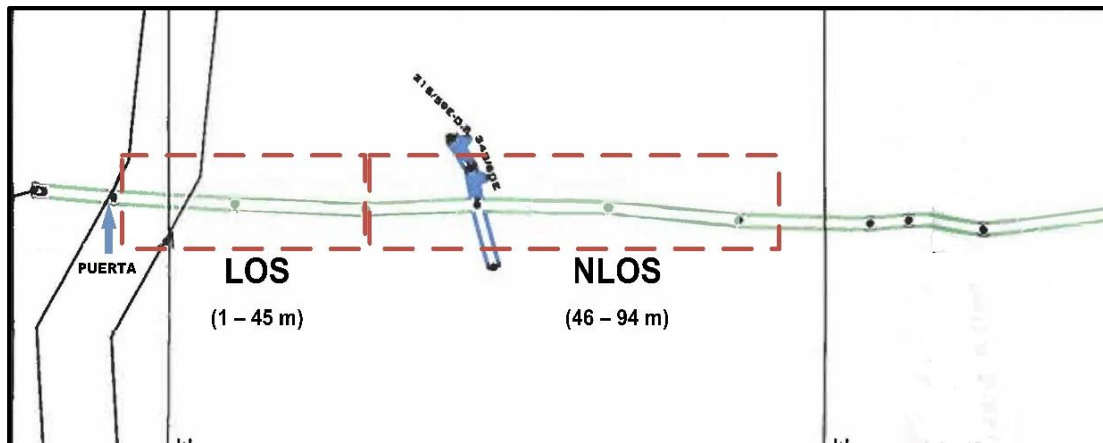


Figura 3.3 Plano de la mina Reina del Cisne III: Escenarios LOS y NLOS
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2017.

Para el desarrollo del proyecto se definieron dos escenarios; LOS ($1 - 45\text{ m}$) y NLOS ($46 - 94\text{ m}$) en referencia a la ubicación del ZC como se puede observar en la Figura 3.3.

Para el escenario LOS, se realizaron mediciones de potencia cada 5 m con respecto al módulo transmisor (Tx), enviando 25 paquetes utilizando la herramienta *range test*, del software XCTU, el cual muestra: la cantidad de paquete a transmitir, el tiempo de duración de la trama de los paquetes enviados, el porcentaje de éxito de envío/recepción de paquetes, y el indicador RSSI tanto para el equipo local y remoto [19]. Y para el escenario NLOS, trasladando el receptor 3 m con respecto al nuevo punto de referencia, se realizó el mismo procedimiento debido a que el canal RF presenta obstrucciones. La distancia es medida de forma lineal desde el punto referencia donde se ubicó el ZC para ambos escenarios.

El valor de potencia provisto por el RSSI representa la intensidad de la potencia de la última trama de paquetes recibida, por lo que es conveniente, con el fin de tener una mejor estimación realizar 10 mediciones en intervalos de 30 segundos y promediarlos, obteniendo un valor de RSSI con mayor confiabilidad para cada punto. **(ANEXO 3)**.

Conociendo que la potencia de transmisión de los módulos XBee es de 2 mW (3 dBm) y teniendo en cuenta que el índice de potencia de la señal recibida se encuentra referenciado a 1 mW (0 dBm) [22], se puede asumir que el valor de RSSI promedio es igual a la potencia recibida en el ZR.

Se utilizó el software utilitario Microsoft Excel, para mostrar de manera gráfica los valores obtenidos, en cuyos ejes x y y se muestran las variables: distancia en m y RSSI en dBm , respectivamente para cada eje, mostrando así las fluctuaciones de potencias medidas, como se puede observar en la Figura 3.4.

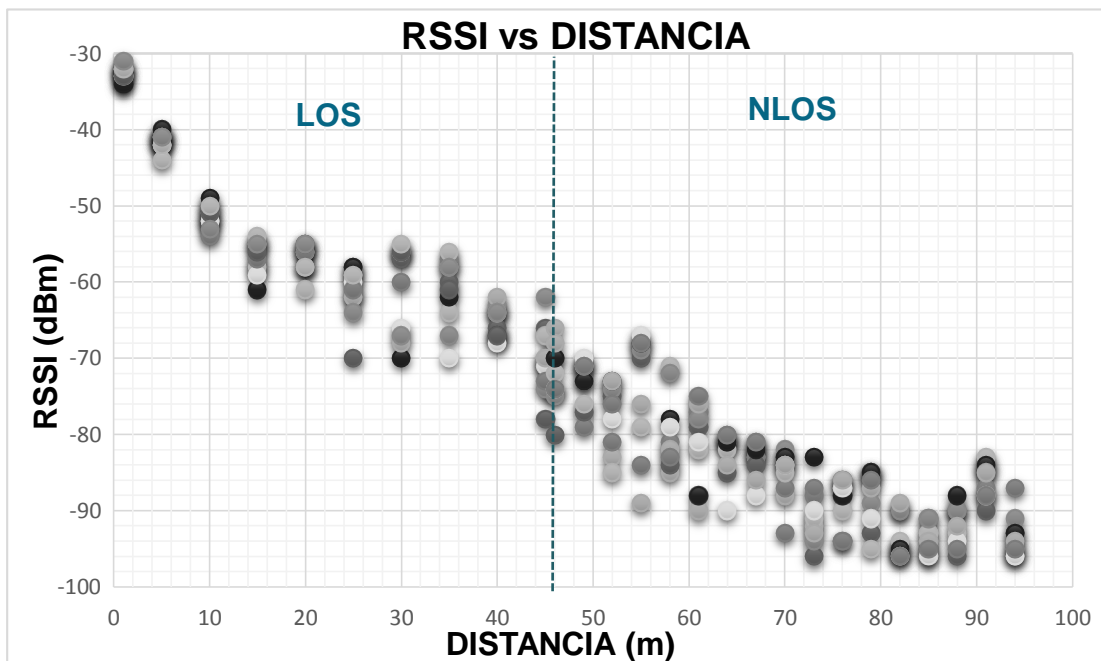


Figura 3.4 RSSI vs DISTANCIA
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

Una vez compiladas las mediciones de potencia recibida en función de la distancia, se procede a calcular las pérdidas causadas en el canal radio por las atenuaciones, que influyen de forma directa en la señal mientras esta sigue su trayecto entre los dispositivos enlazados. Recurriendo a la teoría de cálculo de las pérdidas en el medio de propagación para conexiones RF, menciona que; la diferencia entre la potencia de transmisión y la potencia de recepción será igual a la pérdida de trayecto total en el sistema.

$$P_{Tx(\text{dBm})} - P_{Rx(\text{dBm})} = PL_{dB} \quad (3.1)$$

Esta operación se realizó para cada medida de potencia tomada en los escenarios LOS y NLOS respectivamente, cuyos resultados fueron graficados con el fin de apreciar la tendencia en que la pérdida de trayecto aumenta en función de la distancia con respecto a ZC, como se puede observar en la Figura 3.5, (ANEXO 4).

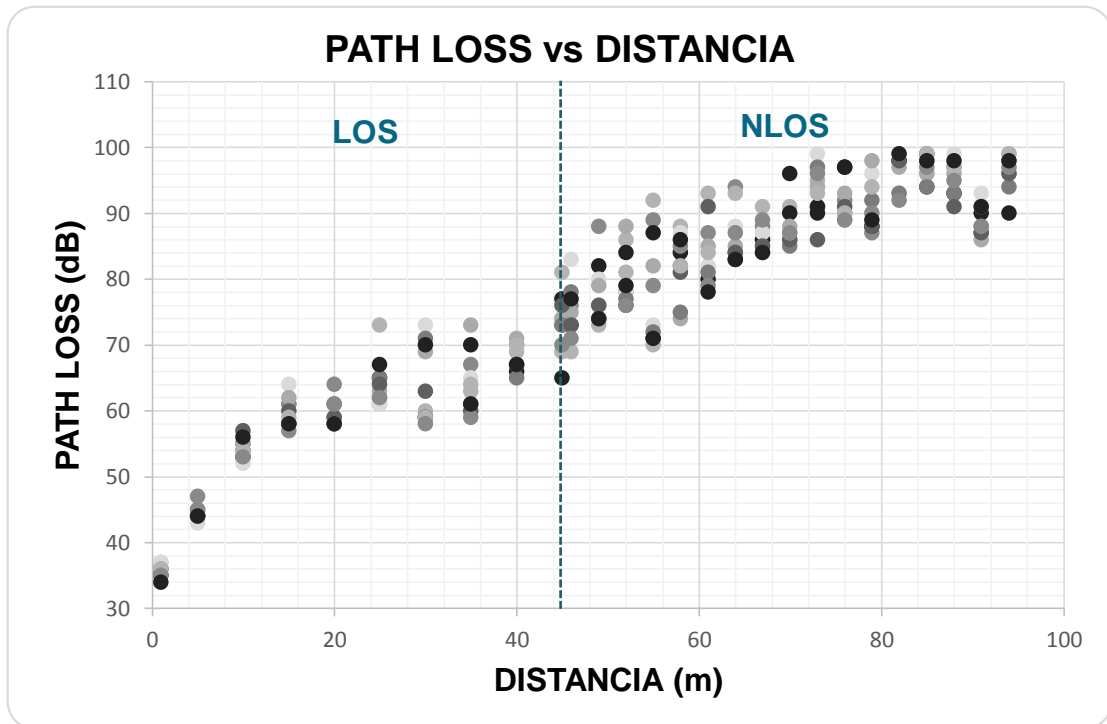


Figura 3.5 PATH LOSS vs DISTANCIA
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

Para poder estimar el exponente de pérdida de trayecto o gradiente de propagación (α), los resultados de las diferencias entre potencia de transmisión y recepción son graficados, separando los escenarios establecidos de acuerdo a sus rango de distancias. De esta manera la variables que se utilizan en esta esquematización son: PATH LOSS en el eje y con unidades dB versus el producto de 10 veces el logaritmo en base diez de la distancia ($10 \log(d)$) en el eje x. Para obtener los valores característicos de interés para la ecuación utilizada en este proyecto se aplica regresión lineal a los datos adquiridos, dando como resultado para cada escenario, la ecuación de la forma $y = ax + b$, perteneciente a la recta trazada, donde a corresponde al gradiente de propagación y b es la pérdida promedio en la distancia de referencia d_0 , como se puede observar en las Figuras 3.6 y 3.7.

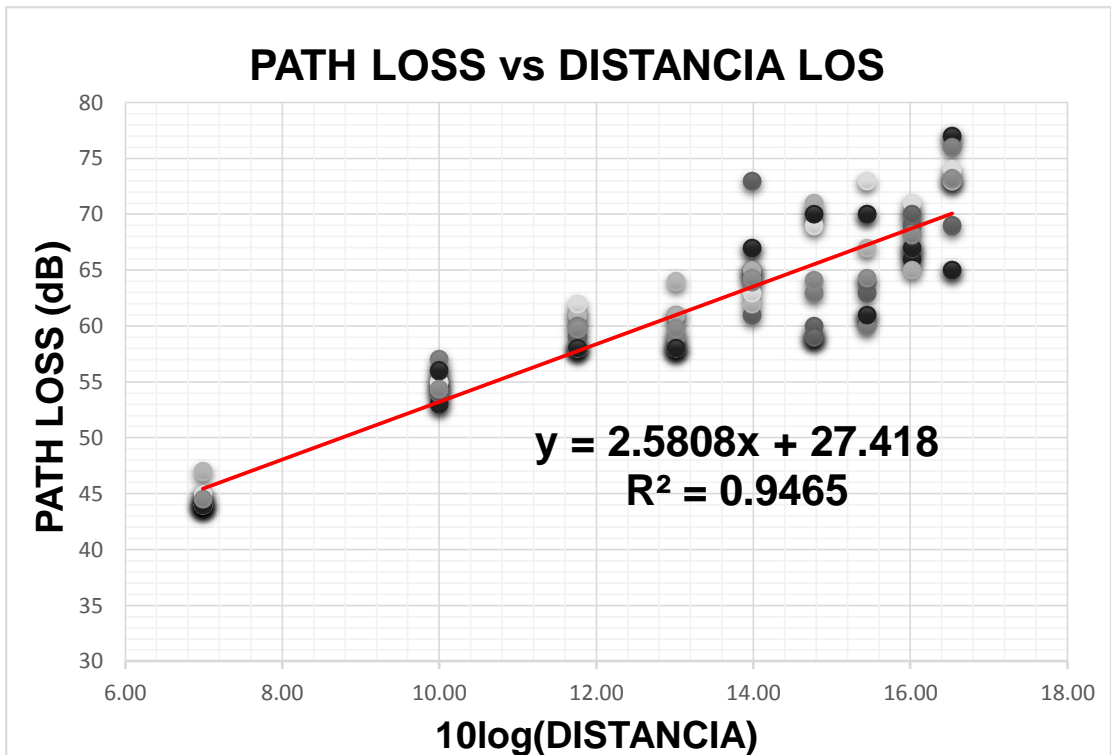


Figura 3.7 PATH LOSS vs DISTANCIA LOS
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

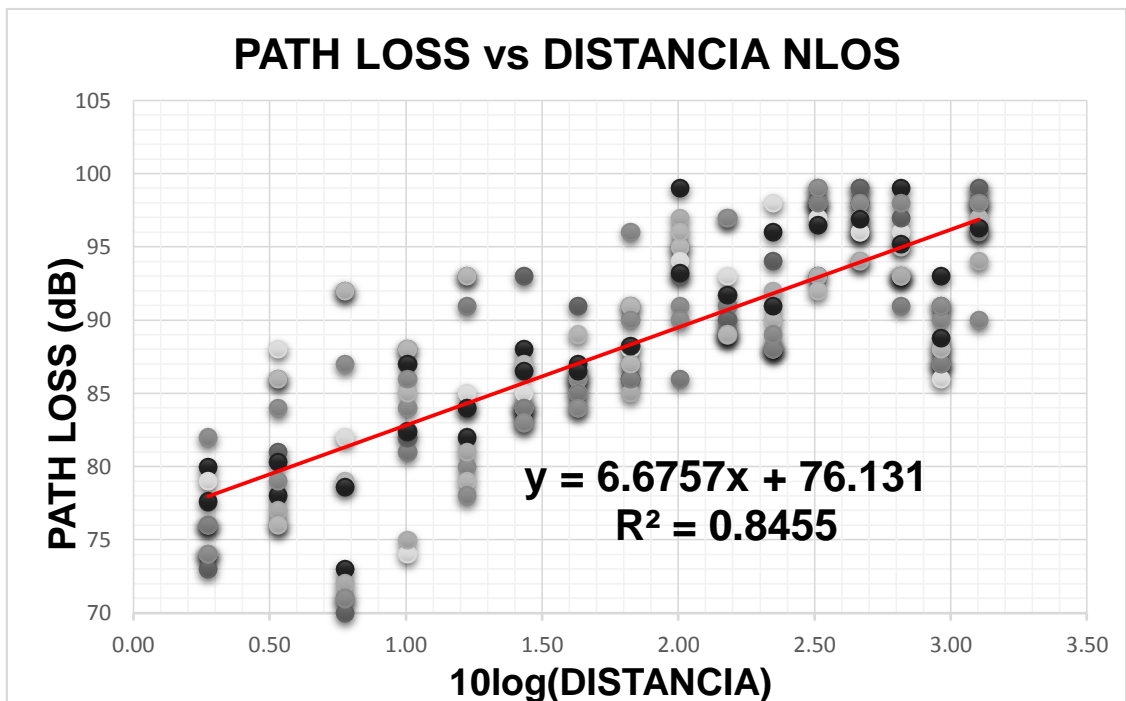


Figura 3.6 PATH LOSS vs DISTANCIA NLOS
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

La ecuación del modelo utilizado en este proyecto corresponde a:

$$PL_{dB}(d) = \overline{PL_{dB}}(d_0) + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X \quad (3.2)$$

Donde $\overline{PL_{dB}}(d_0)$, denota la pérdida promedio de trayecto en la distancia de referencia d_0 , $10\alpha \log(d/d_0)$ es la pérdida de trayecto referenciada a la distancia d_0 y X es una variable Gaussiana aleatoria de media cero expresada en dB .

La pérdida de trayecto promedio en d_0 y el exponente de pérdida de trayecto α son determinados a través del análisis de regresión lineal [13]. La diferencia entre este ajuste y el dato medido está representada por la variable de desvanecimiento X **(ANEXO 6)**.

| Frecuencia | Área | PATH LOSS (dB) promedio a d_0 | α | σ |
|------------|----------------------|---------------------------------|----------|----------|
| 2,4 GHz | LOS ($d_0 = 1$ m) | 27 | 2,6 | 1,808 |
| | NLOS ($d_0 = 46$ m) | 76 | 6,7 | 2,463 |

Tabla 3.1 Tabla de resultados Modelo de Propagación
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

La Tabla 3.1, muestra los valores obtenidos para $\overline{PL_{dB}}(d_0)$, α y σ_x (desviación estándar de X). Es normal que el valor de gradiente para el escenario NLOS sea mayor al obtenido en LOS, debido a los mecanismos de propagación presentes en el canal radio, por esta misma razón los valores de potencias recibidas tienen mayores fluctuaciones y por ende la desviación estándar (σ_x) con respecto a la media incrementa su valor. **(ANEXO 5)**

Debido a que los módulos XBee S2 tienen sensibilidad de recepción igual a -96 dBm [22] y tratando de mantener un margen de enlace de por lo menos 10 dB en condiciones ideales que garantice una buena recepción de la señal; igualando las ecuaciones (3.1);(3.2) tomando como referente el escenario NLOS ($\alpha = 6.7$), ya que a lo largo de la mina, el sendero y la topografía se tornan irregulares, con el fin de obtener una mayor cobertura utilizando la menor cantidad de dispositivos, para este caso experimental se considera trabajar con potencias en el módulo receptor menores -86 dBm . Dadas estas consideraciones se procede a calcular la distancia promedio entre dispositivos que conformaran los nodos de la red.

$$P_{Tx} - P_{Rx} = \overline{PL_{dB}}(d_0) + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X$$

$$89 \text{ dB} = 76 \text{ dB} + 67 \log\left(\frac{d}{46}\right)$$

$$\frac{3 \text{ dB}}{67} = \log\left(\frac{d}{46}\right)$$

$$d = 46 * 10^{\frac{3}{67}}$$

$$d = 50.99 \text{ m} \approx 51 \text{ m}$$

Si bien es cierto el modelo de propagación permite estimar los niveles de pérdidas, producto de los factores que atenúan la señal emitida, previniendo que la intensidad de señal en el receptor se encuentre por debajo de la sensibilidad de recepción operacional del módulo. Otro dato que se puede obtener mediante el modelo de propagación fijando un valor de pérdida, es la distancia.

Como se observa el resultado teórico, la distancia entre módulos tiene un valor aproximado de 51 *m*. Sin embargo, el modelo de propagación no refleja la calidad de la señal del enlace establecido.

Las características del canal radio influyen en la propagación de la señal, haciendo que esta se vea afectada o favorecida en el entorno en el cual se propaga. Otro punto que se debe considerar ya que se trabaja con señales digitales y por ende deben pasar por un proceso de modulación para ser enviadas, se espera que la señal recibida pueda ser demodulada correctamente y con facilidad, cuan más efectivo sea este proceso se puede concluir que el nivel de la calidad del enlace es mejor.

Por esta razón, para comprobar si la distancia teórica obtenida por el modelo de propagación es apropiada para la ubicación de los nodos que conforman la red, se procede a realizar mediciones de pruebas de campo con el propósito de verificar la localización mediante el test de LQI a cada módulo ZR que conforma la WSN.

