



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN**  
**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**TEMA:**

**“EVALUACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4G EN LAS BANDAS ISM SUB-GHZ  
APLICANDO EN ESCENARIOS DE AGRICULTURA”**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN**

**AUTOR: PEDRO MARTIN VACA LÓPEZ**

**DIRECTOR: MSC. EDGAR ALBERTO MAYA OLALLA**

**Ibarra – Ecuador, 2025**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD</b>	100394887-2		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	Vaca López Pedro Martin		
<b>DIRECCIÓN</b>	La Florida, Los Jazmines y Los Lirios		
<b>E-MAIL</b>	pmvacal@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO</b>		<b>TELÉFONO</b>	0987637417

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO</b>	Evaluación del estándar ieee 802.15.4g en las bandas ism sub-ghz aplicando en escenarios de agricultura
<b>AUTOR</b>	Vaca López Pedro Martin
<b>FECHA</b>	21/11/2025
<b>PROGRAMA</b>	<b>PREGRADO</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b> <input type="checkbox"/>
<b>TÍTULO</b>	Ingeniero en Electrónica y Redes de Comunicación
<b>DIRECTOR</b>	Msc. Edgar Alberto Maya Olalla



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**2. CONSTANCIAS**

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 21 días del mes de noviembre de 2025

**EL AUTOR**



Firmado electrónicamente por:

**PEDRO MARTIN VACA**

**LOPEZ**

Validar únicamente con FirmaEC

Vaca López Pedro Martin

CI: 100394887-2



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN  
CURRICULAR**

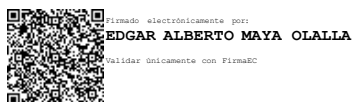
Ibarra, 13 de noviembre de 2025

Ing. Edgar Alberto Maya Olalla, MsC.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



---

Ing. Edgar Alberto Maya Olalla, MsC.

*C.C:1002702197*

## **Dedicatoria**

*A mis abuelitos, que partieron antes de ver este momento, pero cuyo amor y enseñanzas siempre han estado presentes en mi corazón. Gracias por sembrar en mí valores que hoy florecen en este logro.*

*A mi madre, que desde el cielo ha sido mi fuerza en los momentos difíciles. Su ejemplo de lucha y su amor infinito me han acompañado en cada paso.*

*A mi hermano, por acompañarme en este camino con su apoyo constante, por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Gracias por estar ahí, en las buenas y en las malas.*

*A mis amigos, por cada palabra de aliento, por compartir risas, consejos y cada momento en que me recordaron que no estaba solo.*

*Y a mí, por no rendirme, por seguir adelante a pesar de los obstáculos y los días difíciles, seguir soñando incluso cuando todo parecía cuesta arriba. Y por demostrarme que soy capaz de alcanzar lo que me propongo, dejando los miedos e inseguridades atrás.*

## **Agradecimiento**

*En primer lugar, agradezco sinceramente a mi director de tesis, Magister Edgar Maya, por su orientación y paciencia durante todo este proceso. Su compromiso y experiencia fueron fundamentales para alcanzar este objetivo.*

*A mis profesores de la carrera de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte, quienes con dedicación y vocación compartieron sus conocimientos y me ayudaron a formarme no solo como profesional, sino también como persona.*

*A mis amigos, por su apoyo sincero, su colaboración y por estar presentes en cada etapa, ya sea con palabra de aliento, ayuda técnica o simplemente su compañía para hacer más llevadero este camino.*

*A mi familia, por su amor, su comprensión y su fe inquebrantable en mí. Gracias por ser mi motor en todo momento.*

*Agradezco profundamente a Dios, por darme la fortaleza y sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida.*

*Finalmente, mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, fueron parte de este recorrido. Cada gesto, cada palabra y cada ayuda, por más pequeña que parezca, dejó una huella en este logro. A todos ustedes: ¡gracias!*

## Resumen

El presente proyecto tuvo como objetivo diseñar y validar un testbed basado en el estándar IEEE 802.15.4g en banda sub-GHz para aplicaciones de censado en campo abierto, especialmente en escenarios agrícolas con nodos separados hasta por 1 km. Para alcanzar este propósito se adoptó la metodología en cascada, que estructuró el trabajo en fases secuenciales de análisis de requisitos, diseño de topología y parámetros físicos, implementación del hardware sobre Raspberry Pi 3 con módulos ATREB215-XPRO-A, y pruebas de funcionamiento con medición sistemática PDR. Cada etapa incluyó puntos de verificación y retroalimentación, de modo que los ajustes realizados en la configuración de radio y la ubicación de los nodos se validaron antes de avanzar a la siguiente fase. De acuerdo con las pruebas de validación el testbed confirma que las modulaciones de ancho de banda estrecho como FSK y OQPSK ofrecen la mejor combinación de fiabilidad y eficiencia energética en distancias de hasta 1 km, mientras que OFDM solo resulta práctico en rangos cortos o cuando se dispone de técnicas avanzadas de corrección de errores y antenas direccionales. Por lo que se recomienda por tanto emplear 2-FSK u O-QPSK para despliegues en campo abierto sin obstáculos significativos, garantizando un  $PDR \geq 90\%$  y un bajo consumo, y reservar OFDM para entornos con alta densidad de obstáculos o cuando se necesiten ráfagas de alto caudal de datos acompañadas de refuerzos de enlace.

**Palabras Clave:** PDR, 802.15.4g, ATREB215-XPRO-A, modulaciones MR, banda sub-GHz

## Abstract

This project set out to design and validate a sub-GHz IEEE 802.15.4g testbed for open-field sensing applications, with a focus on agricultural scenarios where nodes may be spaced up to 1 km apart. A waterfall methodology was employed, structuring the work into sequential phases: requirements analysis; topology and PHY parameter design; hardware implementation on a Raspberry Pi 3 using ATREB215-XPRO-A modules; and functional testing with systematic Packet Delivery Ratio (PDR) measurements. Each phase included clear verification and feedback checkpoints, ensuring that radio configurations and node placements were fully validated before advancing to the next stage. Validation results confirm that narrow-band modulations—such as FSK and O-QPSK—offer the optimal balance of reliability and energy efficiency at distances up to 1 km, whereas OFDM proves practical only for short-range links or when complemented by advanced error-correction schemes and directional antennas. Consequently, 2-FSK and O-QPSK are recommended for open-field deployments without significant obstacles, guaranteeing a PDR  $\geq 90\%$  and low power consumption, while OFDM should be reserved for high-obstacle environments or applications requiring high-throughput bursts supported by enhanced link-budget techniques.

**Keywords:** PDR; IEEE 802.15.4g; ATREB215-XPRO-A; MR modulations; sub-GHz band

## INDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
CAPÍTULO I: Antecedentes.....	1
1.1 Tema.....	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	1
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4 Alcance.....	4
1.5 Justificación.....	5
CAPÍTULO II: Fundamentación Teórica .....	7
2.1 Internet de las Cosas.....	7
2.1.1. Características .....	7
2.1.2. Arquitectura de un sistema IoT.....	8
2.1.3. Aplicaciones.....	9
2.2 LPWAN.....	12
2.2.1. Arquitectura de una red LPWAN .....	13
2.2.2. Tecnologías.....	15

2.2.3.	Comparativa de las principales tecnologías LPWAN.....	16
2.2.4.	Consideraciones regulatorias .....	17
2.3	IEEE802.15.4.....	18
2.3.1.	Topologías de red soportadas.....	19
2.3.2.	Capas de modelo .....	20
2.3.3.	Protocolos .....	21
2.4	IEEE802.15.4G.....	21
2.4.1.	Diferencias con el estándar 802.15.4 .....	22
2.4.2.	Técnicas de modulación.....	23
2.4.3.	Distancias de operación .....	24
2.4.4.	Comparativa entre las versiones 2012 y 2015 .....	25
CAPÍTULO III: Diseño e Implementación .....		26
3.1	Establecimiento de la metodología de diseño .....	26
3.2	Requerimientos del sistema.....	28
3.2.1.	Cobertura y alcance deseados .....	28
3.2.2.	Requerimientos energéticos .....	29
3.2.3.	Calidad del enlace .....	29
3.2.4.	Intensidad de señal .....	30
3.3	Diseño.....	30
3.3.1.	Selección de componentes .....	30