Sobrellevando el hecho de que el área de trabajo en el interior de la mina en su mayoría es de carácter lineal, la cual representa un inconveniente para el diseño de red con topología tipo malla; siendo esta la de mayor eficiencia para dispositivos que forman una red de sensores que operan bajo el protocolo ZigBee.

Como resultado de las pruebas, el rango de distancias en el cual los test mostraron valores positivos para el diseño de la red de sensores se encuentra comprendido entre los 50 y 80 *m*; al aplicar este rango de distancias experimentales, se logró diseñar la red de sensores inalámbricos con una cobertura de 200 *m* aproximadamente, con topología de tipo malla, estableciendo enlaces directos para un módulo con dos hasta

tres módulos más, con un total de 6 módulos XBee S2 estructurada por 1 ZC y 5 ZR, como se puede observar en las Figuras 3.8 y 3.9.

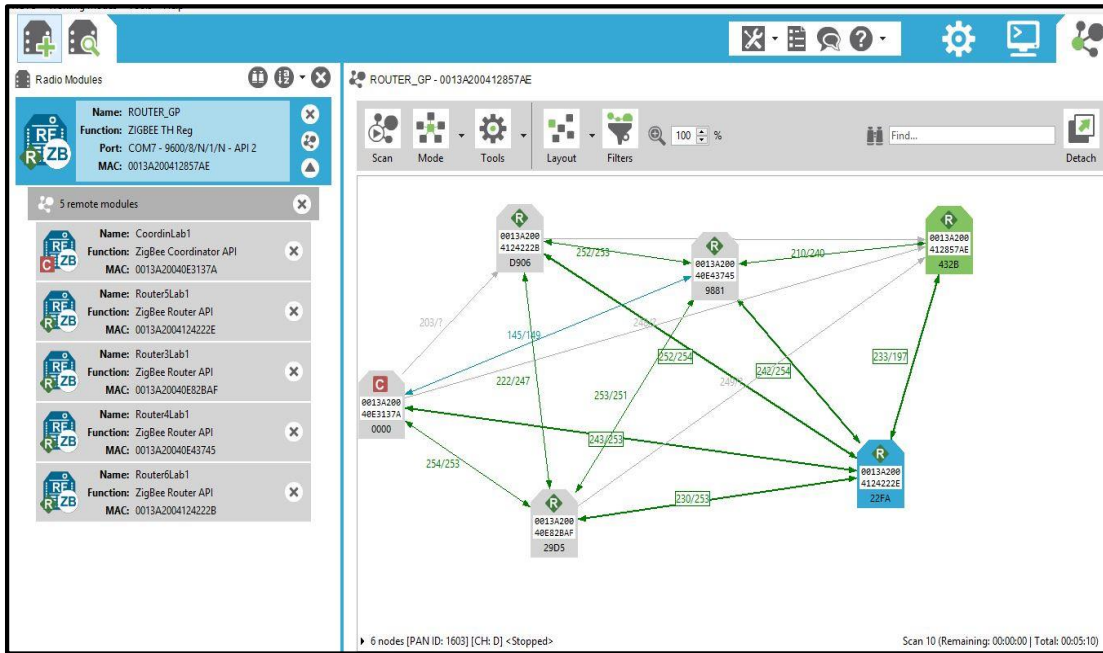


Figura 3.8 Test LQI de la red WSN
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

La Tabla 3.2 muestra el porcentaje de error entre los valores de potencia de recepción teórica y experimental, además de los indicadores de LQI para cada enlace ente módulos y la distancia existente entre ellos.

$$\%ERROR = \left| \frac{TEÓRICO - EXPERIMENTAL}{TEÓRICO} \right| * 100 \quad (3.3)$$

| MÓDULOS | DISTANCIA (m) | LQI local/remoto | PATH LOSS (dB) | RSSI Prx (dBm) teórico | RSSI medido Prx (dBm) local/remoto | % ERROR teórico-local |
|-------------|---------------|------------------|----------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| ZC / ZR-1 | 55 | 254/243 | 81 | -78 | -76/-78 | 2,56 |
| ZR-1 / ZR-2 | 12 | 222/247 | 55 | -52 | -57/-57 | 9,62 |
| ZR-1 / ZR-3 | 80 | 253/251 | 92 | -89 | -87/-88 | 2,25 |
| ZR-2 / ZR-3 | 77 | 252/253 | 88 | -88 | -89/-89 | 1,14 |
| ZR-3 / ZR-4 | 55 | 210/240 | 81 | -78 | -80/-79 | 2,56 |
| ZR-3 / ZR-5 | 77 | 242/254 | 92 | -88 | -88/-90 | 0,00 |
| ZR-4 / ZR-5 | 23 | 233/197 | 56 | -53 | -58/-61 | 9,43 |

Tabla 3.2 Tabla de resultados enlaces entre módulos
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

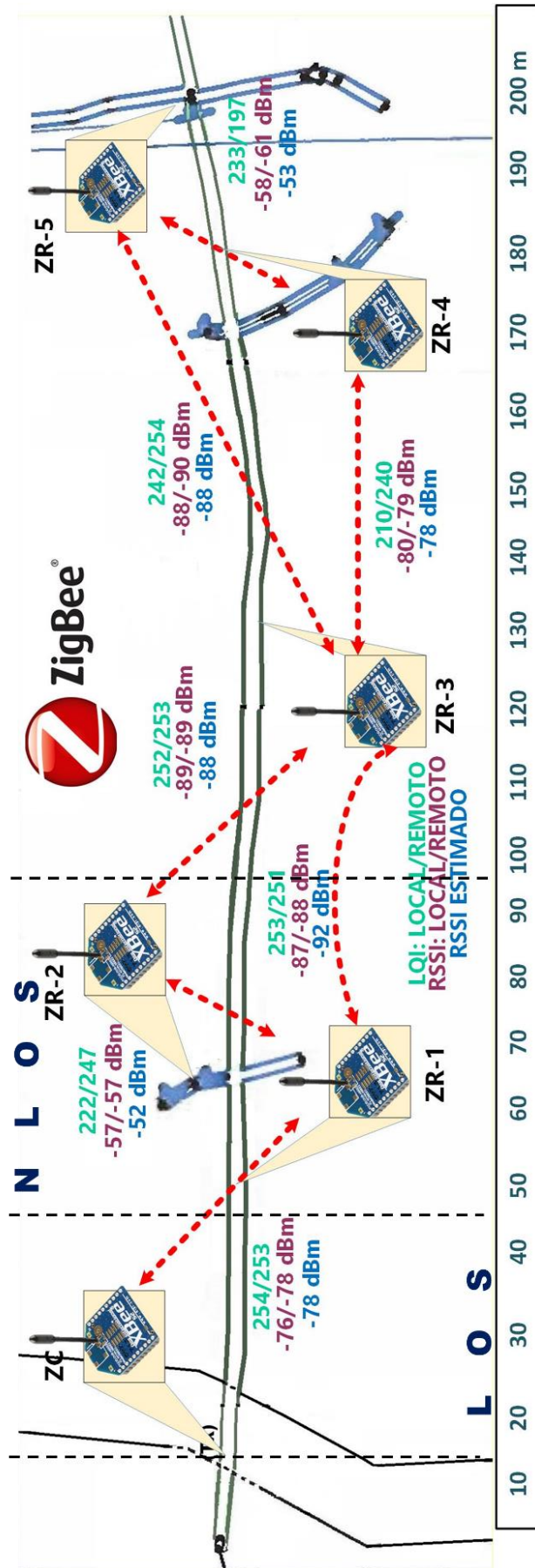


Figura 3.9 Diseño de red ZigBee
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los estudios de comunicaciones no son ajenos a los ambientes mineros, hace 3 décadas empezaron utilizando la metodología de conexiones de aquella época, las cuales eran físicas mediante cables o guías de onda, al pasar el tiempo y el avance tecnológico se llega a la era de las telecomunicaciones y el medio de transmisión inalámbrico, por lo cual era necesario realizar estudios en el interior de las galerías para este tipo de conexiones, es así como se llega al hecho de poder implementar una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de minas subterráneas, uno de los beneficios de este tipo de red comparado a las redes alámbricas, es el tiempo de instalación mantenimiento y espacio físico que requieren los dispositivos radio, los que los hace recomendables para este entorno.

Los enlaces RF requieren de un estudio previo de las características del ambiente adaptando los parámetros de operación, principalmente potencia de transmisión y frecuencia al entorno escogido, para lo cual es oportuno escoger un modelo de propagación que ayude a estimar los niveles de pérdida producidos por el canal radio. Existen diversos modelos de propagación resultado de innumerables estudios de conexiones de radio frecuencia, para los cuales existen normas planteadas que se debe tener en cuenta al momento de emplearlos. Cuando el ambiente es poco común como en este caso, el interior de una mina, se parte de un modelo base al cual se debió encontrar los valores que estimen las pérdidas para el sistema.

Para realizar el modelamiento se utilizó equipos existente en el mercado de bajo costo económico, esto no representó que haya existido algún tipo inconveniente al efectuar las pruebas pertinentes y lograr el objetivo planteado para este proyecto, cabe mencionar que el estudio dentro de las galerías es amplio y se puede variar los parámetros de operación, en este estudio se trabajó con frecuencia de 2.4 GHz y potencia de transmisión de 3 *dBm*, así como también los instrumentos utilizados pueden tener más opciones que permitan tener una mayor cantidad de información recompilada tanto como del enlace y del entorno en el que se desenvuelve.

Basados en los resultados obtenidos a través del análisis de datos adquiridos, y la realización de pruebas de campo pertinente, utilizando el software XCTU como medidor y evaluador de la data, se logró el diseño de una red de sensores inalámbricos

basada en tecnología ZigBee IEEE 802.15.4 en el interior de la galería Sociedad Minera Reina del Cisne III, con el propósito de que esta red a futuro ayude a elevar la seguridad laboral y salvaguardar la salud de los mineros.

En los primeros 100 m adentrándose en la galería, se definieron dos escenarios en los cuales se llevó a cabo las mediciones de potencia a diferentes puntos de distancia, esta compilación de datos son los que permitieron obtener los gradientes característicos requeridos para el modelo de propagación escogido. El modelo por desvanecimiento de sombra en los escenarios definidos tuvo como resultado los valores de gradiente de, $\alpha = 2.6$ (LOS) y $\alpha = 6.7$ (NLOS), estos valores se encuentran por encima del gradiente de espacio libre ($\alpha = 2$). Además, los valores de correlación al aplicar regresión lineal son mayores al 80% que indica la confiabilidad de la data, obteniendo así un 95% y 85% de confianza para cada escenario, corroborando que los resultados del proyecto son aceptables.

ZigBee es la tecnología de redes de sensores cuya topología de mayor eficiencia es de tipo malla, esta topología otorga mayor rendimiento a la red debido a la redundancia entre los enlaces, previniendo así pérdida de información y dando estabilidad a las conexiones entre los nodos de la red. Para el diseño de la red teóricamente se demostró que la distancia entre cada módulo debe ser de 51 m considerando escenarios NLOS, tomando en cuenta un margen de enlace de 10 dB en condiciones ideales, prefiriendo este escenario para la red debido a la irregularidad física en el interior de la mina. Sin embargo, se logró mejorar la relación cobertura - cantidad de módulos, debido a que los mecanismos de propagación del canal radio fueron favorables para la señal, ya que por pruebas realizadas de la calidad del enlace y la intensidad de la señal recibida, la distancia entre los módulos pudo ser mayor en comparación a la estimada teóricamente.

Fijando los módulos ZR, que formaran los nodos de la red a las distancias de ZR-1 55 m, ZR-2 61 m ingresando al primer ramal, ZR-3 135 m, ZR-4 185 m, ZR- 5 200 m ingresando al segundo ramal, en referencia al dispositivo coordinador ZC ubicado a 12 m de la bocamina, se logró el diseño para una sección de la mina, cumpliendo así con el objetivo principal del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Banco Central del Ecuador, "Reporte (Ecuador, 2017) de Minería", Dirección Nacional de Síntesis Macroeconómica, Guayaquil, 2017 [Online]. Available: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero012017.pdf>. [Accessed: 13- Jan- 2018].
- [2] Ministerio de Minería, "El SRI confirma que, en 2017, el sector minero aportó USD 717 millones por impuestos", Quito, 2018.
- [3] Ministerio de Minería, "Proyectos Mineros Estratégicos", Quito, 2016 [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/0B9t02UvtK83SVjBnMlpRcnJYNkk/view>. [Accessed: 13- Jan- 2018].
- [4] La Hora, "Ecuador busca legalizar a 40,000 mineros informales", 2017 [Online]. Available: <https://lahora.com.ec/noticia/1102053718/ecuador-busca-legalizar-a-40000-mineros-informales>. [Accessed: 30- Jan- 2018].
- [5] Agencia de Regulación y Control Mminero, "La formalización minera generará 9.000 fuentes de empleo directo e indirecto en Ecuador", Quito, 2017.
- [6] La Hora, "Minería, un sector peligroso", 2010 [Online]. Available: <https://lahora.com.ec/noticia/1101038013/minerc3ada-un-sector-peligroso>. [Accessed: 30- Jan- 2018].
- [7] Agencia de Regulación y Control Minero, "Accidente provoca la muerte de un trabajador en mina de Zaruma", Quito, 2015.
- [8] Andes, "Accidente minero en Ecuador deja un muerto y un herido", 2016 [Online]. Available: <https://www.andes.info.ec/es/noticias/actualidad/1/51242/accidente-minero-ecuador-deja-muerto-herido>. [Accessed: 30- Jan- 2018].
- [9] El Universo, "Un minero falleció y otros dos quedaron heridos en Zaruma", 2017 [Online]. Available: <https://www.eluniverso.com/noticias/2017/12/20/nota/6534541/minero-fallecio-otros-dos-quedaron-heridos-zaruma>. [Accessed: 30- Jan- 2018].
- [10] P. Delogne, "Basic mechanisms of tunnel propagation", Radio Science, vol. 11, no. 4, pp. 295-303, 1976..
- [11] C. Zhou, T. Plass, R. Jacksha and J. Waynert, "RF Propagation in Mines and Tunnels: Extensive measurements for vertically, horizontally, and cross-polarized

signals in mines and tunnels." IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 57, no. 4, pp. 88-102, 2015.

[12] C. Nerguizian, C. Despins, S. Affes and M. Djadel, "Radio-channel characterization of an underground mine at 2.4 GHz", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 4, no. 5, pp. 2441-2453, 2005.

[13] M. Boutin, A. Benzakour, C. Despins and S. Affes, "Radio Wave Characterization and Modeling in Underground Mine Tunnels", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 2, pp. 540-549, 2008.

[14] Ministerio de Minería, "Reglamento de Seguridad Minera", Quito, 2009.

[15] A. Emslie, R. Lagace and P. Strong, "Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 23, no. 2, pp. 192-205, 1975.

[16] L. Bandyopadhyay, S. Chaulya and P. Mishra, Wireless communication in underground mines. New York: Springer, 2014, p. 153.

[17] J. Dabin, A. Haimovich and H. Grebel, "A statistical ultra-wideband indoor channel model and the effects of antenna directivity on path loss and multipath propagation", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, no. 4, p. 753, 2006.

[18] "Z-stack Link Quality Indicator (ZigBee)", E2e.ti.com. [Online]. Available: https://e2e.ti.com/support/wireless_connectivity/w/design_notes/z-stack-link-quality-indicator-zigbee [Accessed: 16- Feb- 2018].

[19] XCTU: Configuration and Test Utility Software - User Guide. United States: Digi International Inc., 2017 [Online]. Available: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/90001458-13/default.htm>. [Accessed: 16- Feb- 2018].

[20] A. Kumar and S. Gupta, "Study on ZIGBEE Technology", Ijesrt.com, 2013. [Online]. Available: <http://www.ijesrt.com/issues%20pdf%20file/Archives%202013/Oct-2013/18.pdf>. [Accessed: 21- Jan- 2018].

[21] J. Martín Moreno and D. Ruiz Fernández, "Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4)", España, 2007 [Online]. Available: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/7/Informe_ZigBee.pdf. [Accessed: 16- Feb- 2018].

- [22] XBee/XBee-PRO ZigBee RF Modules User Guide. United States: Digi International, 2017 [Online]. Available: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>. [Accessed: 17- Feb- 2018].
- [23] V. Mayalarp, N. Limpaswadpaisarn, T. Poombansao and S. Kittipiyakul, "Wireless Mesh Networking with XBee", 2010 [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Somsak_Kittipiyakul/publication/228621105_Wireless_mesh_networking_with_XBee/links/54374890cf2bf1f1f2d49fb.pdf. [Accessed: 17- Feb- 2018].
- [24] T. Sarkar, Zhong Ji, Kyungjung Kim, A. Medouri and M. Salazar-Palma, "A survey of various propagation models for mobile communication", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 45, no. 3, pp. 51-82, 2003.

ANEXOS

ANEXO 1

REGLAMENTO DE SEGURIDAD MINERA

- CAPÍTULO III

DE LOS DERECHOS Y OBLIGACIONES RESPECTO DE LA SEGURIDAD MINERA.

Art. 9.- Son obligaciones de los titulares de derechos mineros:

a) Preservar la salud y vida de su personal técnico y de trabajadores;

...

j) Proporcionar gratuitamente a sus trabajadores, previa determinación de las reales necesidades, de elementos de protección personal contra eventuales accidentes de trabajo que les permitan desarrollar sus labores en forma segura tales como cascos, gafas, linternas, protectores auditivos, mascarillas filtrantes, guantes, calzado de seguridad, cinturones de seguridad, implementos últimos estos que deberán ser utilizados cuando los trabajadores realcen trabajos en altura, etc.

- CAPÍTULO VII

DEL EMPLEO DE EXPLOSIVOS EN LA ACTIVIDAD MINERA

Art. 45.- Vigilancia durante la voladura. - ... El vigía, previo al encendido recorrerá los correspondientes lugares de trabajos de la mina alertando el personal sobre el próximo disparo y prohibiendo el acceso al lugar de voladura.

Art. 52.- Gases tóxicos. - Los gases tóxicos, especialmente el dióxido de carbono, el monóxido de carbono que se encuentre en el interior de las minas, no deberá exceder del 0.5% y 0.1%, respectivamente.

Art. 55.- Bolsas de gases. - En aquellas minas en las que se constate la presencia de bolsas de gases, las galerías deberán disponer de equipos de detección de gases y atmósferas explosivas. En dichas áreas se utilizarán herramientas, lámparas, etc.


- CAPÍTULO XIII

DE LAS ACTIVIDADES MINERAS SUBTERRÁNEAS

Art. 104.- Comunicación con la superficie. - En toda mina en explotación deben existir, por lo menos, dos labores o vías de comunicación con la superficie, de manera que la interrupción de una de ellas, no afecte el tránsito o la circulación por la otra. Las labores de comunicación con la superficie deberán mantenerse siempre en buenas condiciones de conservación y salubridad y de fácil circulación para las personas, en casos de emergencia.

ANEXO 2

| DISPOSITIVO XBee | RANGO | POTENCIA DE CONSUMO | FRECUENCIA | ESTÁNDAR | POTENCIA Tx | TASA DE DATOS | ANTENA |
|---|--------|---------------------|------------|----------|-------------|---------------|-------------------|
|  <p><u>XBee 1mW Chip Antenna - Series 1</u></p> | 300 Ft | 50mA @ 3.3v | 2.4GHz | 802.15.4 | 1mW | 250kbp/s | Chip |
|  <p><u>XBee 1mW U.FL Connection - Series 1</u></p> | 300 Ft | 50mA @ 3.3v | 2.4GHz | 802.15.4 | 1mW | 250kbp/s | Ext./Not Included |
|  <p><u>XBee 1mW Wire Antenna - Series 1</u></p> | 300 Ft | 50mA @ 3.3v | 2.4GHz | 802.15.4 | 1mW | 250kbp/s | Wire |
|  <p><u>XBee 1mW Trace Antenna - Series 1</u></p> | 300 Ft | 50mA @ 3.3v | 2.4GHz | 802.15.4 | 1mW | 250kbp/s | PCB |

| | | | | | | | |
|--|--------|--------------|--------|-------------|------|---------|-------------------|
|  <p><u>XBee 2mW PCB Antenna - Series 2</u></p> | 400 Ft | 40mA @ 3.3v | 2.4GHz | ZigBee Mesh | 2mW | 250kpbs | PCB |
|  <p><u>XBee 2mW RPSMA - Series 2</u></p> | 400 Ft | 40mA @ 3.3v | 2.4GHz | ZigBee Mesh | 2mW | 250kpbs | Ext./Not Included |
|  <p><u>XBee 2mW U.FL Connection - Series 2</u></p> | 400 Ft | 40mA @ 3.3v | 2.4GHz | ZigBee Mesh | 2mW | 250kpbs | Ext./Not Included |
|  <p><u>XBee 2mW Wire Antenna - Series 2</u></p> | 400 Ft | 40mA @ 3.3v | 2.4GHz | ZigBee Mesh | 2mW | 250kpbs | Wire |
|  <p><u>XBee Pro 63mW PCB Antenna - Series 2B</u></p> | 1 Mile | 295mA @ 3.3v | 2.4GHz | ZigBee Mesh | 63mW | 250kpbs | PCB |

| | | | | | | | |
|---|--------|-----------------|------------|----------------|------|-------------|----------------------|
|  <p><u>XBee Pro 63mW RPSMA - Series 2B</u></p> | 1 Mile | 295mA @ 3.3v | 2.4GH z | ZigBee Mesh | 63mW | 250kbp s | Ext./Not Included |
|  <p><u>XBee Pro 50mW U.FL Connection - Series 2</u></p> | 1 Mile | 295mA @ 3.3v | 2.4GH z | ZigBee Mesh | 50mW | 250kbp s | Ext./Not Included |
|  <p><u>XBee Pro 63mW Wire Antenna - Series 2B</u></p> | 1 Mile | 295mA @ 3.3v | 2.4GH z | ZigBee Mesh | 63mW | 250kbp s | Wire |
|  <p><u>XBee Pro 60mW PCB Antenna - Series 1</u></p> | 1 Mile | 215mA @ 3.3v | 2.4GH z | 802.15. 4 | 60mW | 250kbp s | PCB |
|  <p><u>XBee Pro 60mW U.FL Connection - Series 1</u></p> | 1 Mile | 215mA @ 3.3v | 2.4GH z | 802.15. 4 | 60mW | 250kbp s | Ext./Not Included |

| | | | | | | | |
|--|----------|-----------------|------------|-----------------|-----------|-------------|----------------------|
|  <p><u>XBee Pro 60mW Wire Antenna - Series 1</u></p> | 1 Mile | 215mA @ 3.3v | 2.4GH z | 802.15. 4 | 60mW | 250kbp s | Wire |
|  <p><u>XBee Pro 900 RPSMA</u></p> | 6 Miles | 210mA @ 3.3v | 900M Hz | Multi- Point | 50mW | 156kbp s | Ext./Not Included |
|  <p><u>XBee Pro 900 U.FL Connection</u></p> | 6 Miles | 210mA @ 3.3v | 900M Hz | Multi- Point | 50mW | 156kbp s | Ext./Not Included |
|  <p><u>XBee Pro 900 Wire Antenna</u></p> | 6 Miles | 210mA @ 3.3v | 900M Hz | Multi- Point | 50mW | 156kbp s | Wire |
|  <p><u>XBee Pro 900 XSC RPSMA</u></p> | 15 Miles | 256mA @ 3.3v | 900M Hz | Multi- Point | 100m W | 9.6kbp s | Ext./Not Included |

| | | | | | | | |
|--|----------|--------------|---------|-------------|--------|---------------------|-------------------|
|  <u>XBee Pro 900 XSC U.FL</u> (retired) | 15 Miles | 256mA @ 3.3v | 900M Hz | Multi-Point | 100m W | 9.6kbp s | Ext./Not Included |
|  <u>XBee Pro 900 XSC Wire</u> (retired) | 15 Miles | 256mA @ 3.3v | 900M Hz | Multi-Point | 100m W | 9.6kbp s | Wire |
|  <u>XBee Pro 900 XSC S3B Wire</u> | 28 Miles | 215mA @ 3.3v | 900M Hz | Multi-Point | 250m W | 10 or 20 Kbps | Wire |
|  <u>XTend 900 1W RPSMA</u> | 40 Miles | 730mA @ 5v | 900M Hz | Multi-Point | 1W | 9,600 or 115,200bps | Ext./Not Included |

Tabla A2.1 Especificaciones de los dispositivos XBee
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

ANEXO 3

| DISTANCIA C-R (m) | RECEIVED STRENGTH SIGNAL INDICATOR (RSSI dBm) | | | | | | | | | | RSSIav (dBm) | |
|----------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------|-----|
| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Muestra 5 | Muestra 6 | Muestra 7 | Muestra 8 | Muestra 9 | Muestra 10 | | |
| 1 | -34 | -32 | -33 | -34 | -33 | -32 | -32 | -33 | -32 | -31 | -33 | -33 |
| 5 | -42 | -44 | -41 | -40 | -42 | -41 | -41 | -41 | -41 | -41 | -42 | -42 |
| 10 | -52 | -52 | -50 | -49 | -52 | -51 | -54 | -51 | -50 | -53 | -51 | -51 |
| 15 | -58 | -58 | -55 | -61 | -59 | -55 | -57 | -56 | -54 | -55 | -57 | -57 |
| 20 | -58 | -61 | -55 | -56 | -56 | -58 | -56 | -55 | -58 | -55 | -57 | -57 |
| 25 | -58 | -59 | -62 | -58 | -60 | -62 | -61 | -70 | -59 | -64 | -61 | -61 |
| 30 | -57 | -56 | -56 | -70 | -66 | -68 | -60 | -56 | -55 | -67 | -61 | -61 |
| 35 | -60 | -64 | -67 | -62 | -70 | -58 | -57 | -61 | -56 | -58 | -61 | -61 |
| 40 | -66 | -67 | -63 | -67 | -68 | -62 | -64 | -67 | -64 | -64 | -65 | -65 |
| 45 | -66 | -70 | -74 | -71 | -71 | -70 | -73 | -78 | -67 | -62 | -70 | -70 |
| 46 | -66 | -73 | -70 | -80 | -72 | -75 | -70 | -74 | -68 | -74 | -72 | -72 |
| 49 | -73 | -85 | -79 | -77 | -76 | -71 | -73 | -70 | -71 | -71 | -75 | -75 |
| 52 | -83 | -75 | -81 | -75 | -85 | -74 | -73 | -78 | -73 | -76 | -77 | -77 |
| 55 | -89 | -86 | -84 | -70 | -79 | -69 | -68 | -67 | -76 | -68 | -76 | -76 |
| 58 | -85 | -79 | -81 | -84 | -71 | -72 | -78 | -79 | -82 | -83 | -79 | -79 |
| 61 | -90 | -84 | -77 | -79 | -82 | -78 | -88 | -81 | -76 | -75 | -81 | -81 |
| 64 | -81 | -91 | -80 | -85 | -82 | -81 | -81 | -90 | -84 | -80 | -84 | -84 |
| 67 | -83 | -85 | -83 | -84 | -82 | -81 | -82 | -88 | -86 | -81 | -84 | -84 |
| 70 | -88 | -83 | -87 | -83 | -85 | -82 | -83 | -84 | -84 | -93 | -85 | -85 |
| 73 | -92 | -88 | -88 | -96 | -91 | -94 | -83 | -90 | -93 | -87 | -90 | -90 |
| 76 | -86 | -89 | -94 | -86 | -90 | -87 | -88 | -87 | -86 | -94 | -89 | -89 |
| 79 | -85 | -84 | -85 | -93 | -95 | -89 | -85 | -91 | -87 | -86 | -88 | -88 |
| 82 | -95 | -95 | -95 | -90 | -94 | -90 | -95 | -96 | -89 | -96 | -94 | -94 |
| 85 | -93 | -95 | -91 | -95 | -93 | -91 | -96 | -96 | -94 | -95 | -94 | -94 |
| 88 | -90 | -94 | -90 | -96 | -93 | -90 | -88 | -94 | -92 | -95 | -92 | -92 |
| 91 | -84 | -84 | -87 | -90 | -83 | -85 | -84 | -88 | -85 | -88 | -86 | -86 |
| 94 | -95 | -93 | -87 | -93 | -96 | -91 | -93 | -96 | -94 | -95 | -93 | -93 |

L O S

N L O S

Tabla A3.1 Recopilación de la potencia de recepción para los escenarios LOS y NLOS
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

1 metro – Muestra 5



Figura A3.1 Muestra 5 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 1 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

5 metros – Muestra 7

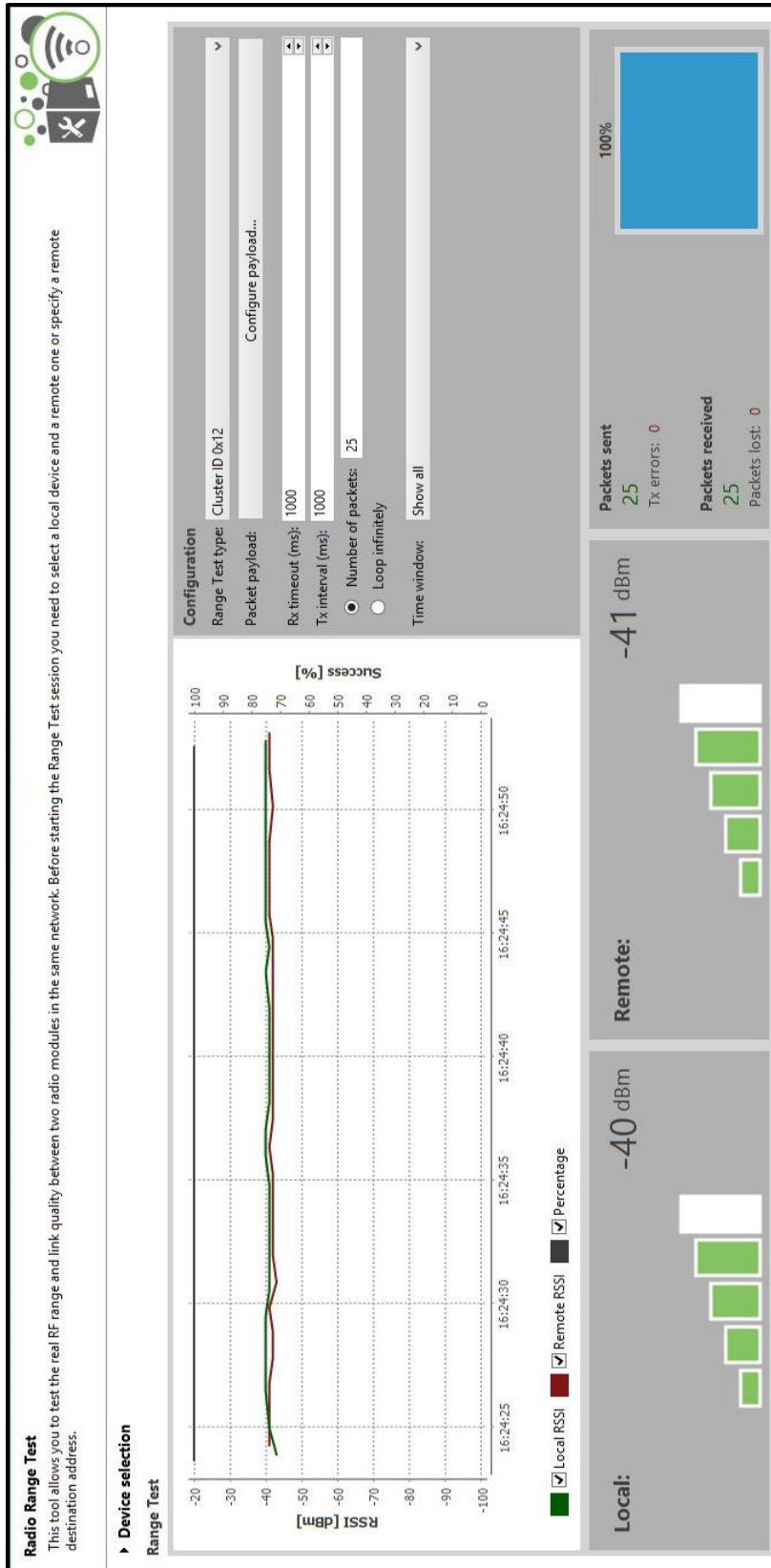


Figura A3.2 Muestra 7 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 5 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018

10 metros – Muestra 2

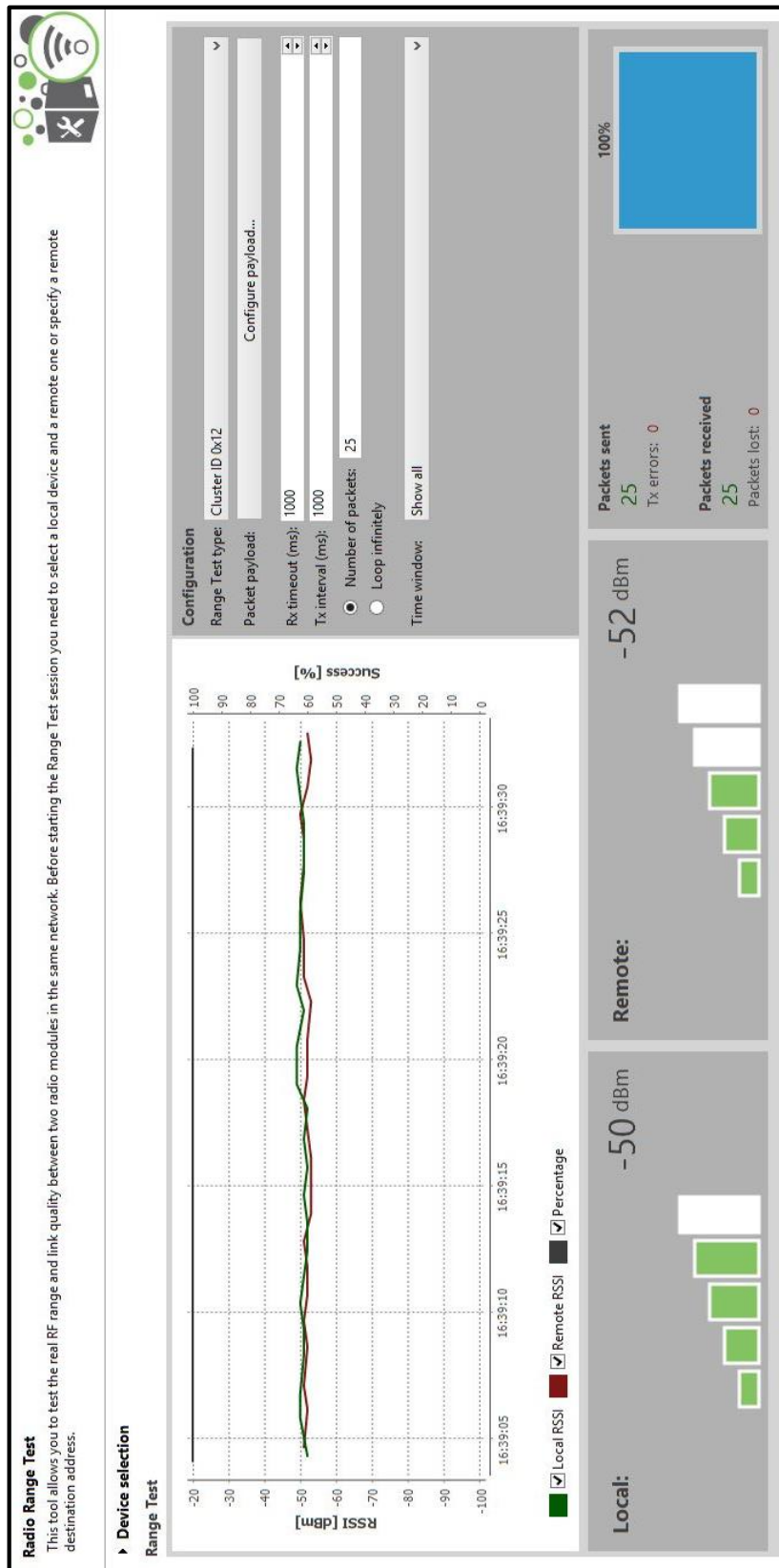


Figura A3.3 Muestra 2 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 10 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

15 metros – Muestra 9

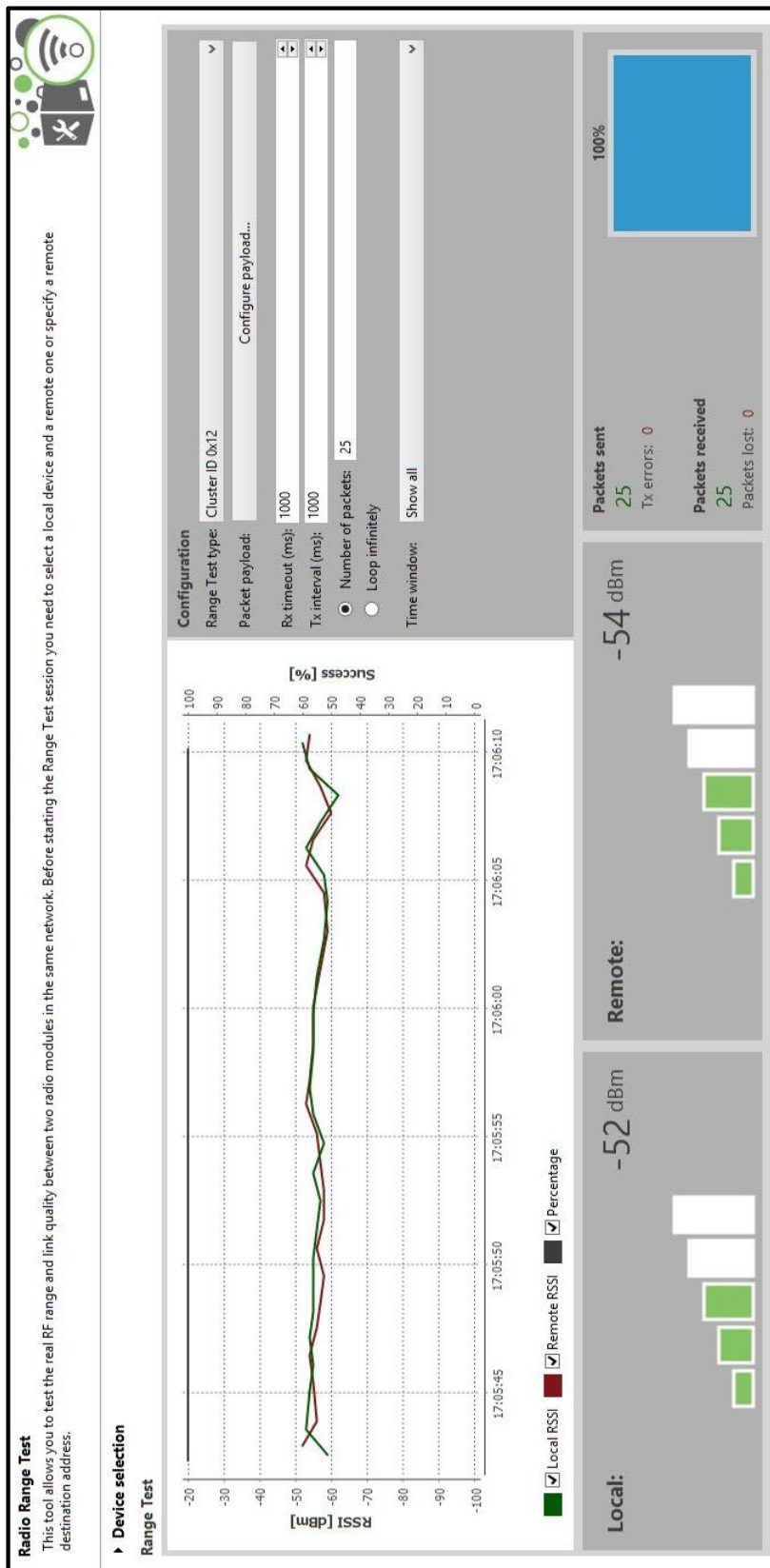


Figura A3.4 Muestra 9 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 15 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