3.3.1.1.	Hardware.....	30
3.3.1.1.1.	Unidad de Comunicación.....	31
3.3.1.1.2.	Unidad de Procesamiento de Datos.....	33
3.3.1.2.	Software.....	35
3.3.1.2.1.	Python.....	35
3.3.1.2.2.	RadioMobile.....	36
3.3.2.	Configuración de parámetros de radio y modulación.....	37
3.3.2.1.	Selección de las modulaciones a analizar.....	37
3.3.2.1.1.	2FSK a 50 kbps.....	37
3.3.2.1.2.	OFDM a 100 kbps.....	37
3.3.2.1.3.	OQSPK a 6.25 kbps.....	38
3.3.3.	Diseño de la topología de red.....	38
3.3.3.1.	Selección de la arquitectura de red.....	38
3.3.3.2.	Distribución de los nodos.....	39
3.3.3.2.1.	2FSK-50.....	40
3.3.3.2.2.	OFDM-100.....	47
3.3.3.2.3.	OQPSK-6.25.....	55
CAPÍTULO IV: Pruebas de Funcionamiento.....		65
4.1	Selección del porcentaje de paquetes PDR que se desea recibir.....	65
4.2	Establecimiento del escenario de línea de vista.....	68

4.3	Análisis de las modulaciones en las diferentes distancias a través de OPENMOTE-B.	71
4.4	Análisis de las modulaciones en las diferentes distancias a través del módulo ATRE215-XPRO-A .....	74
4.5	Discusión sobre aspectos anómalos de los resultados obtenidos .....	78
	Conclusiones.....	79
	Recomendaciones .....	82
	Anexos .....	84
	Bibliografía .....	98

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Arquitectura de tres capas .....	9
<b>Figura 2</b> Elementos indiscutibles de un sistema IoT .....	11
<b>Figura 3</b> Componentes de una red LPWAN .....	14
<b>Figura 4</b> Estructura de un nodo sensor.....	14
<b>Figura 5</b> Topología tipo Estrella .....	19
<b>Figura 6</b> Topología de red tipo punto a punto .....	19
<b>Figura 7</b> Topología de red tipo malla.....	19
<b>Figura 8</b> Topología de red tipo árbol .....	20
<b>Figura 9</b> Modulación FSK .....	23
<b>Figura 10</b> Modulación OFDM .....	24
<b>Figura 11</b> Modulación O-QPSK .....	24
<b>Figura 12</b> Metodología de diseño - Modelo en Tipo Cascada.....	26
<b>Figura 13</b> Esquema de hardware.....	30
<b>Figura 14</b> Software Python .....	35
<b>Figura 15</b> Software RadioMobile .....	36
<b>Figura 16</b> Topología punto a punto.....	38
<b>Figura 17</b> Establecimiento de parámetros 2FSK-50 a 420 m en RadioMobile .....	41
<b>Figura 18</b> Exportación de parámetros 2FSK-50 a 420 m de RadioMobile en GoogleEarth .....	42
<b>Figura 19</b> Establecimiento de parámetros 2FSK-50 a 700 m en RadioMobile .....	43
<b>Figura 20</b> Exportación de parámetros 2FSK-50 a 700 m de RadioMobile en GoogleEarth .....	43
<b>Figura 21</b> Establecimiento de parámetros 2FSK-50 a 1000 m en RadioMobile .....	44
<b>Figura 22</b> Exportación de parámetros 2FSK-50 a 1000 m de RadioMobile en GoogleEarth .....	45

<b>Figura 23</b> Establecimiento de parámetros OFDM-100 a 420 m en RadioMobile .....	48
<b>Figura 24</b> Exportación de parámetros OFDM-100 a 420 m de RadioMobile en GoogleEarth ...	49
<b>Figura 25</b> Establecimiento de parámetros OFDM-100 a 700 m en RadioMobile .....	50
<b>Figura 26</b> Exportación de parámetros OFDM-100 a 700 m de RadioMobile en GoogleEarth ...	51
<b>Figura 27</b> Establecimiento de parámetros OFDM-100 a 1000 m en RadioMobile .....	52
<b>Figura 28</b> Exportación de parámetros OFDM-100 a 1000 m de RadioMobile en GoogleEarth .	53
<b>Figura 29</b> Establecimiento de parámetros OPSK-6.25 a 420 m en RadioMobile .....	56
<b>Figura 30</b> Exportación de parámetros OQPSK-6.25 a 420 m de RadioMobile en GoogleEarth	57
<b>Figura 31</b> Establecimiento de parámetros OPSK-6.25 a 700 m en RadioMobile .....	59
<b>Figura 32</b> Exportación de parámetros OQPSK-6.25 a 700 m de RadioMobile en GoogleEarth	59
<b>Figura 33</b> Establecimiento de parámetros OPSK-6.25 a 1000 m en RadioMobile .....	60
<b>Figura 34</b> Exportación de parámetros OQPSK-6.25 a 1000 m de RadioMobile en GoogleEarth .....	61
<b>Figura 35</b> Escenario de línea de vista para la obtención de los paquetes PDR.....	68
<b>Figura 36</b> Uso del nodo OPENMOTE-B en las distancias establecidas en la línea de vista.....	69
<b>Figura 37</b> Uso del nodo ATREB215-XPRO-A en las distancias establecidas en la línea de vista .....	70
<b>Figura 38</b> Análisis PDR promedio por configuración PHY a través de OPENMOTE-B .....	73
<b>Figura 39</b> Análisis PDR promedio por configuración PHY a través de ATREB215-XPRO-A..	76

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Comparación de tecnologías de comunicación LPWAN.....	16
<b>Tabla 2</b> Consideraciones regulatorias en Ecuador sobre el uso del espectro radioeléctrico.....	17
<b>Tabla 3</b> Comparativa técnica entre versiones 2012 y 2015 .....	25
<b>Tabla 4</b> Comparativa entre módulos y placas de comunicación compatibles con IEEE 802.15.4g .....	31
<b>Tabla 5</b> Comparativas de Raspberry .....	33
<b>Tabla 6</b> Resultados obtenidos para la modulación 2FSK-50 calculada de forma matemática ....	46
<b>Tabla 7</b> Comparativa entre los valores calculados matemáticamente con respecto a los RadioMobile para la modulación 2FSK-50 .....	46
<b>Tabla 8</b> Resultados obtenidos para la modulación OFDM-100 calculada de forma matemática	53
<b>Tabla 9</b> Comparativa entre los valores calculados matemáticamente con respecto a los RadioMobile para la modulación OFDM-100.....	54
<b>Tabla 10</b> Resultados obtenidos para la modulación OQPSK-6.25 calculada de forma matemática .....	62
<b>Tabla 11</b> Comparativa entre los valores calculados matemáticamente con respecto a los RadioMobile para la modulación OQPSK-6.25 .....	63
<b>Tabla 12</b> Línea de vista de consideración de paquetes PDR deseados por alcanzar para la validación de las pruebas de funcionamiento .....	66
<b>Tabla 13</b> Resultados obtenidos del recibimiento de los paquetes PDR de cada una de las modulaciones que permite Atmel AT86RF215 a través de OPENMOTE-B .....	71
<b>Tabla 14</b> Resultados obtenidos del recibimiento de los paquetes PDR de cada una de las modulaciones que permite Atmel AT86RF215 a través de ATREB215-XPRO-A.....	75

## **Índice de Ecuaciones**

<b>Ecuación 1</b> Pérdida en espacio libre .....	39
<b>Ecuación 2</b> Potencia isotrópica radiada equivalente .....	39
<b>Ecuación 3</b> Potencia recibida .....	39
<b>Ecuación 4</b> Margen del enlace .....	40

## **CAPÍTULO I: Antecedentes**

### **1.1 Tema**

Evaluación del estándar IEEE 802.15.4g en las bandas ISM sub-GHz aplicando en escenarios de agricultura