20 metros – Muestra 3

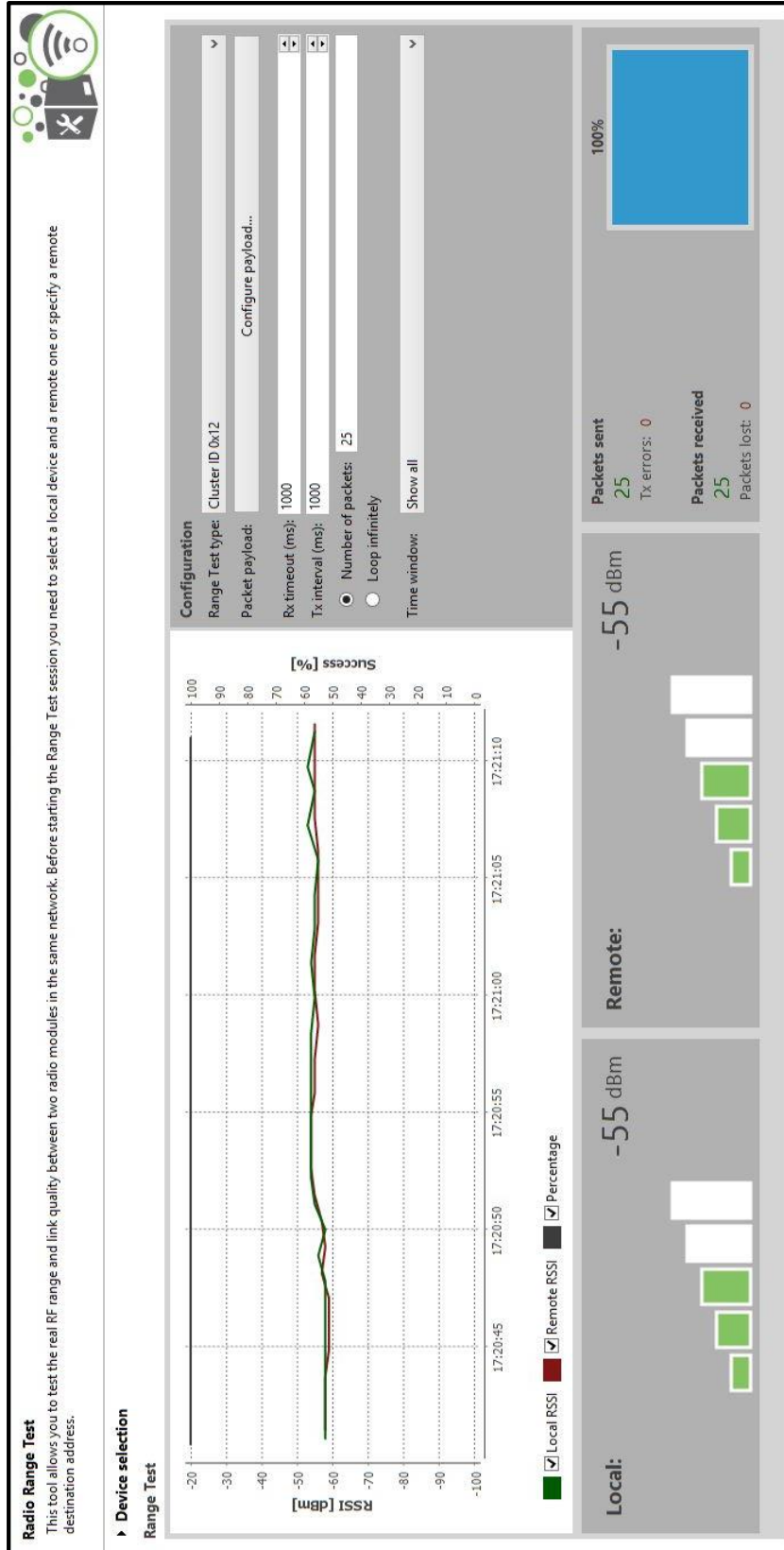


Figura A3.5 Muestra 3 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 20 m con respecto a ZC
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

25 metros – Muestra 8

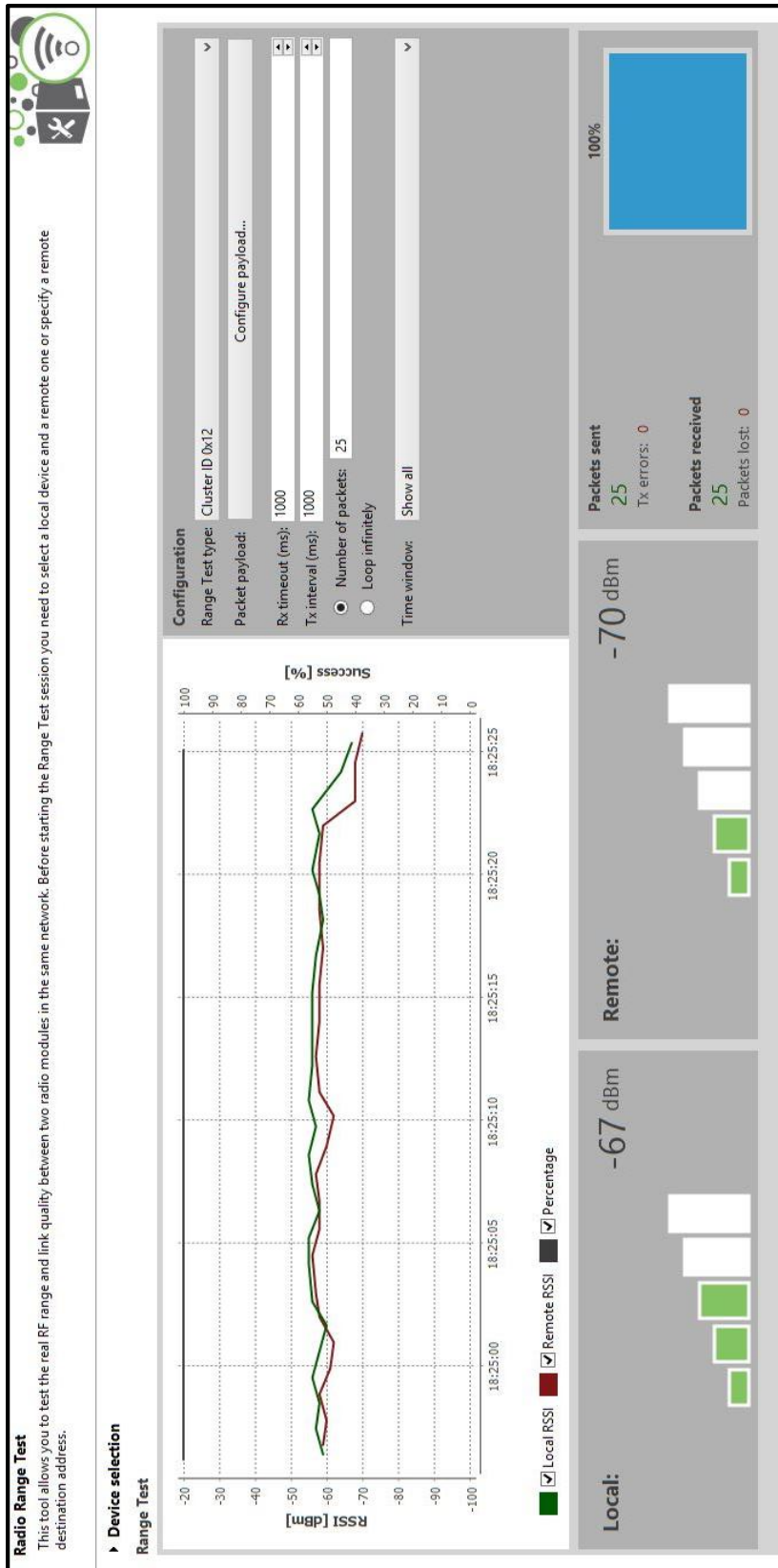


Figura A3.6 Muestra 8 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 25 m con respecto a ZC
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

30 metros – Muestra 1

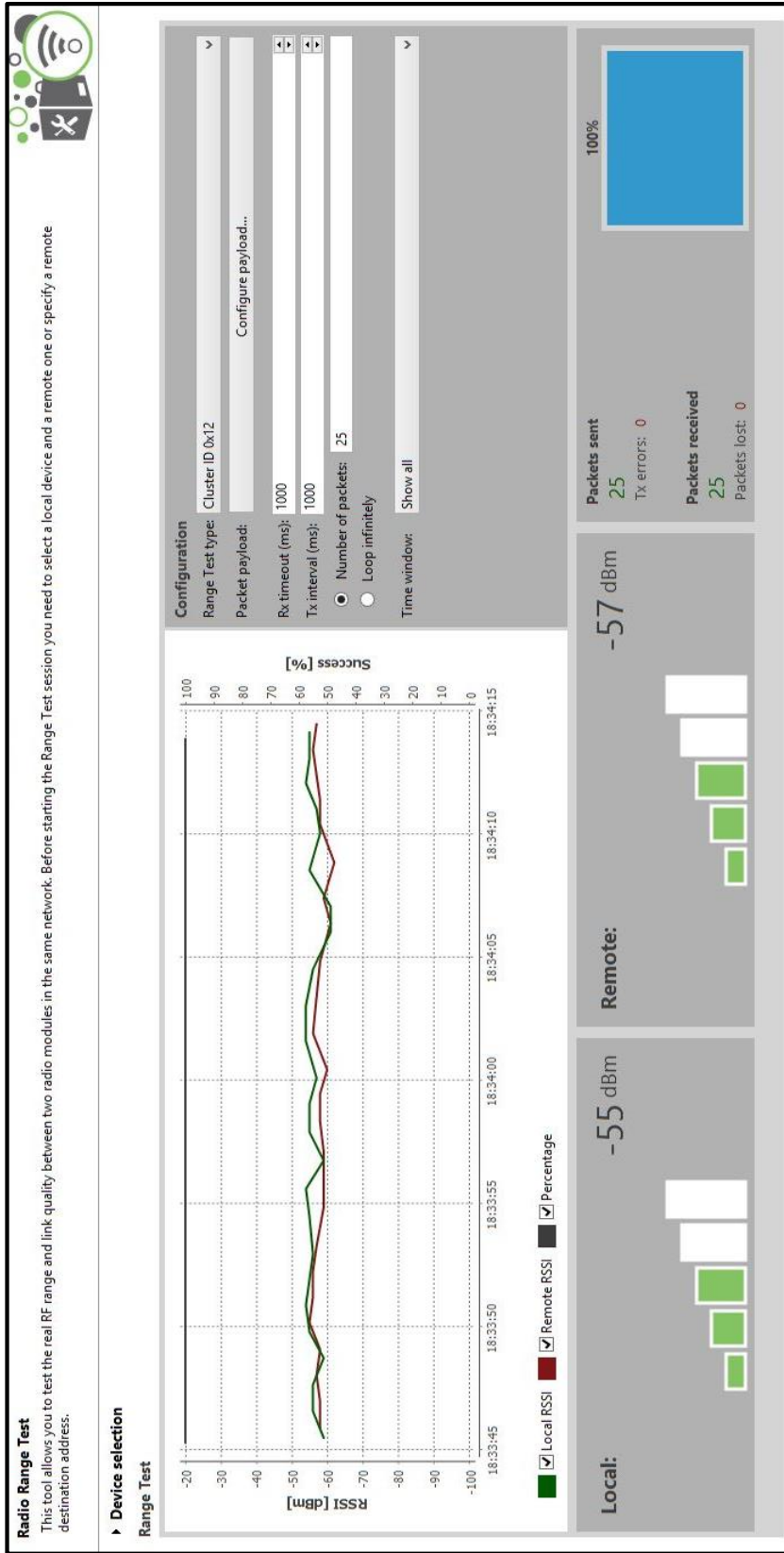


Figura A3.7 Muestra 1 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 30 m con respecto a ZC
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

35 metros – Muestra 10

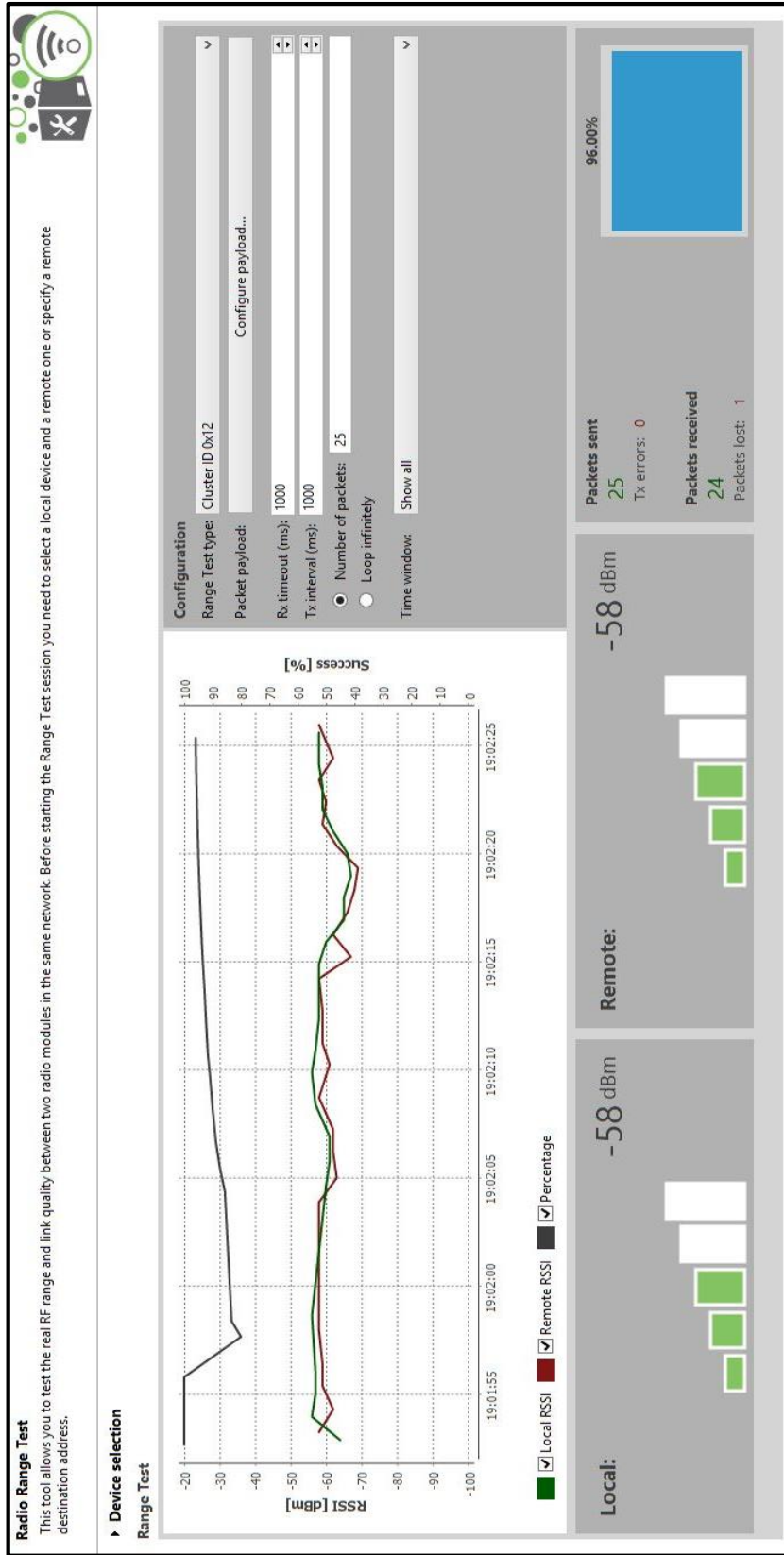


Figura A3.8 Muestra 10 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 35 m con respecto a ZC
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

40 metros – Muestra 6

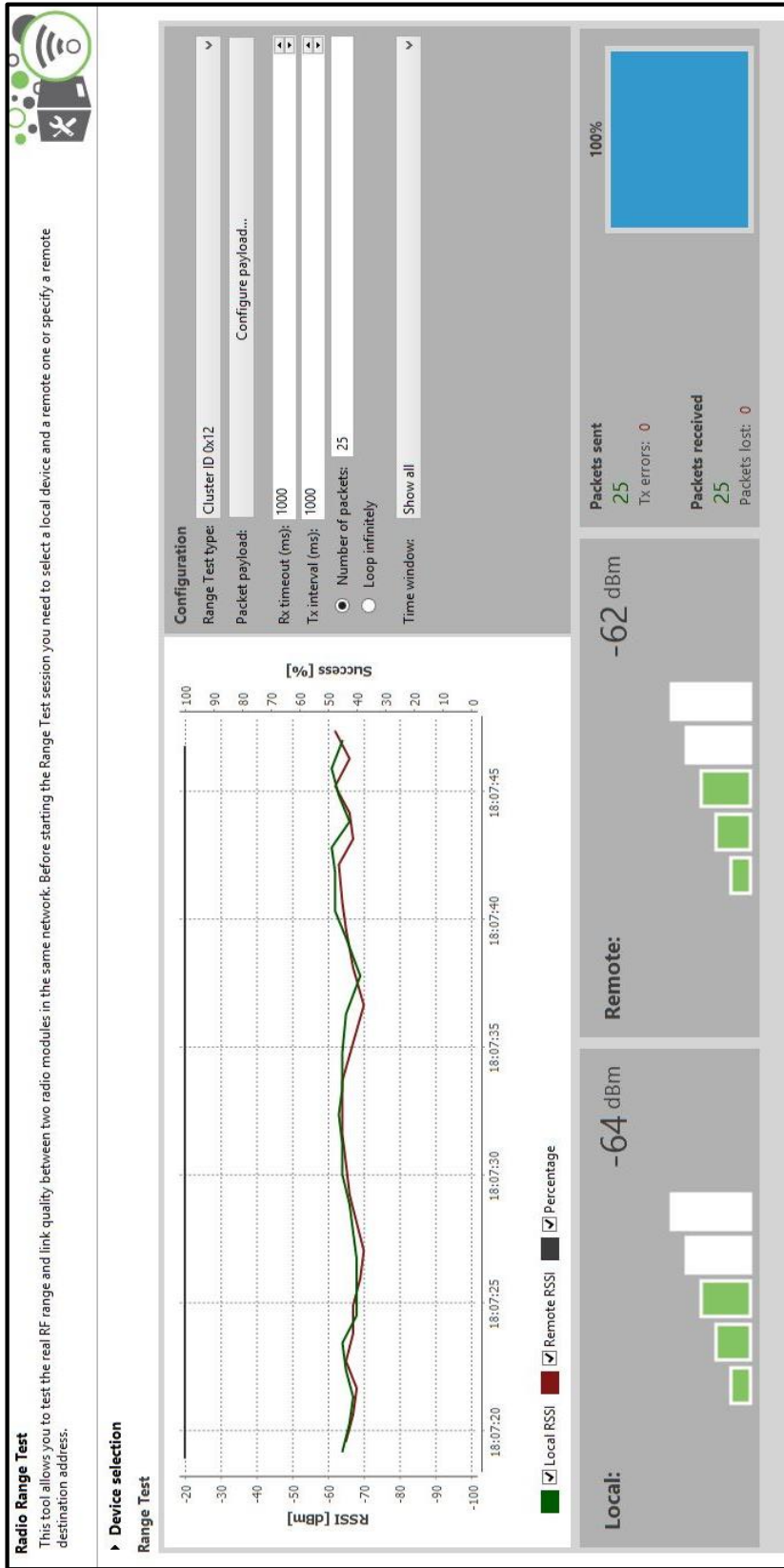


Figura A3.9 Muestra 6 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 40 m con respecto a ZC
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