### **1.2 Planteamiento del Problema**

En la última década la tecnología ha evolucionado de una manera extraordinaria, teniendo sin lugar a duda como eje principal la información y como obtenerla, razón por la cual han surgido nuevas formas de comunicarnos cada vez más sencillas y rápidas. Con la aparición de las tecnologías LPWAN se planteó dar una solución al alto consumo de energía que generaban las tecnologías convencionales como Wi-Fi (802.11a, 802.11b y 802.11n) y Bluetooth (Asaduzzaman et al., 2015), utilizando tecnologías modernas y capaces de trabajar en entornos IoT. Según Keysight Solutions (2015): entre las tecnologías LPWAN en funcionamiento, se tiene a Zigbee (802.15.4) capaz de soportar comunicaciones a distancias de 1km, Wi-Fi (802.11ah y 802.11p) con distancias de hasta 1km, LTE-M para comunicaciones en un rango de 1km y una de las más actuales 802.15.4g (Wi-SUN) con un rango de comunicación de 1km (Keysight Solutions, 2015), tomando en cuenta que cada una de estas tecnologías han sido evaluadas y aplicadas en investigaciones previamente realizadas por Muñoz (Muñoz, 2019). Entre otras tenemos a Sigfox con distancias de comunicación hasta 10km (urbano) y 40km (rural); LoraWAN para comunicaciones en un rango de 5km (urbano) y 20km (rural); finalmente NB-IoT con rangos de hasta 1km (urbano) y 10km (rural). (Mekki et al., 2019)

IEEE 802.15.4g se creó para aplicaciones de Smart Utility Network (SUN). Un requisito importante para poder construir redes de malla en un rango alrededor de 1km. Para hacerlo, este estándar se usa principalmente en bandas sub-GHz, principalmente en las bandas entre los 800-

900 MHz a velocidades de transmisión entre los 50, 100 y 150 kbps (Harada et al., 2017). También puede trabajar en la banda de los 2.4 GHz (Chang y Mason, 2012). Estas bandas están cubiertas en el espectro de frecuencia ISM sin licencia especificado por varios países y regiones. Sin embargo, la regulación en estas frecuencias impone restricciones de ciclo de trabajo pesado. IEEE 802.15.4g fue publicada por primera vez en 2012, donde se incluyó en la especificación principal IEEE 802.15.4 en su revisión de 2015 (Muñoz, 2019). Dentro de la Agricultura, se ha empezado a implementar esta tecnología como una prueba para evaluar el desempeño de los nodos en entornos de aplicaciones de IoT como: agricultura inteligente, monitoreo de recursos naturales en un entorno similar a un bosque, monitoreo de ganado en un terreno abundante en vegetación y más. (Muñoz, 2019)

IEEE 802.15.4g presenta tres modulaciones alternativas: FSK (modulación por desplazamiento de frecuencia), O-QPSK (modulación por desplazamiento de fase en cuadratura compensada) y OFDM (multiplexación por división de frecuencia ortogonal) (Muñoz, 2019). En la especificación lanzada en el 2012, dentro lo que es capa física, se establecieron mecanismos PHY para cumplir con la especificación IEEE 802.15.4g las cuales son: Multi-Rate y Multi-Regional Frequency Shift Keying (MR-FSK): Ofrece una buena eficiencia de potencia de transmisión debido a la envolvente constante de la señal de transmisión (Hanes et al., 2017). Multiplexación por división de frecuencia ortogonal y multirregional (MR-OFDM): proporciona velocidades de datos más altas, pero puede ser demasiado complejo para dispositivos de bajo costo y baja potencia transmisión (Hanes et al., 2017). Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con desplazamiento múltiple y multirregional (MR-O-QPSK): comparte las mismas características del IEEE 802.15.4-2006 O-QPSK PHY, lo que hace que los sistemas multimodo sean más rentables y fáciles de diseñar transmisión (Hanes et al., 2017). Se plantea realizar un

estudio de las modulaciones que ofrece este protocolo para conocer el desempeño que tienen estos dispositivos en un escenario de agricultura para verificar los distintos parámetros de transmisión en un enlace como: proporción de paquetes transmitidos, proporción de paquetes recibidos, indicador de calidad del enlace (LQI), indicador de intensidad de señal recibida (RSSI), la tasa de error de paquetes (PER) y la tasa de entrega de paquetes. (Righetti et al., 2019)

Actualmente en el Ecuador no se han realizado estudios relacionados con esta tecnología, únicamente existen investigaciones y aplicaciones relacionadas con las tecnologías inalámbricas tradicionales como lo son: WiMax, Wi-Fi, Bluetooth y Zigbee (ARCOTEL, 2015). Por lo que se propone implementar un testbed del estándar IEEE 802.15.g para evaluar este tipo de tecnología, proponiendo como escenario de aplicación un entorno de agricultura, con el fin de dar a conocer las nuevas tendencias tecnológicas que han surgido en la última década y su desempeño en una de las áreas de desarrollo del país como lo es la agricultura.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo General***

Evaluar los mecanismos PHY del estándar IEEE 802.15.4g en las bandas ISM sub-GHz, utilizando las métricas de evaluación de radiofrecuencia para implementaciones en escenarios de agricultura.

#### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

- Recopilar información acerca de los diferentes estándares de IoT inalámbricos utilizados en LPWAN, haciendo enfoque en el estándar 802.15.4g en sus especificaciones 2012 y 2015.
- Realizar un estudio de campo para definir los requerimientos del sistema, los nodos de comunicación, el sistema embebido y los diferentes componentes a utilizar.

- Diseñar una red de comunicación, implementando los nodos 802.15.4g a diferentes distancias y configuraciones de radio en un escenario de agricultura.
- Evaluar el desempeño de los nodos de comunicación 802.15.4g y realizar las mediciones necesarias, mediante el análisis de los parámetros de radiofrecuencia en un enlace.

#### **1.4 Alcance**

Se presentará un estado del arte, comenzando por dar una descripción general de los estándares y protocolos inalámbricos más utilizados en redes inalámbricas de baja potencia (LPWAN). Se realizará un enfoque y descripción más detallada del estándar IEEE802.15.4g en sus dos especificaciones: 2012 y 2015. Dando a conocer las bandas en las que trabaja, sus distancias de operación, además de un análisis de las diferentes modulaciones en las que opera este tipo de estándar.

Con el fin de poder establecer la mejor herramienta de hardware, se realizará un análisis de los distintos nodos que son compatibles con el estándar IEEE 802.15.4g, para determinar los componentes necesarios a utilizar para ser implementado en un testbed y así poder tener un sistema que se adapte a las necesidades del proyecto. Así como, un sistema embebido que permita la lectura de los datos que proporcionarían cada uno de los nodos de comunicación.

Se diseñará una red de comunicación en la cual cada uno de los nodos de RX se encontrarán a una distancia creciente del nodo de TX, por lo tanto, se pretenderá analizar los distintos parámetros de transmisión en un enlace como: proporción de paquetes transmitidos, proporción de paquetes recibidos, indicador de calidad del enlace (LQI), indicador de intensidad de señal recibida (RSSI), la tasa de error de paquetes (PER), la tasa de entrega de paquetes y observar que modulación (MR-FSK, MR-OFDM, MR-O-QPSK) según las que establece el estándar, es recomendable para cada parámetro dependiendo de la distancia . En este escenario, los nodos se

analizarán dos veces durante el mismo día, con condiciones climáticas iguales a diferentes distancias.

Se realizarán pruebas del rendimiento del estándar IEEE802.15.4g en las bandas ISM sub-GHz, utilizando hardware compatible con IEEE 802.15.4g, en casos de uso al aire libre, planteando como aplicación principal un entorno de agricultura. Los resultados nos permitirán proporcionar recomendaciones sobre qué configuración de radio utilizar, dada su modulación y distancia entre cada uno de los nodos en la red, con la finalidad de brindar nuevas alternativas utilizando diferentes tecnologías de comunicación en escenarios de agricultura.

## **1.5 Justificación**

Dentro de los paradigmas que se plantean en la época actual, se encuentra el de la conexión de todos los dispositivos y la automatización de ciertos procesos para disminuir tiempos de reacción y costos para las empresas. Por lo tanto, el uso de nuevas tecnologías es imperativo para toda sociedad que desea desarrollarse y alcanzar un alto estándar de vida.

Una de las innovaciones actuales en las comunicaciones es la tecnología que especifica el estándar IEEE 802.15.4g, ya que apunta a requerimientos característicos del Internet de las Cosas. Este estándar tiene como características principales: un bajo consumo de energía, un sistema de medición inteligente de baja velocidad de datos y un sistema avanzado de administración de servicios públicos (Sum et al., 2012). En esta especificación, la velocidad de datos suele ser inferior a 1 Mbps con una vida útil de la batería de alrededor de 10 años. Además de permitir conectividad con al menos 1000 dispositivos vecinos, lo cual es un requisito principal en el diseño este tipo de red (802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks, 2016). Estas características de diseño son esenciales para satisfacer la gran demanda y el creciente número de dispositivos de medición que existen actualmente. En tal sentido, esta nueva tecnología proporciona a los

operadores de redes una mejor flexibilidad en el manejo de aplicaciones de baja potencia, soluciones de bajo costo que se pueden adaptar con dispositivos de alta autonomía. Todo esto busca ser una innovación que brinde mayor comodidad al usuario para tener un monitoreo seguro y continuo. El éxito de implementar una alternativa de conexión a largo alcance es dar a conocer a la sociedad, que es posible trabajar y proponer nuevas opciones para desarrollar aplicaciones que aporten en la investigación de nuevas tecnologías para ser implementadas en el país.

La importancia de desarrollar este proyecto es demostrar en base a una transmisión entre nodos 802.15.4g, como pueden ser implementados en una comunicación al aire libre en un escenario de agricultura, para poder analizar su desempeño y comportamiento en este tipo de ambientes. Por lo tanto, para ofrecer una solución a estos problemas, se plantea el uso de una tecnología LPWAN (Low Power Wide Area Network) usando el estándar 802.15.4g, el cual fue planteado para comunicar dispositivos de bajo costo y bajo consumo, bajo el esquema del internet de las cosas (IoT).

## **CAPÍTULO II: Fundamentación Teórica**

El presente capítulo contiene la información técnica y teórica en cuanto a los conceptos fundamentales que se va a implementar en el presente proyecto de investigación. Exponiendo temas como las principales tecnologías de comunicación inalámbrica orientada al internet de las cosas (IoT), haciendo énfasis en los esquemas de baja potencia y largo alcance llamados LPWAN, consecuentemente el análisis de las principales tecnologías para obtener los criterios necesarios de selección que cumplan con los objetivos propuestos dentro del proyecto.

### **2.1 Internet de las Cosas**

Se entiende como internet de las cosas a la implementación de dispositivos o equipos que se encuentran conectados entre sí mediante un tipo de comunicación, en donde estos pueden intercambiar, agregar o procesar diferentes escenarios de información en base a su entorno. De acuerdo con Gélvez y Santos (2020) IoT se le puede interpretar como conexión de cualquier cosa o dispositivo mediante un protocolo estándar a internet, en donde este puede ser monitoreado de forma remota desde cualquier punto sin tener la necesidad de que una persona se encuentre físicamente, facilitando la comunicación de información de forma bilateral entre cualquier componente que constituya este sistema.

#### ***2.1.1. Características***

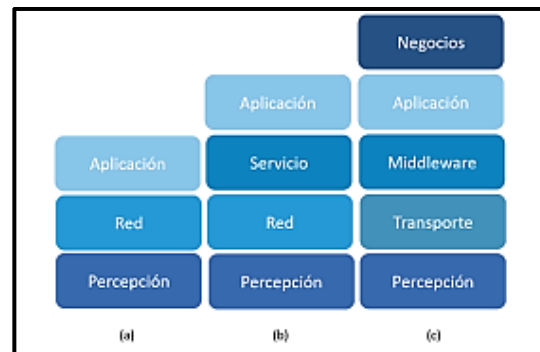
Como se comprendió los sistemas IoT se definen como una red de dispositivos y objetos inteligentes capaces de interconectarse y comunicarse entre sí para compartir información y poder así ejecutar acciones de forma remota y automatizada. Como todo sistema o red esta tiende a presentar características que la destacan como lo menciona Véliz y Mar (2022) en su investigación que las principales características de un sistema IoT pueden llegar a ser las siguientes:

- Conectividad masiva entre diferentes dispositivos, equipos, sensores o actuadores para obtener la información.
- Heterogeneidad de dispositivos, en donde sus elementos van desde microcontroladores de bajo consumo hasta sistemas de alta capacidad de procesamiento.
- Escalabilidad en donde se le puede interpretar como la accesibilidad al crecimiento del sistema en cuanto a nodos sin tener la factibilidad de comprometer globalmente el rendimiento.
- Bajo consumo energético
- Interoperabilidad, es decir que los dispositivos siguen estándares que permiten la facilidad de comunicación entre ellos sin importar la diversidad de los fabricantes que provengan y plataformas para su configuración.

### ***2.1.2. Arquitectura de un sistema IoT***

Se entiende como arquitectura la forma en cómo se encuentra estructurado el sistema IoT, es decir la descripción de las capas que la conforman. De acuerdo con la forma o el entorno de aplicación esta puede ser diferente por lo que no existe un estándar para su elaboración según las necesidades de quien la implementa. Por tal razón de forma generalizada se le puede interpretar según Yachirema (2019) la de tres capas por considerarse como la más básica, pero en cuanto a funcionalidad la mejor estructurada como se lo puede observar en la siguiente Figura 1.

**Figura 1**  
*Arquitectura de tres capas*



Nota: En la figura se puede observar los tres tipos de estructuras más comunes en cuanto aplicación, pero la más común y simple de interpretación para cualquier área de uso es la de tres capas (Yacchirema, 2019).

Como se pudo observar las tres capas se la considera como la más básica, esto se debe a que se encuentra caracterizada por el enfoque técnico y centralizado que tiene con respecto a los elementos en la red IoT. Dentro de estas se puede encontrar las capas de percepción, red y aplicación.

- Capa de percepción: representada hacia los dispositivos físicos conocidos como sensores y actuadores con la finalidad de identificar, recopilar información del entorno y transmitirla para poder ser monitoreada y ejecutar acciones en base al entorno a través de los dispositivos o actuadores.
- Capa de red: permite la comunicación con otros dispositivos físicos, de red y servidores para procesar la información recopilada y transmitida.
- Capa de aplicación: referenciada a las aplicaciones y necesidades del usuario en el que desea hacer uso de la información procesada para solucionar, ejecutar o planificar una acción.

### **2.1.3. Aplicaciones**

Como se pudo evidenciar el IoT se lo puede usar donde sea siempre y cuando se encuentre dentro de los parámetros de aplicación de las diferentes capas presentadas en la Figura 1. Ya que

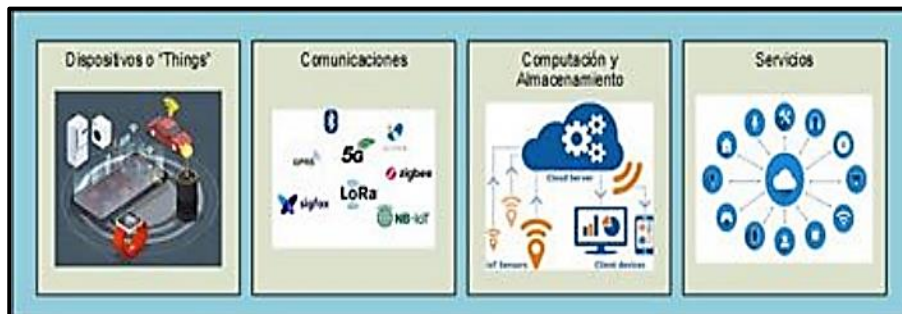
se ha transformado de forma radical múltiples sectores al permitir la conexión y el intercambio de información, datos y monitoreo en tiempo real entre los diferentes dispositivos de comunicación. Por lo que de acuerdo con esta definición y como lo menciona Tonato y Sinche (2022) existen un sin número de aplicaciones, pero las más relevantes son las siguientes:

- Casas inteligentes, dentro de esta área se puede mencionar la domótica que permite el control de los sistemas al abrir o cerrar puertas, ventanas, iluminación, equipos eléctricos o electrónicos.
- Ciudades inteligentes hace referencia al ambiente que posee un conjunto la tecnología de automatización e IoT, permitiendo el control y automatización de los servicios.
- Agricultura y ambiente, gracias a los componentes como los sensores y actuadores se puede obtener datos sobre el medioambiente y con estos monitorear las diferentes variables que suelen presentarse como temperatura, humedad, radiación, etc. En otras palabras, permite conocer y posiblemente predecir situaciones climáticas con el simple hecho de la monitorización y comunicación de la información.
- Cuidado de la salud, permitiendo monitorizar parámetros vitales de los pacientes tanto en centros asistenciales como en el hogar. Con la ayuda de los dispositivos se permite enviar los datos a lugares de monitoreo, facilitando la toma de decisiones médicas en tiempo real, reduciendo las visitas presenciales y hasta presentando la posibilidad de predicciones de condiciones que podrían ser peligrosas, mejorando así la prevención y la calidad de los cuidados.
- Transporte y logística, en este caso se puede denotar que se puede mejorar la circulación vehicular a través de la conexión e intercambio de información entre los vehículos y

las redes vehiculares como semáforos, puentes, cámaras, entre otros, con la finalidad de mejorar la eficiencia del transporte público como privado.