45 metros – Muestra 3

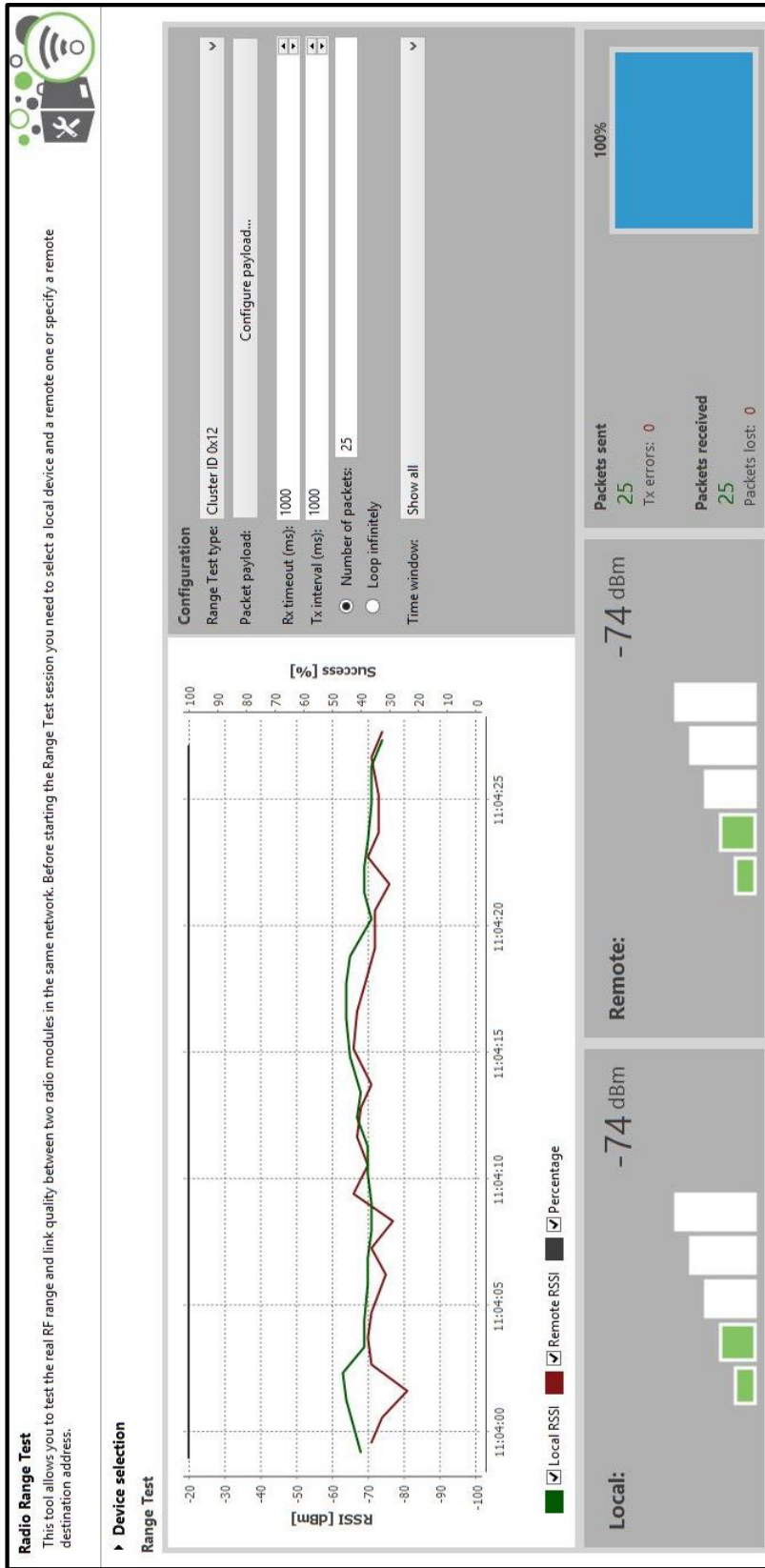


Figura A3.10 Muestra 3 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 45 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

46 metros – Muestra 7

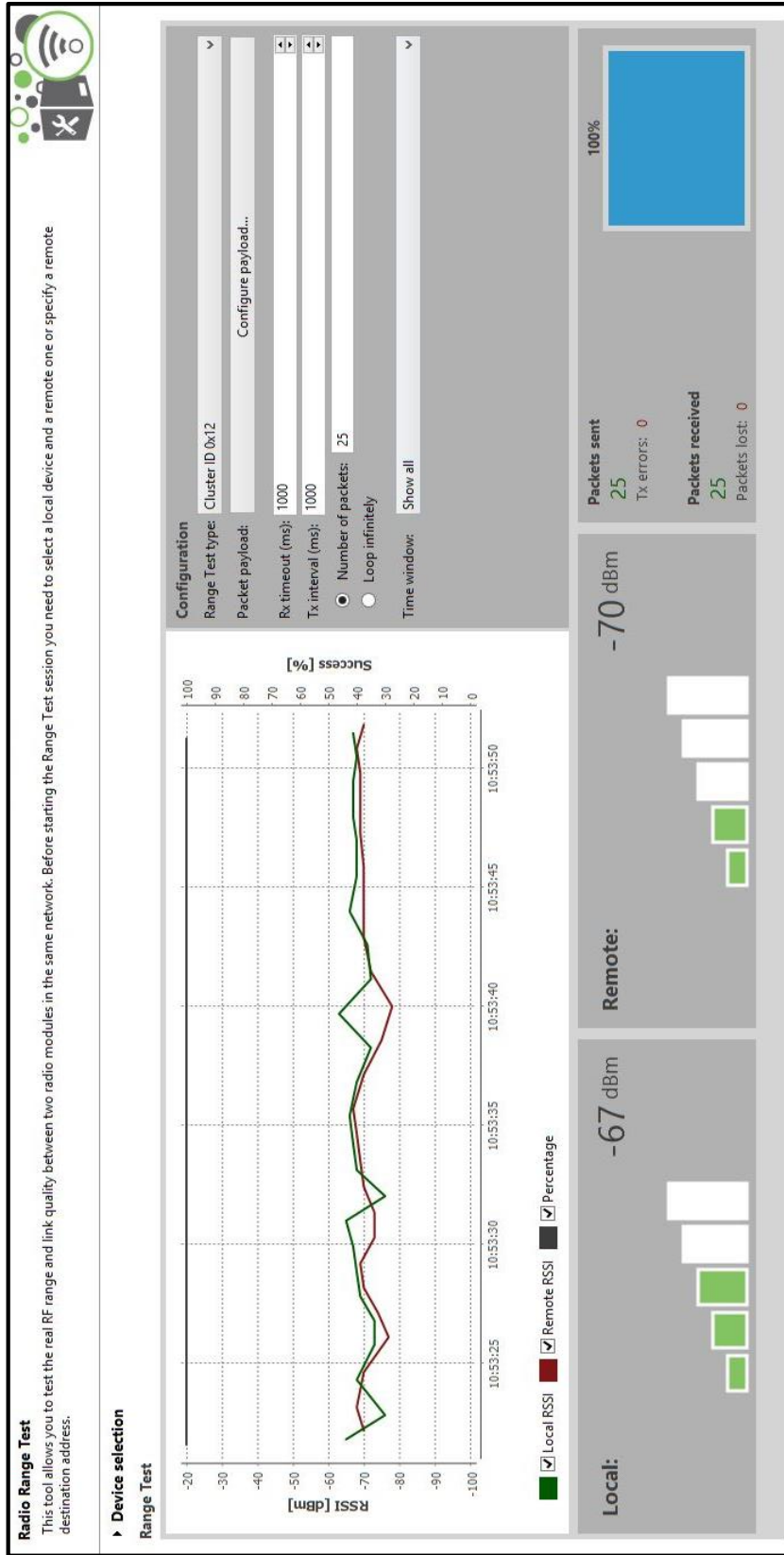


Figura A3.11 Muestra 7 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 46 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

49 metros – Muestra 2

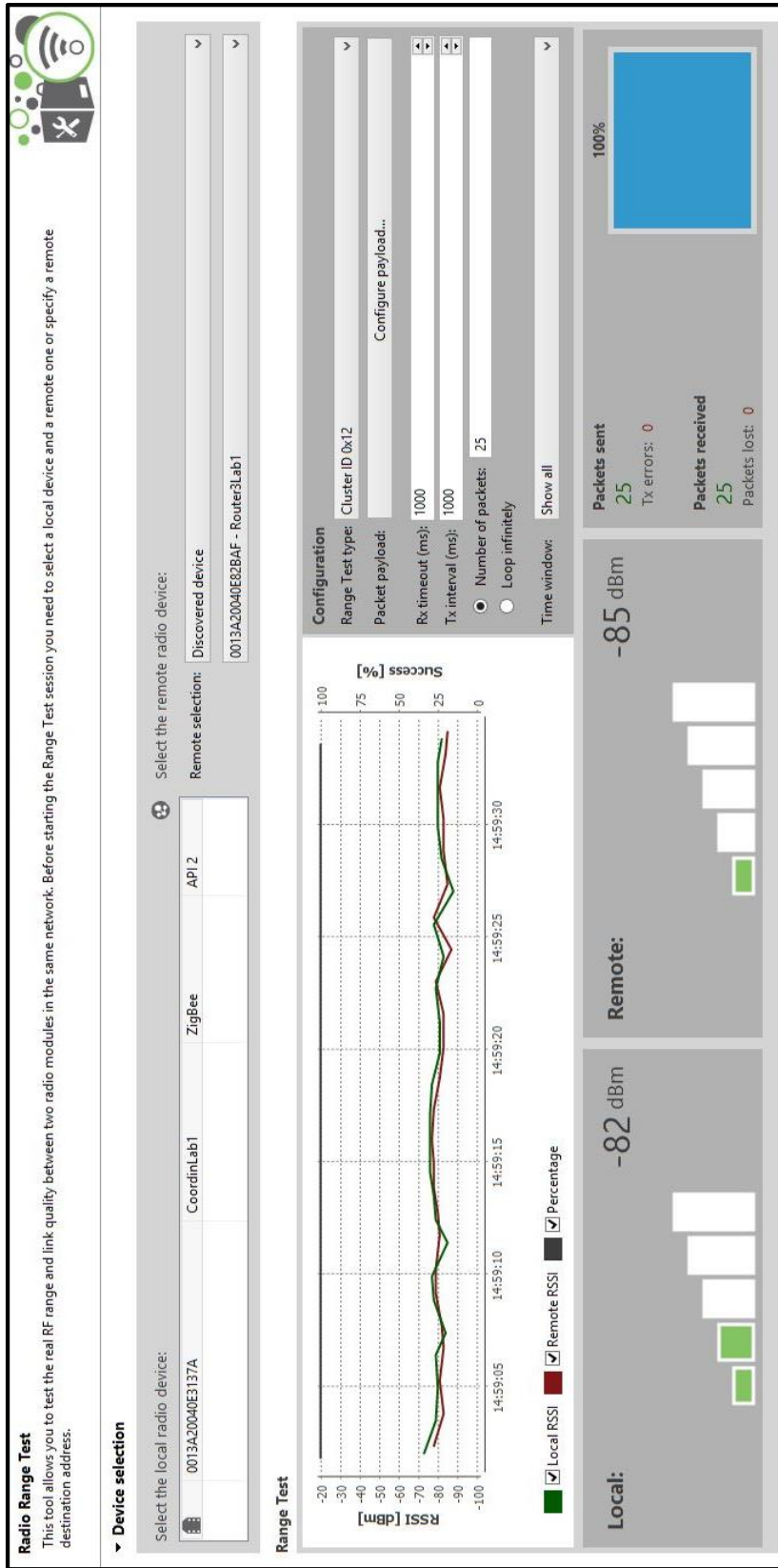


Figura A3.12 Muestra 2 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 49 m con respecto a ZC
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

52 metros – Muestra 8

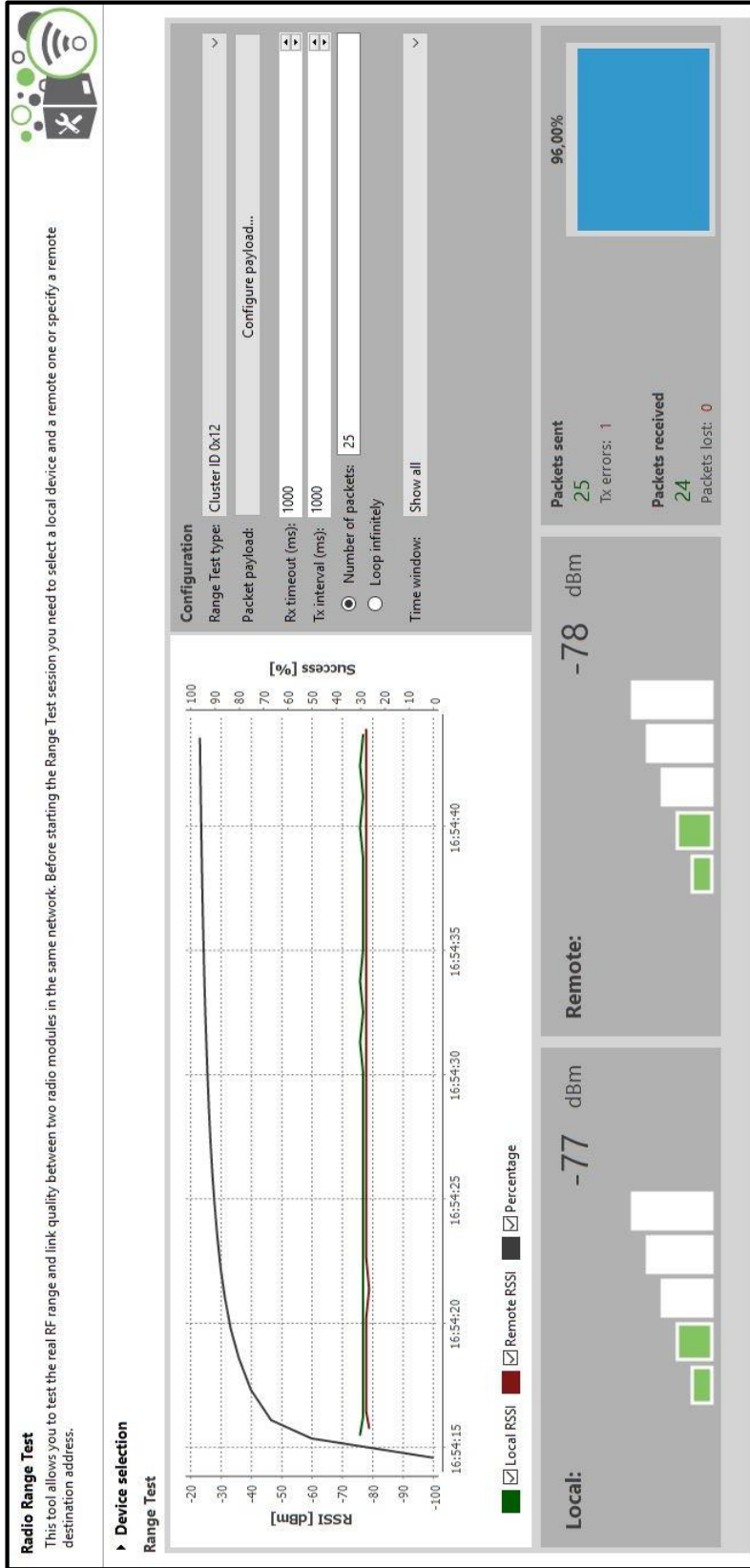


Figura A3.13 Muestra 8 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 52 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

55 metros – Muestra 2

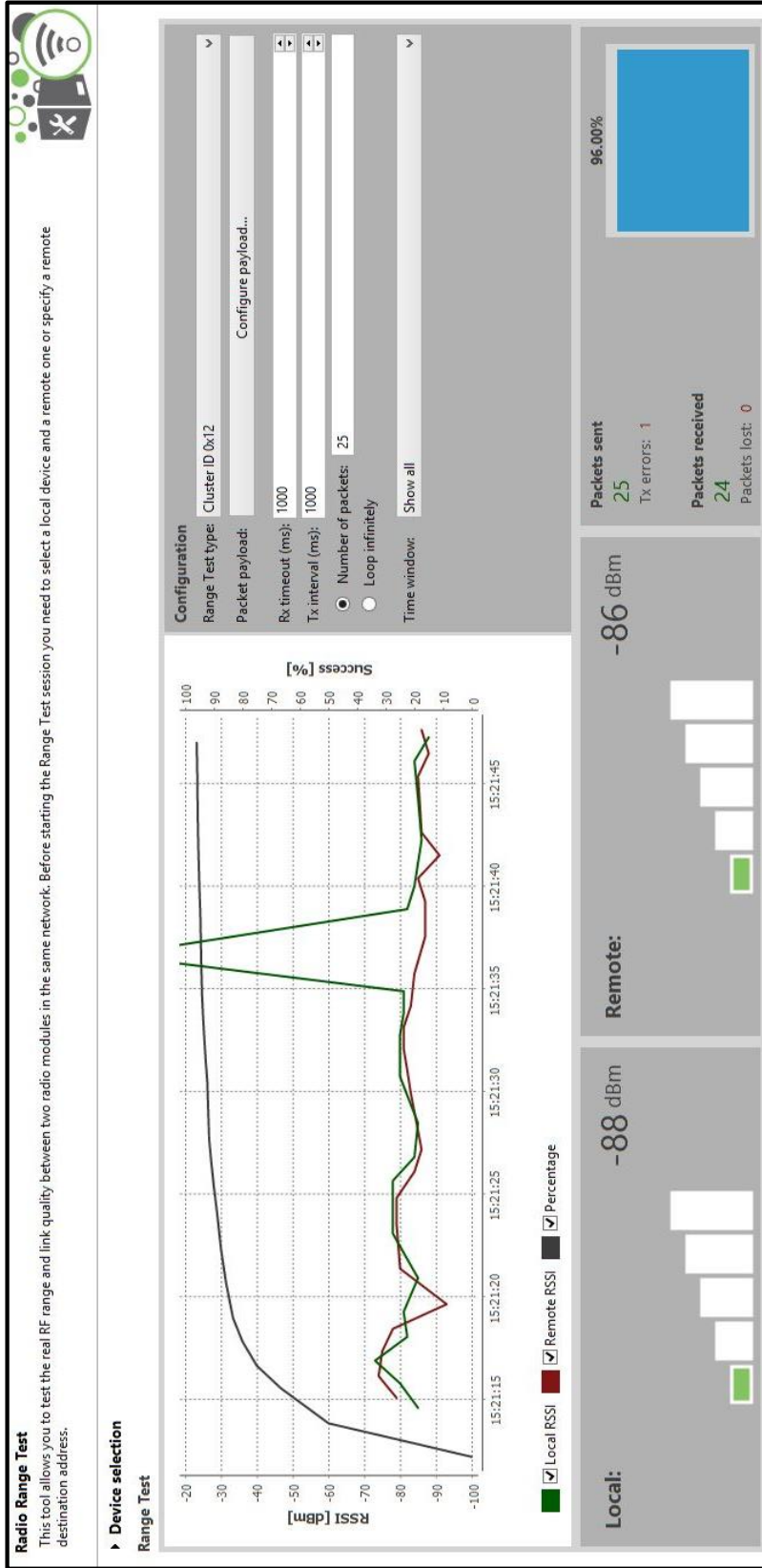


Figura A3.14 Muestra 2 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 55 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

58 metros – Muestra 10

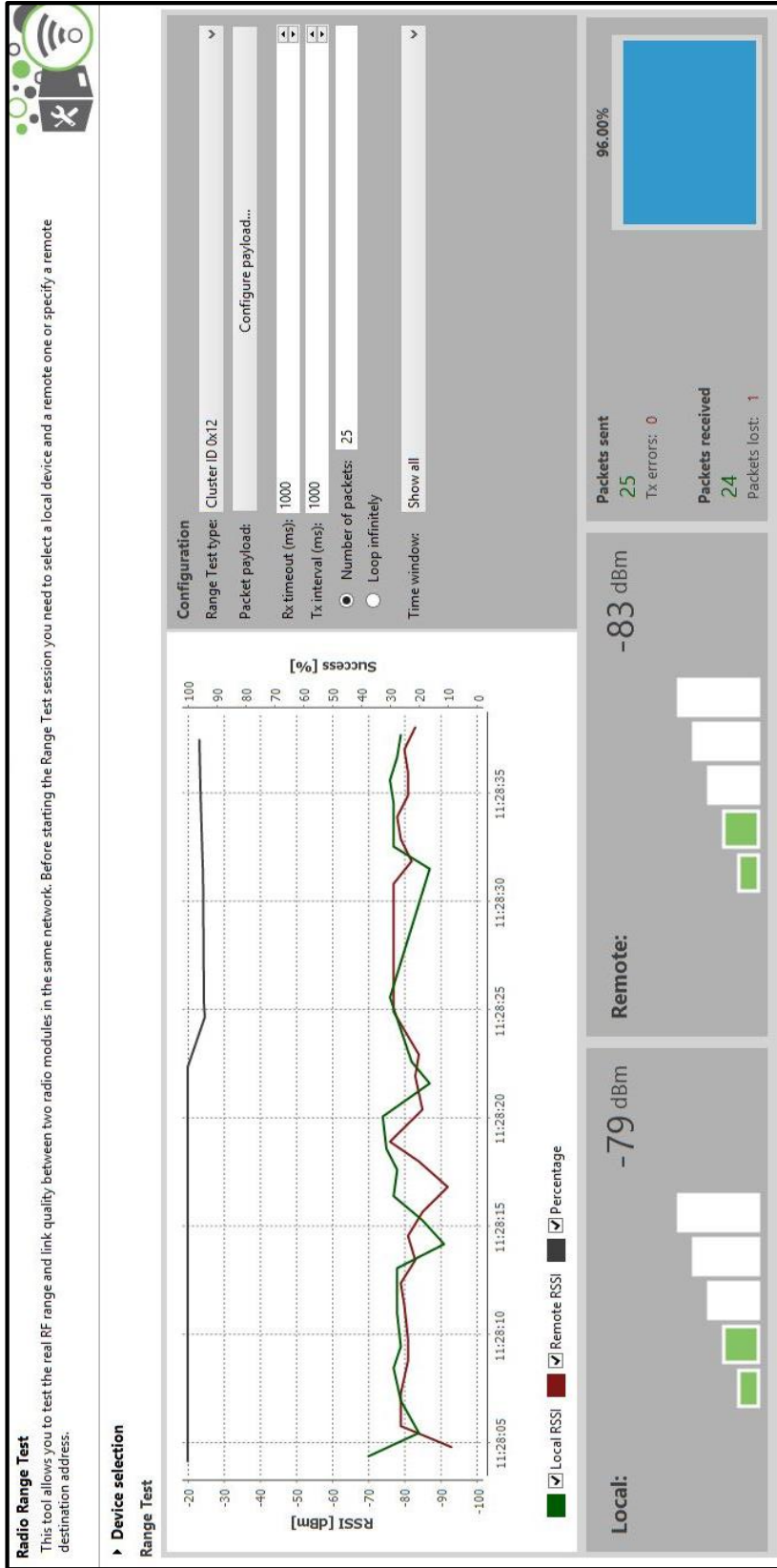


Figura A3.15 Muestra 10 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 58 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

61 metros – Muestra 7

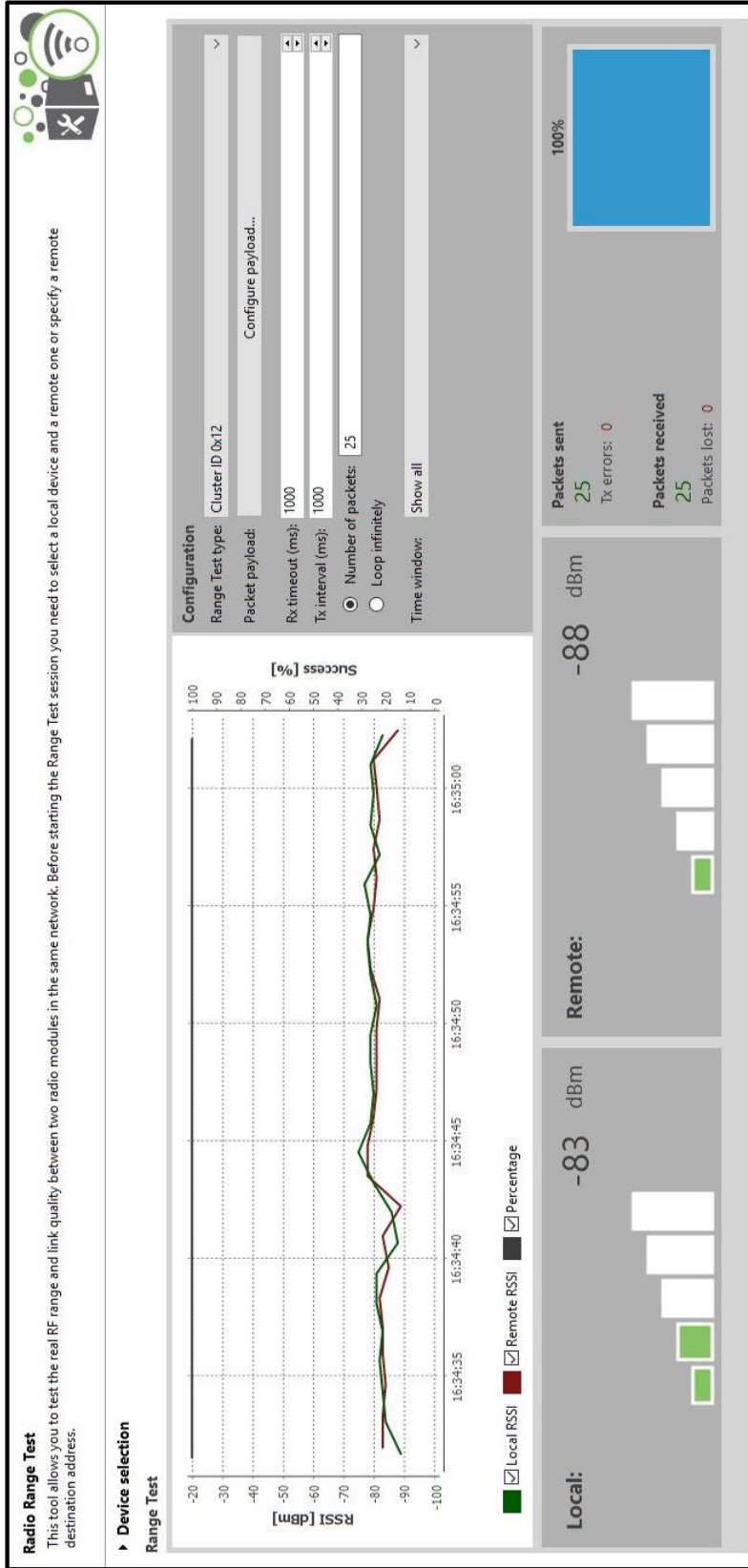


Figura A3.16 Muestra 7 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 61 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

64 metros – Muestra 4

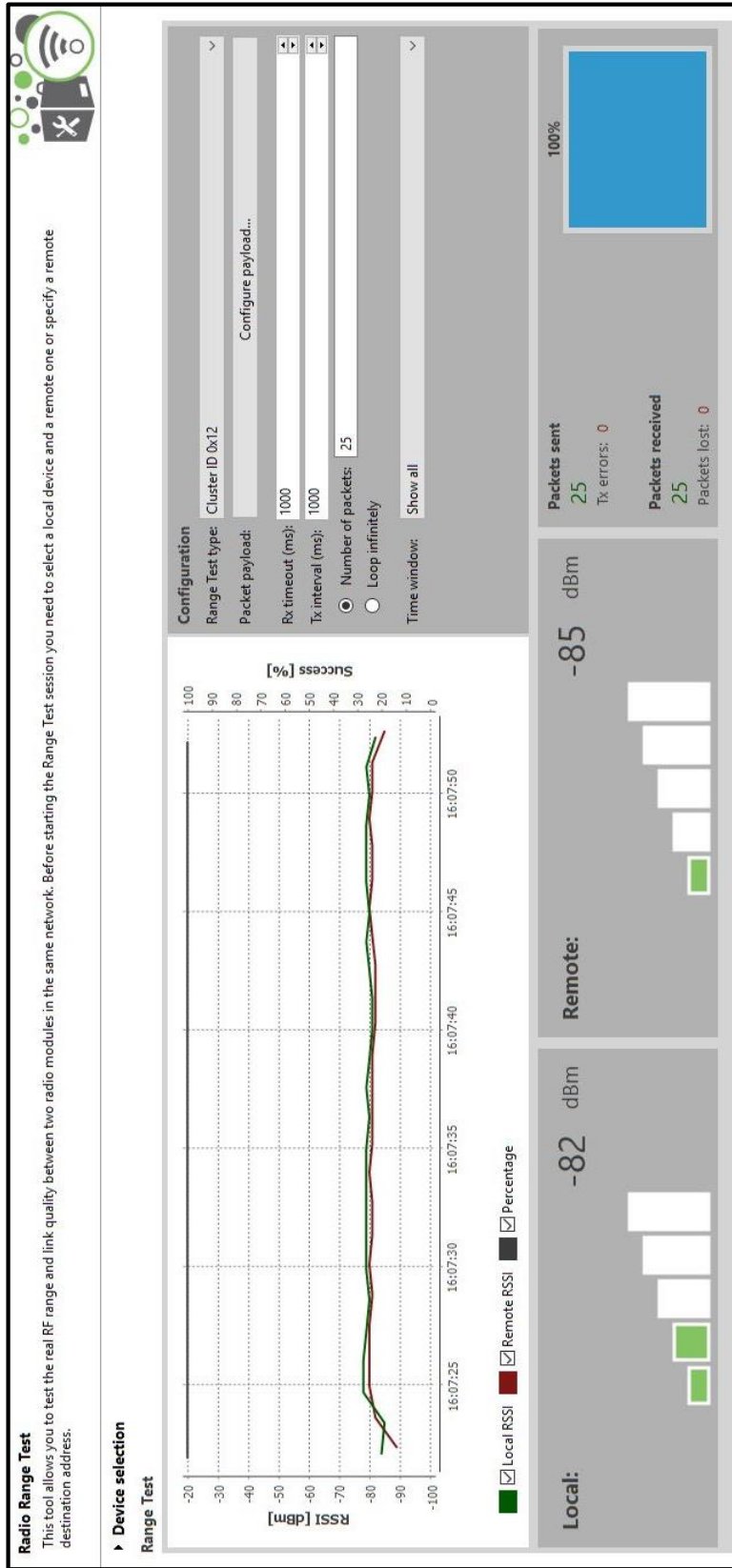


Figura A3.17 Muestra 4 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 64 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

67 metros – Muestra 1

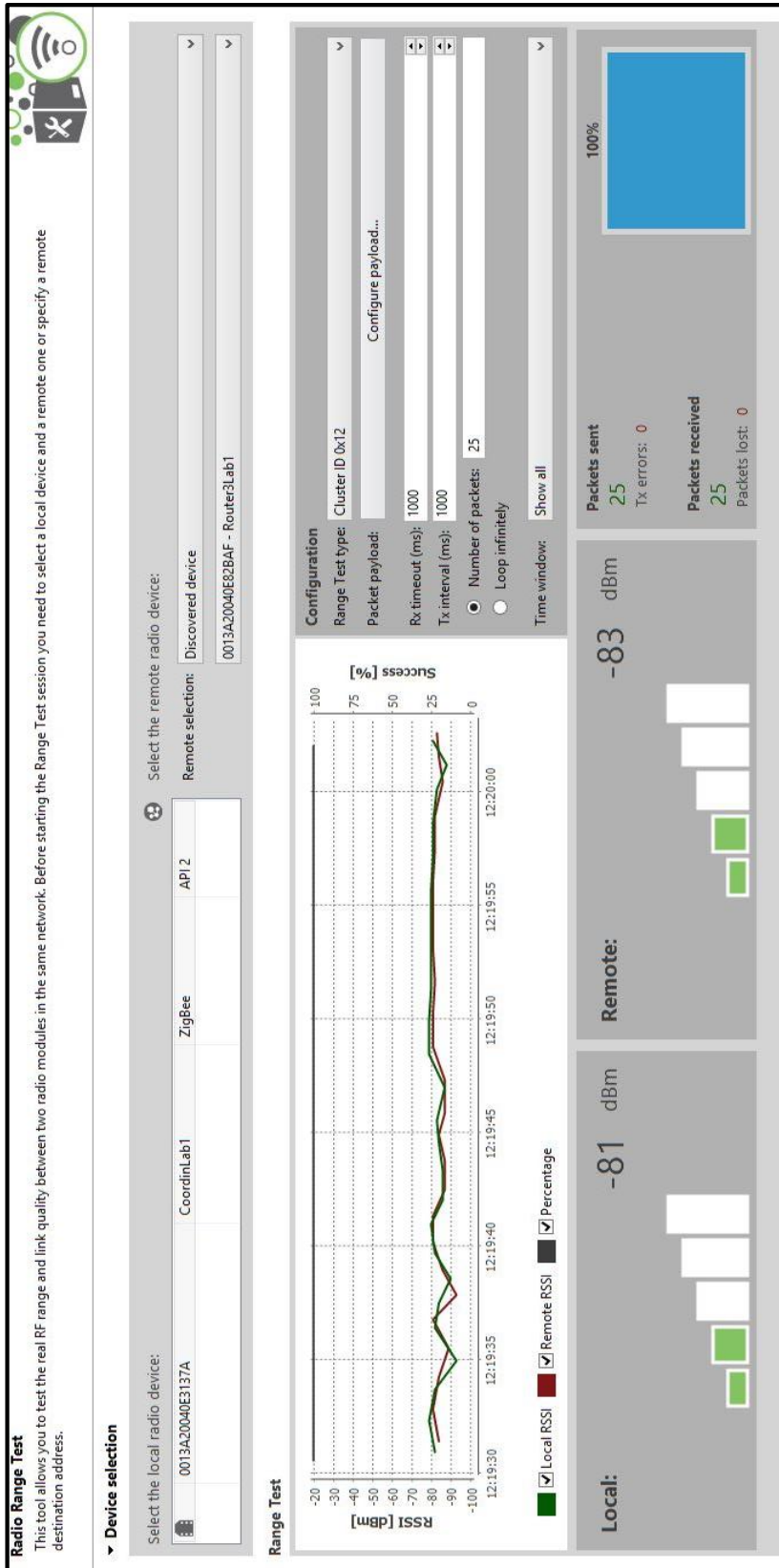


Figura A3.18 Muestra 1 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 67 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

70 metros – Muestra 5

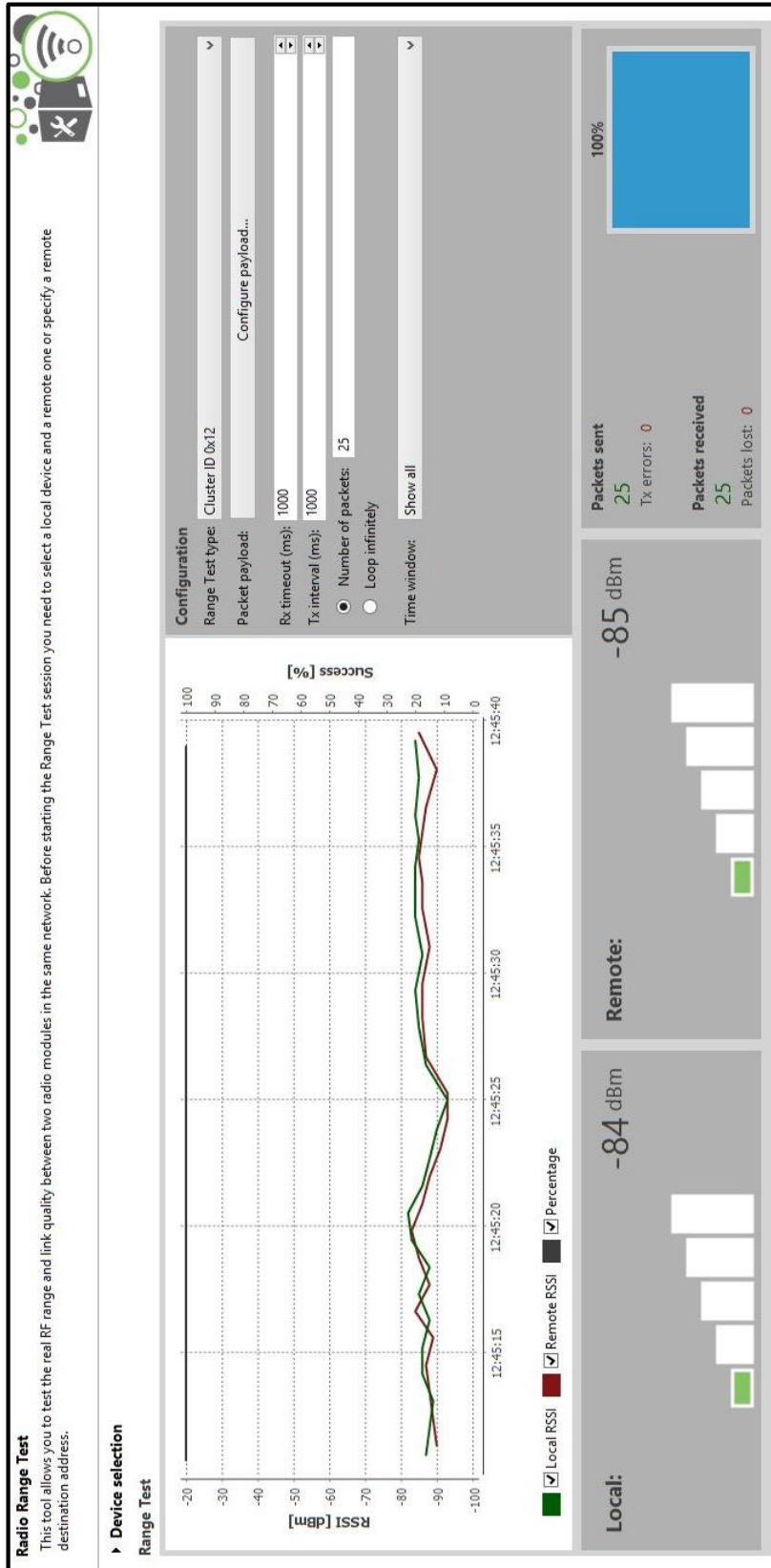


Figura A3.19 Muestra 5 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 70 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