Como se pudo evidenciar existe varias áreas en donde se lo puede aplicar los sistemas IoT, todo depende de la creatividad y en la forma en como se lo aplica. Pero para lograrlo confiablemente es necesario tener presente sus elementos como se lo puede observar en la siguiente Figura 2.

**Figura 2**  
*Elementos indiscutibles de un sistema IoT*



Nota: se puede identificar 4 elementos principales, dispositivos o componentes, comunicaciones, computación y almacenamiento, y por último los servicios (Tonato y Sinche, 2022).

Dentro estos se pueden mencionar que en cuanto a los dispositivos hace referencia a cualquier objeto o cosa que pueda conectarse al internet y permita la comunicación con otros objetos. En cuanto a las comunicaciones se puede describir como el envío y recepción de los datos o información, en este caso se pueden usar diversas tecnologías como redes celulares o satelitales, Wifi, Bluetooth, Zigbee, LPWAN, entre otros todo depende de la forma de aplicación. En lo que respecta a la computación y almacenamiento se puede detallar que se lo puede realizar de forma local o mediante el uso de la nube para poder tratar y almacenar la información obtenida. Por último, los servicios se lo pueden definir como todas las aplicaciones para las cuales fueron creados los sistemas IoT o donde se desea implementar.

## 2.2 LPWAN

Las redes de Baja Potencia y Largo Alcance (LPWAN por sus siglas en inglés) constituyen una categoría de tecnologías de comunicación diseñadas para manejar volúmenes de datos moderados a bajas tasas de transmisión, pero ofreciendo coberturas de varios kilómetros con un consumo energético muy reducido. Esto las hace idóneas para aplicaciones dispersas geográficamente donde no se requiere enviar grandes cantidades de información en tiempo real.

Una red LPWAN se la puede considerar como un tipo de red de telecomunicaciones inalámbricas, la cual permite la comunicación de hasta más de 10 kilómetros de distancia con línea de vista y con la presencia de una tasa de transferencia de datos baja. Esta puede ir entre los 100 bps y los 200 kbps (Mekki et al., 2019). En donde este tipo de red se puede caracterizar de lo siguiente:

- Largo alcance: La distancia de comunicación entre dispositivos puede variar unos pocos kilómetros en áreas urbanas hasta más de 10 km zonas rurales.
- Bajo consumo de energía: se las considera como redes optimizadas para un bajo consumo de energía, esto se debe a que los módulos de comunicación pueden funcionar con baterías pequeñas y económicas durante años.
- Bajo costo: Los protocolos de bajo consumo de recursos y su largo alcance combinado con una topología en estrella o malla, reducen la complejidad en el diseño de hardware e infraestructura de red y reducen los costos de implementación.
- Tasa de bits y ciclo de trabajo: El ambiente en donde se las implementan suelen caracterizarse por que la variación de las mediciones obtenidas suele fluctuar gradualmente en el transcurso del tiempo, debido a esta particularidad es posible reducir la tasa de bits de la red y el ciclo de trabajo de los nodos a alrededor del 1%.

- Escalabilidad: capacidad de soportar el incremento de flujo de información o brindar la facilidad de acoplar nuevos dispositivos que permitan escalar la red.

### ***2.2.1. Arquitectura de una red LPWAN***

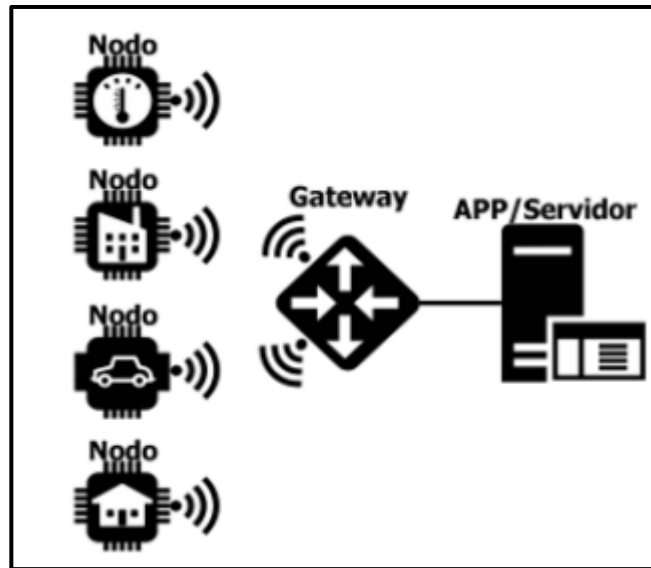
Como lo menciona Castillo y Marticorena (2022) la arquitectura de una red LPWAN se puede basar en una topología de tipo estrella, es decir, al presentar muchos dispositivos también llamados nodos, se permite la comunicación directamente con un dispositivo central, el cual tiene funciones de enrutamiento para direccionar toda la información suministrada por los nodos a un servidor, este dispositivo permite brindar al administrador de red la capacidad de instrumentar, monitorear y ejecutar acciones ante eventos y fenómenos específicos.

Para que se le considere una red LPWAN debe tener presente de un cierto número de componentes, en este caso de tres básicos.

- Un conjunto de dispositivos llamados nodos que se encuentran equipados con sensores, módulos de procesamiento y módulos de comunicación, normalmente inalámbrica, distribuidos en un área específica.
- Uno o más puntos centrales de agrupamiento de información, que normalmente se le conoce como gateway.
- Una estación base compuesta por un conjunto de recursos informáticos en el punto central o más allá para controlar estados de los dispositivos, manejar correlación de datos, tendencias de eventos, consulta de estados, minería de datos, etc.

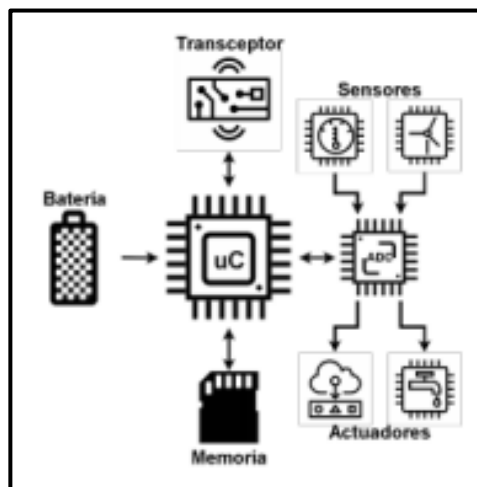
Para mejor interpretación de los componentes que contiene una red LPWAN se puede observar la siguiente Figura 3 en donde se puede evidenciar detalladamente cada uno de estos.

**Figura 3**  
*Componentes de una red LPWAN*



Como se pudo observar los nodos sensores se encargan de medir variables físicas en un entorno determinado con gran detalle, además, realizan procesamiento de datos, ejecutan alguna acción mediante actuadores y se comunican, normalmente de manera inalámbrica, con el gateway a través de un transceptor. En su arquitectura más básica como se lo puede visualizar en la Figura 4, se componen de un microcontrolador, una fuente de alimentación, una memoria interna o externa, un módulo de comunicación o transceptor y una variedad de sensores y actuadores.

**Figura 4**  
*Estructura de un nodo sensor*



En el caso del gateway periódicamente realiza consultas para comprobar el estado de la red y recoge la información recolectada por los sensores, para posteriormente enviarlas hacia un servidor a través de protocolos como TCP/IP.

### **2.2.2. Tecnologías**

Existen una gran variedad de tecnologías que se abarcan a una red LPWAN, pero de acuerdo con el avance de la tecnología y el tiempo existen tres principales con diferentes enfoques de aplicación.

- **LoRaWAN:** Emplea la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS) y opera típicamente en bandas libres (p.ej., 868 MHz en Europa). Ofrece tasas de datos de 0.3 kbps hasta 27 kbps y es muy robusta ante interferencias.
- **Sigfox:** Usa un esquema de modulación Ultra Narrow Band (UNB) y está orientado a transmitir mensajes cortos (apenas decenas de bytes por paquete). Idónea para proyectos donde la frecuencia de reporte es baja.
- **NB-IoT y LTE-M:** Basadas en la infraestructura celular, aprovechan las bandas licenciadas y un amplio despliegue de antenas de operador. Permiten velocidades superiores a las LPWAN no licenciadas, pero a costa de mayor complejidad y consumo.