73 metros – Muestra 9

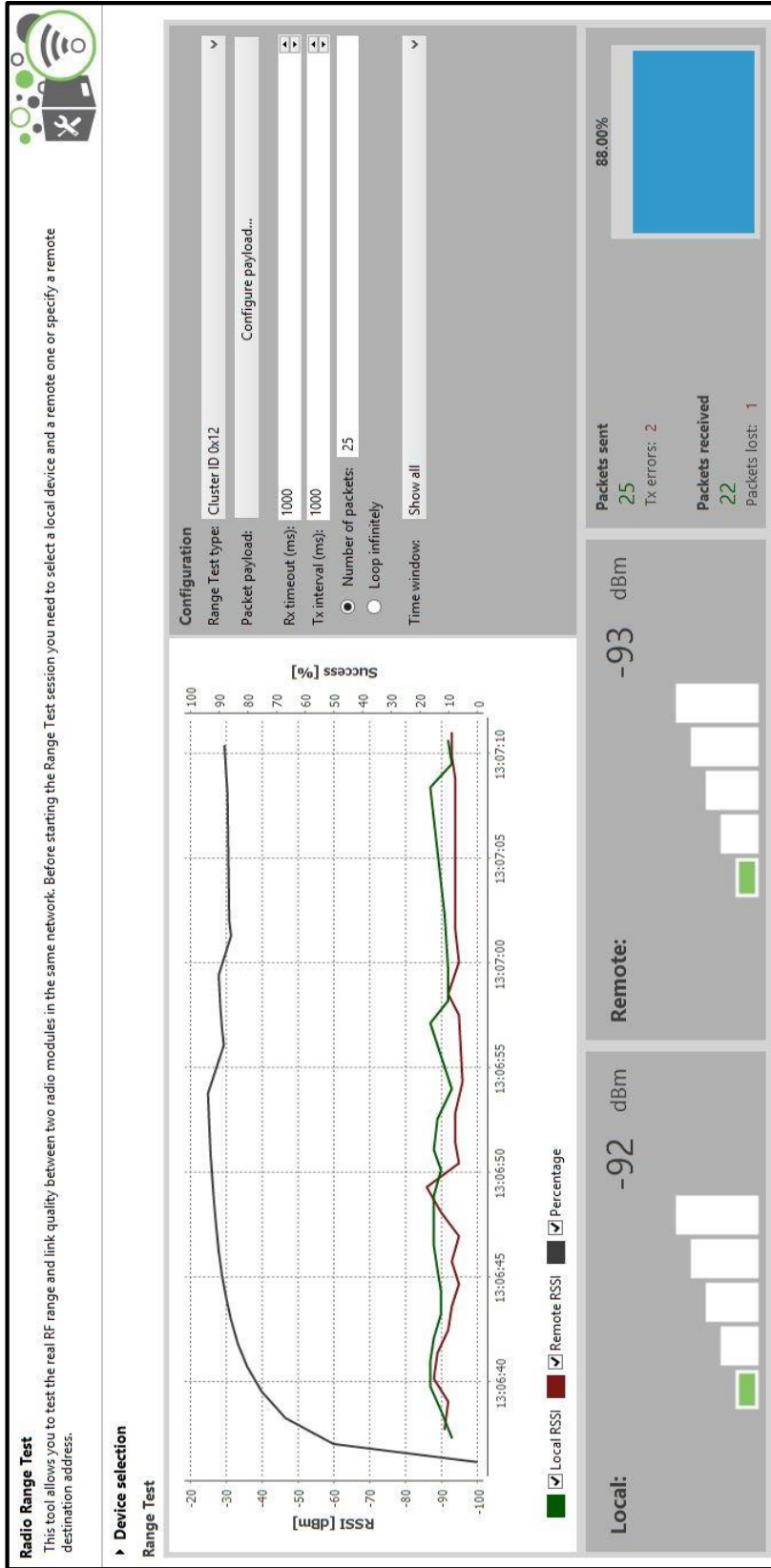


Figura A3.20 Muestra 9 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 73 m con respecto a ZC
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

76 metros – Muestra 7

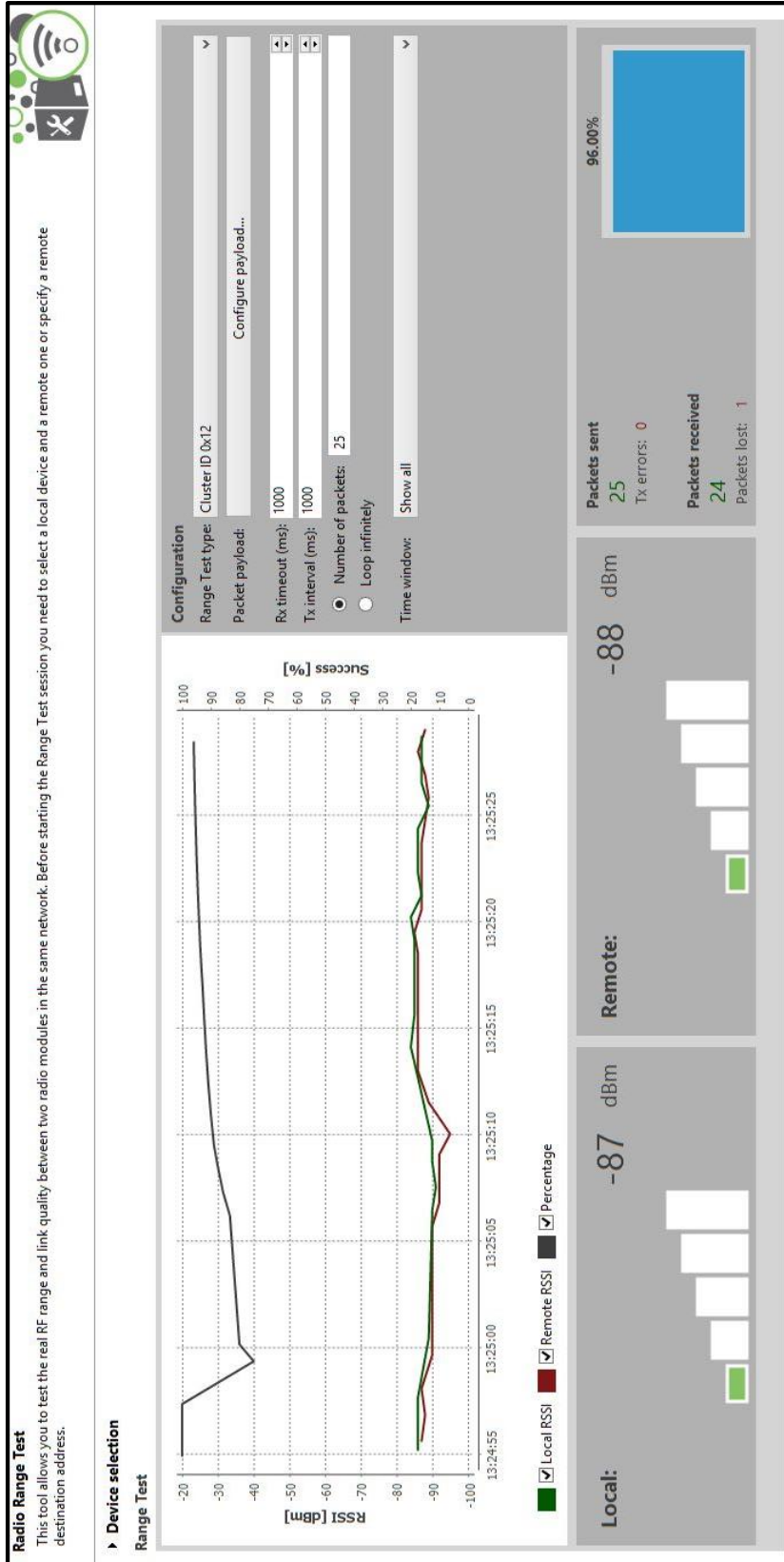


Figura A3.21 Muestra 7 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 76 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

79 metros – Muestra 2

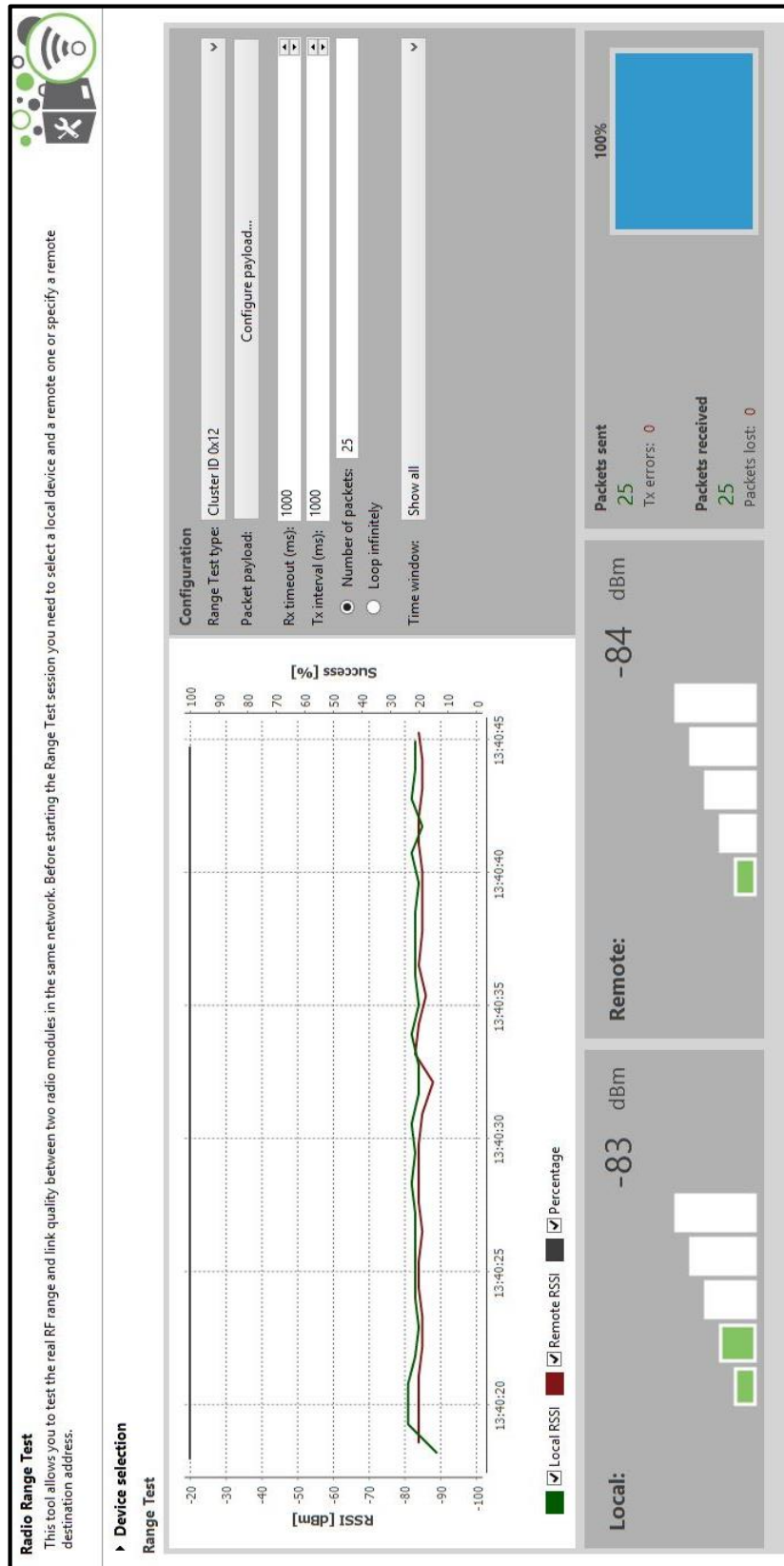


Figura A3.22 Muestra 2 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 79 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

82 metros – Muestra 8

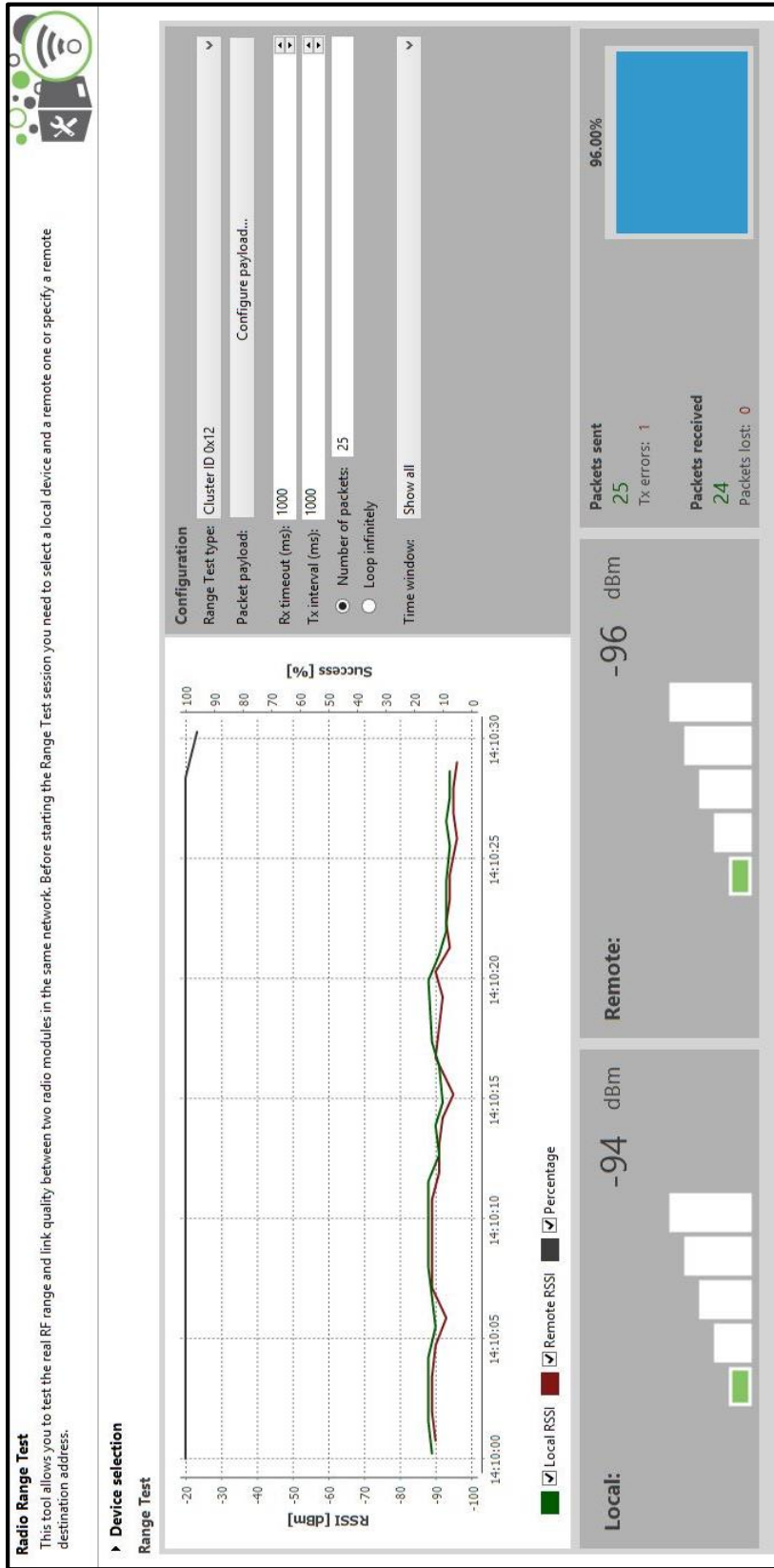


Figura A3.23 Muestra 8 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 82 m con respecto a ZC
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

85 metros – Muestra 10

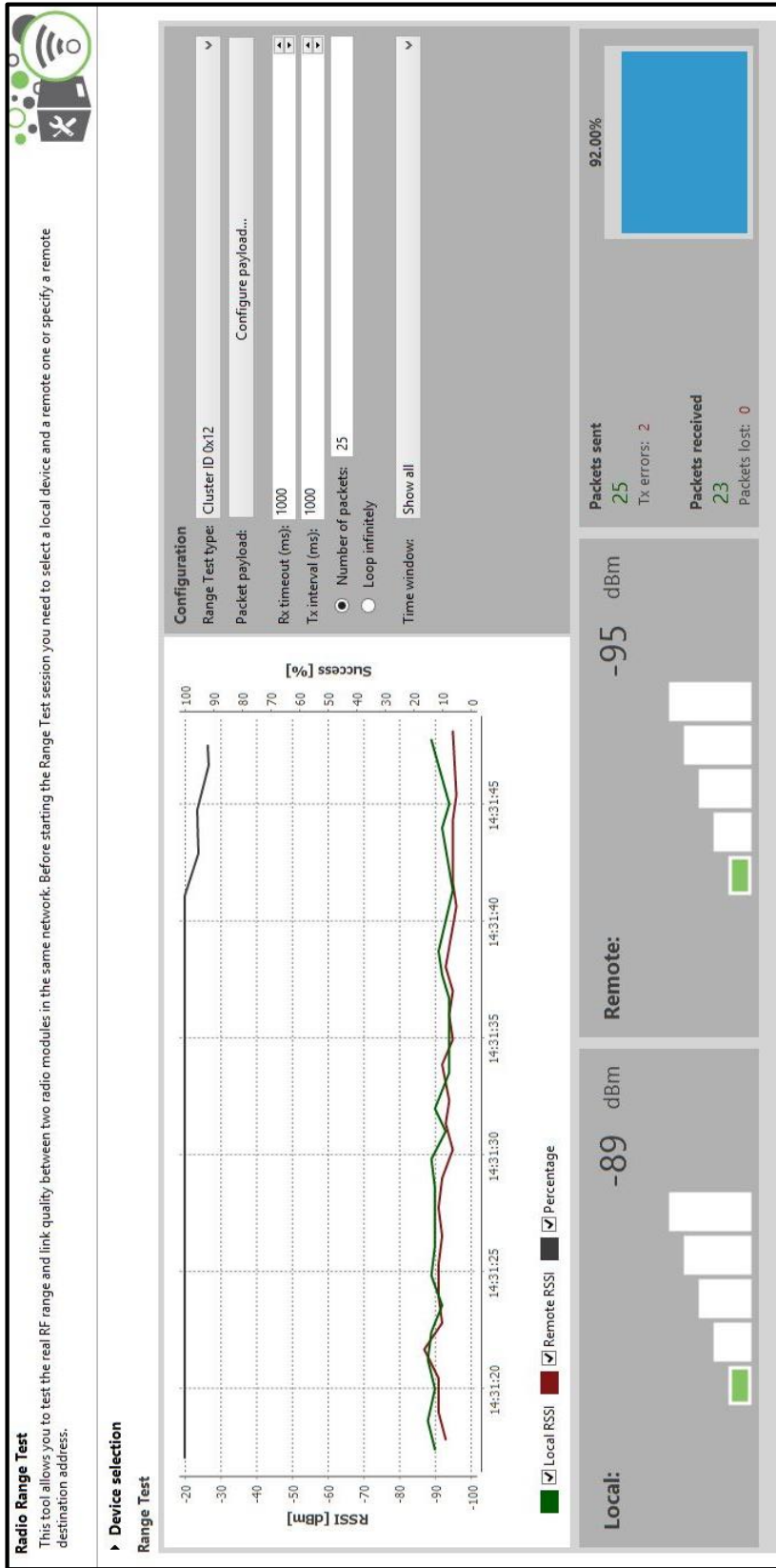


Figura A3.24 Muestra 10 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 85 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