Pero de acuerdo con Castillo y Marticorena (2022) las tecnologías de comunicación más usadas en las redes LPWAN son LoRa, Sigfox y NB-IoT, ya que fueron diseñadas para permitir desplegar una red de sensores con las características anteriormente descritas en las redes LPWAN, todas ellas difieren una de la otra en cuanto a su funcionamiento y método de implementación. Pero para la aplicación del proyecto se tiene enfocado la utilización de la tecnología IEEE 802.15.4g debido a que ofrece un PHY de banda sub-GHz con modulaciones flexibles, tamaños de trama extendidos y un diseño optimizado para redes de área amplia con bajo consumo

energético, pero para mejor visualización y comprensión del porque la elección se puede observar la siguiente Tabla 1 encontrada en el punto 2.2.3.

### 2.2.3. Comparativa de las principales tecnologías LPWAN

De acuerdo con Hernández (2020), Castillo y Marticorena (2022) las principales diferencias de las tecnologías LPWAN descritas en el punto 2.2.2 son LoRa, Sigfox, NB-IoT, pero al presentar buenas características la tecnología 802.15.4g es una buena opción en cuanto adaptabilidad, versatilidad y exigencia de requisitos que no suelen extenderse demasiado al momento de desear su aplicación.

**Tabla 1**  
Comparación de tecnologías de comunicación LPWAN

Aspectos	Sigfox	LoRa	NB-IoT	802.15.4g-2012
				GFSK /
<b>Modulación</b>	BPSK	CSS	QPSK	O-QPSK / OFDM multirate
<b>Frecuencia</b>	433,868,915 MHz	433,868,915 MHz	LTE Frecuencia licenciada	169, 450, 863– 870, 902–928, 2.4 GHz ISM
<b>Ancho de banda</b>	200 Hz	125-250-500 KHz	200 Hz	100 kHz – 1 MHz
<b>Tasa de bits</b>	100 bps	50 bps	200 bps	6.25 – 800 kbps
<b>Mensajes/día (máx.)</b>	140(UL), 4(DL)	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado
<b>Tamaño máximo del Payload</b>	12 bytes (UL) 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes	2 047 bytes

Aspectos	Sigfox	LoRa	NB-IoT	802.15.4g-2012
<b>Distancia</b>	10 km (urbano) 40 km (rural)	5 km (urbano) 20 km (rural)	1 km (urbano) 10 km (rural)	1 – 10 km (según banda y modulación)
<b>Inmunidad a la interferencia</b>	Muy alto	Muy alto	Baja	Alta (FHSS, DSSS, OFDM)
<b>Tasa de bits adaptable</b>	No	Si	No	Si
<b>Redes privadas</b>	No	Si	No	Si

#### 2.2.4. Consideraciones regulatorias

El uso del espectro radioeléctrico en Ecuador se encuentra regulado por la Ley Orgánica de Telecomunicaciones cuyo cumplimiento y aplicación corresponde a la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). A continuación, se describen los principales instrumentos normativos que inciden en el despliegue de redes LPWAN en bandas ISM sub-GHz:

**Tabla 2**  
*Consideraciones regulatorias en Ecuador sobre el uso del espectro radioeléctrico*

Instrumento	Objetivo
Ley Orgánica de Telecomunicaciones (2014)	Define los principios generales del servicio de telecomunicaciones y faculta a ARCOTEL para actuar como ente regulador.
Plan Nacional de Frecuencias (ARCOTEL, 2021)	Tabla de atribución de bandas y canales, con la finalidad de establecer las bandas ISM disponibles entre (863–870 MHz y 902–928 MHz) y los niveles de

Instrumento	Objetivo
	potencia máxima permitida para equipos de uso libre y determinado
Norma Técnica de Espectro de Uso Libre y de Espectro para Uso Determinado en Bandas Libres (ARCOTEL, 2018)	Resolución ARCOTEL-2018-0661, la cual especifica las condiciones de operación (potencia máxima, densidad espectral, requisitos de certificación) para equipos en bandas ISM, así como la necesidad de títulos habilitantes para uso determinado
Reglamento de Títulos Habilitantes (Resolución 15-16-ARCOTEL-2019)	Establece los procedimientos y requisitos técnicos y administrativos para la obtención de títulos habilitantes de uso de espectro (servicios comunales, concesiones de frecuencia) que en algunos casos amplían la vigencia hasta 20 años.

### 2.3 IEE802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 define la capa física (PHY) y la de enlace de datos (MAC) para redes de área personal inalámbricas de baja tasa (LR-WPAN). De acuerdo con Mendivil (2017) este estándar está pensado para comunicaciones de corto alcance con bajo consumo energético, con la finalidad de soportar diversos modos de funcionamiento y acceso al medio. Además, se la considera como un estándar para redes de área personal inalámbricas de baja velocidad, ya que opera alrededor de 2,4 GHz y proporciona un rango de comunicación de aproximadamente 100-200 m en exteriores y 20-50 m en interiores.

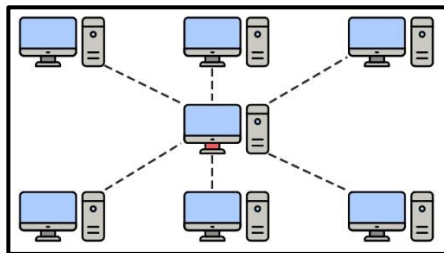
Aunque esta tecnología es muy popular y se utiliza en gran medida para aplicaciones de IoT, presenta una serie de limitaciones que la hacen inadecuada para muchas aplicaciones de la vida real.

### 2.3.1. Topologías de red soportadas

Para este tipo de estándar IEEE 802.15.4 se admite las siguientes topologías básicas según Díaz y Mejía (2019) :

- Estrella, la cual define un nodo central como coordinador y conecta directamente con varios dispositivos finales como se lo puede observar en la siguiente Figura 5.

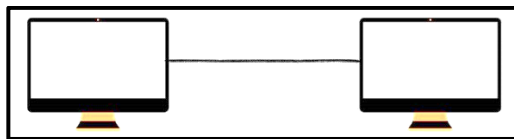
**Figura 5**  
*Topología tipo Estrella*



Nota: Tomada de (Topologías de Redes, 2019)

- Punto a punto, referenciada a que cada dispositivo puede comunicarse directamente con cualquier otro dentro de su alcance, es decir realizando un salto.

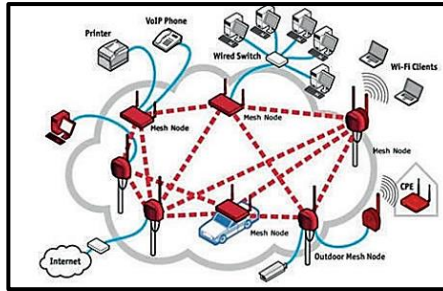
**Figura 6**  
*Topología de red tipo punto a punto*



Nota: En la figura se nota que es una topología que conecta dos nodos o dispositivos directamente mediante una línea privada y dedicada. Tomada de (Singh, 2025)

- Malla, enfocada a la combinación de enlaces punto a punto que permiten múltiples rutas y reenvíos de paquetes.

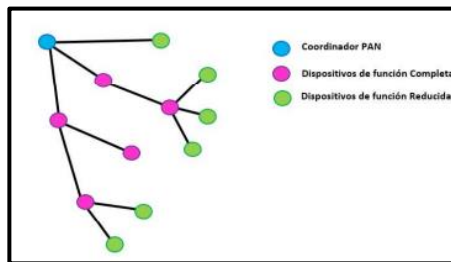
**Figura 7**  
*Topología de red tipo malla*



Nota: Tomada de (Portilla et al., 2024)

- **Árbol**, es una variante de malla con estructura jerárquica de nodos, donde sólo ciertos nodos denominados coordinadores interconectan subárboles.

**Figura 8**  
Topología de red tipo árbol



Nota: Como se pudo observar la estructura jerárquica parte desde el coordinador generando sucesivamente un nodo hijo, los cuales pueden tener funciones FFD o RFD dependiendo la aplicación. Tomada de (Díaz y Mejía, 2019)

Las topologías en malla/árbol se usan en despliegues de sensores amplios, aumentando la cobertura mediante múltiples saltos.

### 2.3.2. Capas de modelo

La IEEE 802.15.4 define las capas física y enlace de datos (MAC) del modelo OSI. En donde de acuerdo con Díaz y Mejía (2019) se puede mencionar que en la capa física se especifican las bandas de operación como la ISM sub-GHz y 2.4 GHz, las modulaciones y las tasas de datos, mientras que la capa MAC gestiona el acceso al medio, es decir la asociación/desasociación de nodos, sincronización de balizas (si las hay), retransmisiones y confirmaciones, segmentación y reensamblado de tramas, etc. Es decir, que la IEE 802.15.4 define tramas MAC de control, datos y confirmación, así como mecanismos de ahorro de energía como el modo de reposo profundo.

En resumen, la IEEE 802.15.4 provee el transporte físico y enlace básico de los protocolos de red superiores que añaden enrutamiento, descubrimiento y demás funcionalidades.

### **2.3.3. Protocolos**

De acuerdo con Geeksforgeeks (2023) sobre las capas PHY/MAC de IEEE 802.15.4 se montan diversos protocolos de red y aplicación de uso común son:

- **ZigBee:** especificación muy popular para automatización y domótica, que utiliza 802.15.4 (modulación O-QPSK a 250 kbps) en PHY/MAC. ZigBee añade un protocolo de red en malla y perfiles de aplicación.
- **6LoWPAN:** adapta IPv6 para operar eficientemente sobre 802.15.4, permitiendo comunicación IP en IoT.
- **Thread:** protocolo para hogares inteligentes (m2m), basado en 6LoWPAN/IPv6 sobre 802.15.4.
- **WirelessHART, ISA100.11a:** protocolos orientados a industria (automatización de procesos) sobre 802.15.4 con enfoque en robustez, seguridad y comunicación determinística.

Estas soluciones usan 802.15.4 como capa física complementándola con rutas de red, segmentos de seguridad y servicios de aplicación específicos. En todos los casos IEEE 802.15.4 proporciona el transporte fiable de paquetes, mientras las capas superiores definidas por cada protocolo añaden características como enrutamiento de largo alcance o seguridad avanzada.

## **2.4 IEE802.15.4G**

De acuerdo con Gardašević et al (2020) la IEEE 802.15.4g es una enmienda dirigida a Smart Utility Networks (SUN), es decir redes de sensores en áreas de infraestructura amplia, ya que introduce nuevas capas físicas para uso en exteriores y enlaces de larga distancia, manteniendo

compatibilidad con 802.15.4. En particular, 802.15.4g extiende la operatividad a bandas inferiores (sub-GHz) y define modulaciones robustas para entornos ruidosos.

Como se describió la IEEE 802.15.4g explota las frecuencias en las bandas sub-GHz, que permiten un rango de comunicación más largo, comparada con la banda 2.4GHz adoptada en el estándar IEEE 802.15.4, con la misma potencia de transmisión, a coste de una tasa de bits reducida. Esto hace que IEEE 802.15.4g sea potencialmente adecuado para una clase de aplicaciones de IoT de largo alcance y bajo rendimiento en diferentes escenarios, además de Wi-SUN. Además de establecer sus principales objetivos como el alcance extendido, robustez en canal abierto y flexibilidad de protocolo, se introdujeron tres esquemas de modulación específicos de acuerdo con IEEE STD (2012) son los siguientes:

- **MR-FSK:** usa filtros Gaussianos para FSK adaptable
- **MR-OFDM:** emplea subportadoras y DSP avanzado para entornos con multipath
- **MR-OQPSK:** extiende el DSSS de O-QPSK clásico con chipping largo para maximizar alcance y robustez.

Estas tres familias cubren un amplio rango de requisitos, por ejemplo, FSK es simple y de bajo ancho de banda, OFDM maximiza datos multiusuario y OQPSK prioriza alcance extremo.

#### ***2.4.1. Diferencias con el estándar 802.15.4***

La diferencia clave es el ámbito de aplicación, es decir que 802.15.4g está pensado para exteriores y redes de alcance amplio, mientras que 802.15.4 original era para entornos locales de corto alcance. 802.15.4g añade PHYs de baja frecuencia desde 169 MHz hasta 2.4 GHz, módulos de modulación avanzada como OFDM, FSK multirate y permite tramas mayores hasta kilobytes. También actualiza la capa MAC para enlaces largos y redes masivas. En comparación con la IEEE 802.15.4 fija el tamaño de trama máximo en 127 bytes y se concentra en 2.4 GHz, mientras

conmuta a 868/915 en ciertas regiones. Esencialmente, 802.15.4g hereda la capa MAC de 802.15.4 pero redefine el PHY para sub-GHz y añade OFDM, logrando comunicación de largo alcance a coste energético bajo.

#### 2.4.2. Técnicas de modulación

Como se mencionó en IEE STD (2012) la tecnología 802.15.4g consta de tres familias de PHY, las cuales se encuentran conformadas por FSK de baja complejidad, OFDM y OQPSK. En donde cada familia incluye varias configuraciones de velocidad y ancho de canal. Es decir, se especifica FSK multirate (2FSK/4FSK) con velocidades típicas 50–300 kb/s (BW 100–600 kHz), y OFDM multirate (hasta ~800 kb/s). 802.15.4g también mantiene modulaciones heredadas de 802.15.4 clásico (O-QPSK con DSSS).

**Figura 9**  
*Modulación FSK*

Bit rate (kbps)	Modulation index	BW-Ch spacing (kHz)	Operating mode	With FEC: Net bit rate (kbps)
50	0.5	100	#1a	25
50	1	200	#1b	25
100	0.5	200	#2a	50
150	1	400	#2b	50
200	0.5	200-400*	#3	75
200	0.5	400	#4a	100
200	1.0	600	#4b	100
300	0.5	400-600*	#5	150

**Figura 10**  
Modulación OFDM

OFDM option	Bandwidth (kHz)	Main regions	Bit rates (kbps)	Sensitivity (dBm)
1	1200	NA,BZ	100 to 2400 (3600*)	-111 to -95
2	800	NA, BZ, JP	50 to 1200 (1800*)	-113 to -98
3	400	NA, BZ, JP	25 to 600 (900*)	-115 to -101
4	200	NA, BZ, JP, EU	12.5 to 300 (450*)	-116 to -104

**Figura 11**  
Modulación O-QPSK

Chip rates (kcps)	Bandwidth	Main regions	Bit rates (kbps)	Sensitivity (dBm)
100	200	Worldwide	6.25 to 50	-124 to -119
1000	2000	NA, BZ, KR	31.25 to 500	-116 to -109

En la práctica, esto da a 802.15.4g-2012 gran flexibilidad de modulación para adaptarse a entornos cambiantes, en donde se deber considerar más potencia y ancho de canal para rendimiento o modos estrechos para maximizar alcance y sensibilidad a comparativa con respecto a su antepasado la 802.15.4.

### 2.4.3. Distancias de operación

Gracias a sus modulaciones y frecuencias sub-GHz, 802.15.4g alcanza rangos muy superiores a 802.15.4 clásico. Equipos en banda ~900 MHz pueden lograr enlaces kilométricos en línea de vista. Dentro de este contexto se puede mencionar que de acuerdo con IEEE STD (2012) en condiciones óptimas antenas omnidireccionales altas, sin obstrucciones se suelen estimar alcances de varios kilómetros. 802.15.4 original típicamente cubre decenas de metros entre 10–100 m, en cambio con 802.15.4g esas cifras aumentan mucho, facilitando monitorización de

infraestructuras agrícolas o redes de energía extensas. El alcance exacto depende de la banda, es decir mayor en 169/450 MHz que en 2.4 GHz, la velocidad menores kb/s con mayor alcance y las antenas usadas.