88 metros – Muestra 6

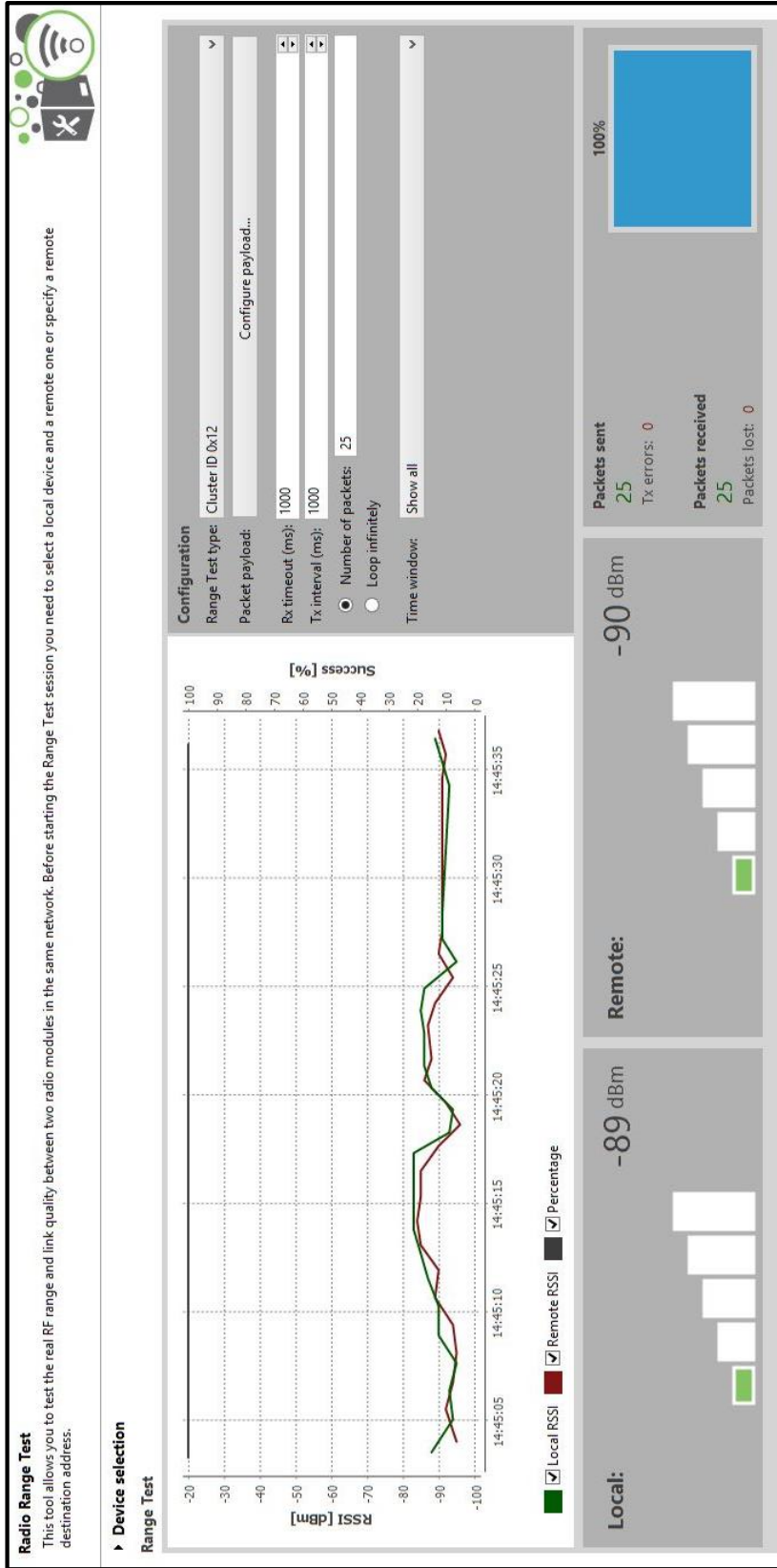


Figura A3.25 Muestra 6 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 88 m con respecto a ZC
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

91 metros – Muestra 3

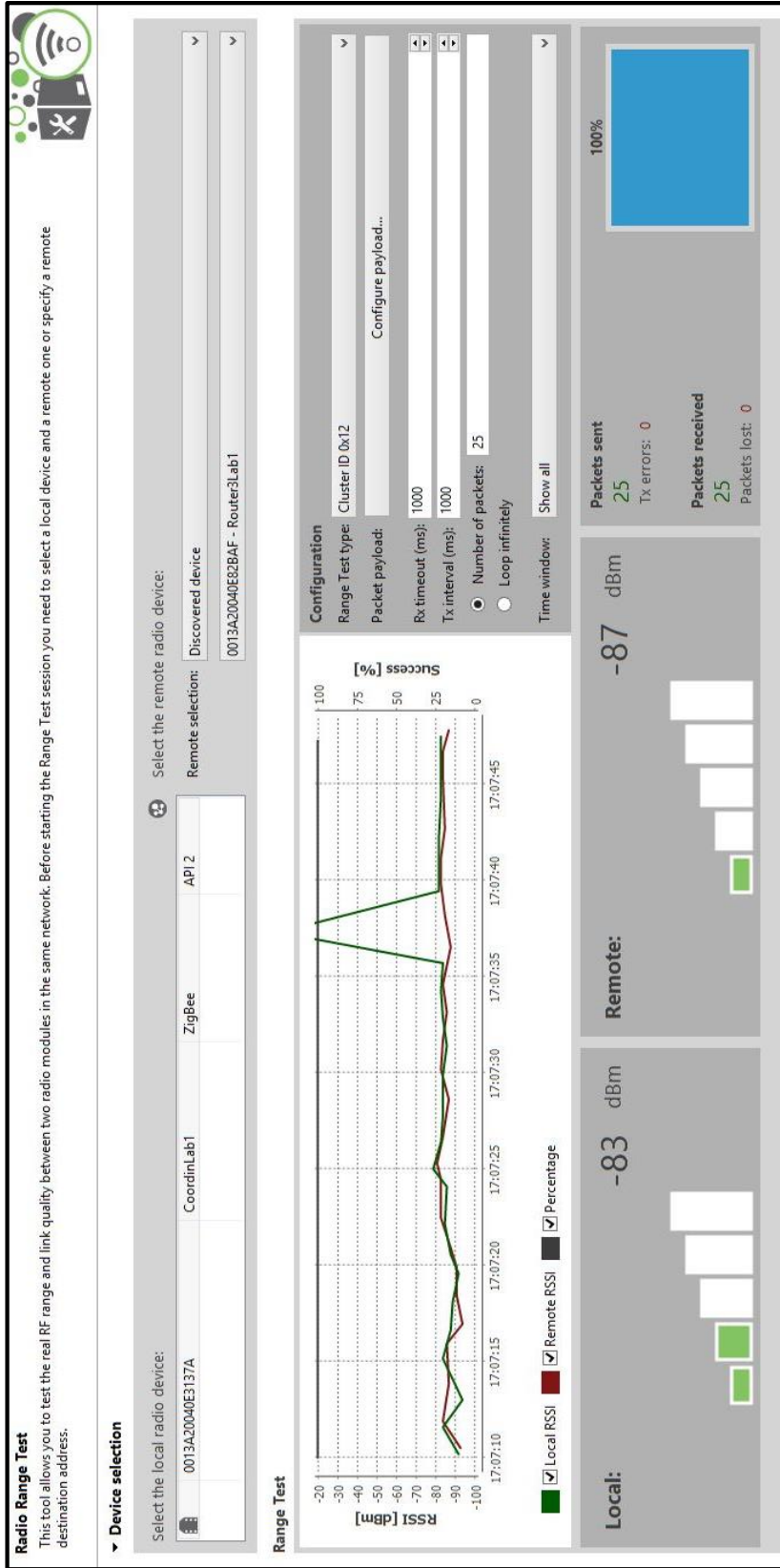


Figura A3.26 Muestra 3 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 91 m con respecto a ZC
 Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

94 metros – Muestra 1

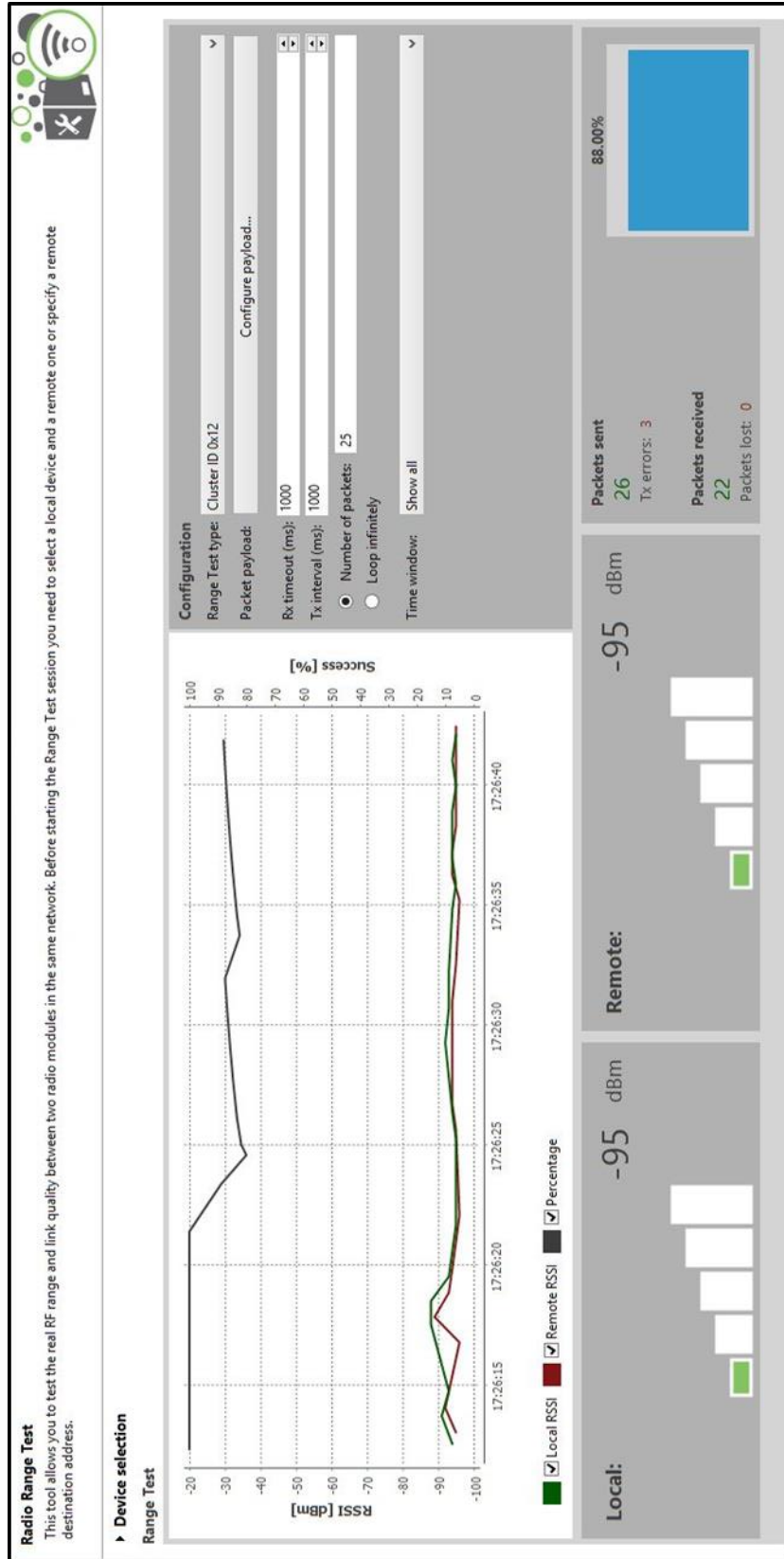


Figura A3.27 Muestra 1 de la potencia Tx y Rx de los módulos XBee a 94m con respecto a ZC
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

ANEXO 4

| Potencia Tx (dBm) | DISTANCIA C-R (m) | 10log(d/do) | PATH LOSS C-R (dB) | | | | | | | | | | PATH LOSS av (dB) | | | |
|-------------------|-------------------|-------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------------|----|----|----|
| | | | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Muestra 5 | Muestra 6 | Muestra 7 | Muestra 8 | Muestra 9 | Muestra 10 | | | | |
| L O S | 1 | 0 | 37 | 35 | 36 | 37 | 36 | 35 | 36 | 35 | 35 | 36 | 35 | 36 | 34 | 36 |
| | 5 | 6.99 | 45 | 47 | 44 | 43 | 45 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 45 |
| | 10 | 10.00 | 55 | 55 | 53 | 52 | 55 | 54 | 54 | 57 | 54 | 57 | 54 | 53 | 56 | 54 |
| | 15 | 11.76 | 61 | 61 | 58 | 64 | 62 | 58 | 60 | 60 | 59 | 60 | 59 | 57 | 58 | 60 |
| | 20 | 13.01 | 61 | 64 | 58 | 59 | 59 | 59 | 61 | 59 | 61 | 59 | 58 | 61 | 58 | 60 |
| | 25 | 13.98 | 61 | 62 | 65 | 61 | 63 | 65 | 64 | 64 | 65 | 64 | 73 | 62 | 67 | 64 |
| | 30 | 14.77 | 60 | 59 | 59 | 73 | 69 | 73 | 69 | 71 | 63 | 59 | 58 | 58 | 70 | 64 |
| | 35 | 15.44 | 63 | 67 | 70 | 65 | 73 | 65 | 73 | 61 | 60 | 64 | 64 | 59 | 61 | 64 |
| | 40 | 16.02 | 69 | 70 | 66 | 70 | 71 | 65 | 67 | 67 | 70 | 67 | 70 | 67 | 67 | 68 |
| | 45 | 16.53 | 69 | 73 | 77 | 74 | 74 | 73 | 76 | 76 | 76 | 81 | 70 | 70 | 65 | 73 |
| N L O S | 46 | 0 | 69 | 76 | 73 | 83 | 75 | 78 | 73 | 73 | 77 | 71 | 71 | 77 | 75 | 75 |
| | 49 | 0.27 | 76 | 88 | 82 | 80 | 79 | 74 | 74 | 76 | 73 | 74 | 74 | 74 | 74 | 78 |
| | 52 | 0.53 | 86 | 78 | 84 | 78 | 88 | 77 | 76 | 76 | 81 | 76 | 76 | 79 | 80 | |
| | 55 | 0.78 | 92 | 89 | 87 | 73 | 82 | 72 | 71 | 70 | 79 | 71 | 79 | 71 | 79 | |
| | 58 | 1.01 | 88 | 82 | 84 | 87 | 74 | 75 | 81 | 81 | 82 | 85 | 86 | 86 | 82 | |
| | 61 | 1.23 | 93 | 87 | 80 | 82 | 85 | 81 | 81 | 91 | 84 | 79 | 78 | 78 | 84 | |
| | 64 | 1.43 | 84 | 94 | 83 | 88 | 85 | 84 | 84 | 84 | 93 | 87 | 83 | 87 | 87 | |
| | 67 | 1.63 | 86 | 88 | 86 | 87 | 85 | 84 | 85 | 85 | 91 | 89 | 84 | 84 | 87 | |
| | 70 | 1.82 | 91 | 86 | 90 | 86 | 88 | 85 | 86 | 86 | 87 | 87 | 96 | 87 | 88 | |
| | 73 | 2.01 | 95 | 91 | 91 | 99 | 94 | 97 | 86 | 93 | 93 | 96 | 90 | 96 | 93 | |
| 76 | 2.18 | 89 | 92 | 97 | 89 | 93 | 90 | 91 | 91 | 90 | 89 | 97 | 89 | 92 | | |
| 79 | 2.35 | 88 | 87 | 88 | 96 | 98 | 92 | 88 | 94 | 90 | 90 | 89 | 90 | 91 | | |
| 82 | 2.51 | 98 | 98 | 98 | 93 | 97 | 93 | 98 | 99 | 92 | 92 | 99 | 92 | 97 | | |
| 85 | 2.67 | 96 | 98 | 94 | 98 | 96 | 94 | 99 | 99 | 97 | 97 | 98 | 97 | 97 | | |
| 88 | 2.82 | 93 | 97 | 93 | 99 | 96 | 93 | 91 | 91 | 97 | 95 | 98 | 95 | 95 | | |
| 91 | 2.96 | 87 | 87 | 90 | 93 | 86 | 88 | 87 | 91 | 88 | 87 | 91 | 88 | 91 | | |
| 94 | 3.10 | 98 | 96 | 90 | 96 | 99 | 94 | 96 | 96 | 99 | 97 | 98 | 97 | 96 | | |

Tabla A4 PATH LOSS de los escenarios LOS y NLOS
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.

ANEXO 5

| | DISTANCIA C-R (m) | $10 \log \alpha(d/d_0)$ $\alpha = 2,6$ | PATH LOS (dbm) (Teórico) | PATH LOSS (dbm) (Experimental) | PATH LOSS X(σ) Teórico - Experimental | |
|--------------|-------------------|---|----------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| L O S | 1 | 0.00 | 36 | 36 | 0 | |
| | 5 | 16.08 | 52 | 45 | -7 | |
| | 10 | 23.00 | 59 | 54 | -4 | |
| | 15 | 27.05 | 63 | 60 | -3 | |
| | 20 | 29.92 | 66 | 60 | -6 | |
| | 25 | 32.15 | 68 | 64 | -3 | |
| | 30 | 33.97 | 70 | 64 | -5 | |
| | 35 | 35.51 | 71 | 64 | -7 | |
| | 40 | 36.85 | 72 | 68 | -4 | |
| | 45 | 38.02 | 74 | 73 | 0 | |
| | | | $\alpha = 6,7$ | | | |
| | N L O S | 46 | 0.00 | 75 | 75 | 0 |
| | | 49 | 2.28 | 77 | 78 | 0 |
| 52 | | 4.42 | 80 | 80 | -1 | |
| 55 | | 6.44 | 82 | 79 | 3 | |
| 58 | | 8.36 | 84 | 82 | 1 | |
| 61 | | 10.17 | 85 | 84 | 1 | |
| 64 | | 11.90 | 87 | 87 | 1 | |
| 67 | | 13.56 | 89 | 87 | 2 | |
| 70 | | 15.13 | 90 | 88 | 2 | |
| 73 | | 16.65 | 92 | 93 | -1 | |
| 76 | | 18.10 | 93 | 92 | 2 | |
| 79 | | 19.49 | 95 | 91 | 4 | |
| 82 | | 20.84 | 96 | 97 | 0 | |
| 85 | 22.13 | 97 | 97 | 0 | | |
| 88 | 23.38 | 99 | 95 | 3 | | |
| 91 | 24.59 | 100 | 89 | 11 | | |
| 94 | 25.76 | 101 | 96 | 5 | | |

Tabla A5 Gradiente de los escenarios LOS y NLOS
Fuente: J. Pablo, X. Merino, 2018.