#### 2.4.4. Comparativa entre las versiones 2012 y 2015

**Tabla 3**

*Comparativa técnica entre versiones 2012 y 2015*

<b>Característica</b>	<b>IEEE 802.15.4g (2012)</b>	<b>IEEE 802.15.4-2015 (incorpora SUN)</b>
Ámbito	Redes de servicios públicos inteligentes (Smart Grid)	Redes inteligentes (Smart Grid, ciudad inteligente)
Bandas de frecuencia	868/915 MHz, 2.4 GHz ISM	Mismas bandas (añade perfiles adicionales)
Modulación obligatoria	GFSK a 50 kbps	GFSK a 50 kbps
Modulaciones opcionales	Variantes de O-QPSK, OFDM (SUN-OFDM opcional)	SUN-OQPSK, SUN-OFDM y otras (multi-modulación)
Velocidad de datos	6.25–800 kbps (depende de parámetros PHY)	6.25–800 kbps (igual rango, con más opciones OFDM)
Tamaño de trama máximo	PPDU hasta 2047 bytes	PPDU hasta 2047 bytes
Enfoque	Primeras especificaciones SUN PHY	Integración completa de SUN, mejora la interoperabilidad

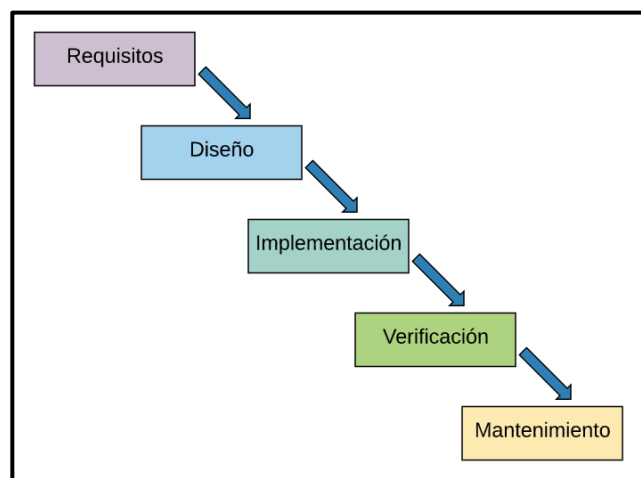
### CAPÍTULO III: Diseño e Implementación

El presente capítulo contiene la información técnica necesaria para el diseño que debe tener la red de comunicación, implementando los nodos 802.15.4g a diferentes distancias y configuraciones de radio, así como la selección en forma técnica de los elementos y softwares utilizados que formarán parte para su funcionamiento como de su configuración. Todo esto de manera estructurada para obtener un funcionamiento correcto sin que exista la presencia de interrupciones durante el proceso.

#### 3.1 Establecimiento de la metodología de diseño

La metodología empleada para el diseño de la red de comunicación fue el modelo en cascada, el cual sigue un flujo secuencial de fases interconectadas que se repiten y refinan mediante pruebas de funcionamiento hasta validar el cumplimiento de los objetivos. Como se muestra en la Figura 12, cada etapa desde el análisis de requisitos hasta la verificación final se retroalimenta de manera cíclica, permitiendo iterar tantas veces como sea necesario para asegurar la consecución de la meta propuesta.

**Figura 12**  
*Metodología de diseño - Modelo en Tipo Cascada*



Nota: Modificada de (Laoyan, 2025)

Como se pudo observar en la Figura 13 el modelo en tipo cascada en el que se basó consta de cinco etapas:

1. Análisis de requisitos: investigación bibliográfica de las diferentes tecnologías LPWAN como el estándar IEEE 802.15.4g para poder implementar correctamente un testbed y poder así analizar las modulaciones MR-FSK, MR-OFDM, MR-O-QPSK.
2. Diseño: selección de los componentes e instrumentos que se van a utilizar de acuerdo con los parámetros y criterios de selección impuesto en el capítulo 2. Además del establecimiento de la topología de la red que se va a utilizar para cumplir el objetivo del proyecto.
3. Implementación: hace referencia al montaje del proyecto con cada uno de los componentes como también de la utilización de los softwares tanto para la configuración como análisis de las diferentes modulaciones descritas para el alcance del cumplimiento del proyecto.
4. Pruebas de validación: verificación del sistema que cumple con los requisitos de desempeño en las distancias de medición y registro de métricas en cada escenario y comparación entre MR-FSK, MR-OFDM, MR-OQPSK,
5. Análisis de Resultados: determinar las configuraciones de radio óptimas según la distancia y exigencia de tasa de entrega entre 2FSK, OQPSK y OFDM.

### **Método descriptivo**

Enfocado en la descripción del comportamiento de las diferentes modulaciones MR-FSK, MR-OFDM, MR-O-QPSK, mediante la observación y el uso de un software de análisis y configuración para que la información recopilada y analizada sea usada y replicada para futuros proyectos relacionados.

## Método experimental

Consiste en el diseño e implementación de una red de comunicación en la cual cada uno de los nodos de RX se encontrarán a una distancia creciente del nodo de TX, con la finalidad de analizar los distintos parámetros de transmisión en un enlace y observar que tipo de modulación de los previamente descritos según las que establece el estándar es recomendable para cada parámetro dependiendo de la distancia.

### 3.2 Requerimientos del sistema

#### 3.2.1. Cobertura y alcance deseados

Para garantizar que la red IEEE 802.15.4g diseñada sea capaz de cubrir eficientemente un área determinada, se estableció tres distancias de referencia para la evaluación del enlace. Las cuales son **420 m**, **700 m** y **1000 m**, con la finalidad de medir el desempeño en entornos de corto, medio y largo alcance, estas distancias se las escogieron basándose en estudios previos que han demostrado su relevancia práctica en escenarios reales.

- Alcance de 420 m: Corresponde a la distancia máxima a la que se mantiene un alto Packet Delivery Ratio (PDR) empleando configuraciones de mayor tasa de datos en línea de vista (LoS). Además, permite evaluar el comportamiento de modos OFDM de alta velocidad en tramos moderados, donde la atenuación es relativamente baja.
- Alcance de 700 m: Representa el rango óptimo para configuraciones de baja tasa de datos como el FSK 50, donde se prioriza la robustez por encima de la velocidad y se puede lograr un  $PDR \geq 95\%$  en LoS. Esta distancia sirve de base para comparar el rendimiento entre FSK y OFDM en condiciones de dispersión de nodos.
- Alcance de 1000 m: Esta distancia establecida se la utiliza para determinar la viabilidad de enlaces de largo alcance, especialmente en topografías favorables como colinas o

terrenos con elevaciones, permitiendo evaluar la cobertura máxima posible sin repetidores adicionales. Además, permite cuantificar la degradación del enlace y la necesidad de mecanismos de retransmisión en escenarios extensos.

Para cada distancia se medirán los parámetros clave de calidad de enlace (PDR) en condiciones reales de campo, lo que facilitará la selección de la configuración PHY óptima según los resultados que se obtenga y sean aptos para la aplicación deseada.

### **3.2.2. *Requerimientos energéticos***

- Duración de batería: En donde cada nodo debe operar sin reemplazo de batería debido a que el consumo promedio debe ser bajo en transmisión y en reposo, por lo que se debe calcular la capacidad necesaria para que esto se cumpla.
- Gestión de energía: Implementar situaciones de reposo para que en el momento de la transmisión de información no existan pérdidas, debido a la baja capacidad de la batería o configuración. Por lo que tanto los envíos y recepción de información deben ser programados.

### **3.2.3. *Calidad del enlace***

Dentro de este aspecto se puede mencionar el indicador de PDR, el cual básicamente se describe como un indicador que mide la fiabilidad de la comunicación midiendo el porcentaje de paquetes correctamente recibidos respecto al total de paquetes transmitidos.

Un PDR cercano al 100 % indica un enlace robusto y libre de pérdidas, mientras que valores inferiores señalan problemas de atenuación, interferencia o desajuste en parámetros de radio. En la metodología de este proyecto, el PDR se emplea en cada fase de prueba para validar configuraciones de modulación, potencia y ubicación de nodos, permitiendo iterar el diseño hasta

alcanzar el umbral mínimo de entrega de paquetes establecido. Este criterio garantiza que la red cumpla los requisitos de fiabilidad antes del despliegue definitivo en campo.

### 3.2.4. *Intensidad de señal*

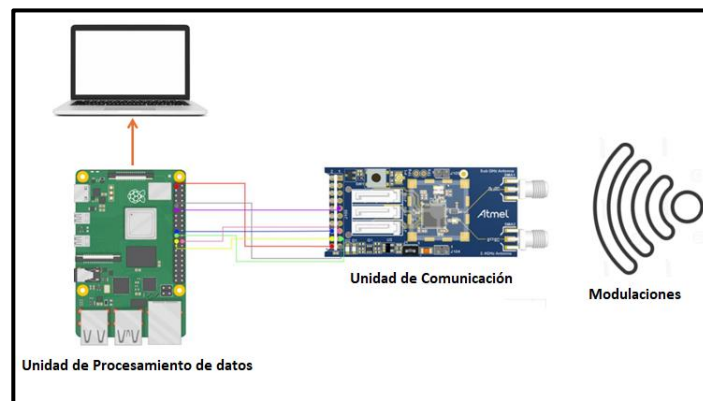
- Umbral mínimo operativo: Definir nivel de RSSI donde el demodulador mantiene un rango de error aceptable según la modulación seleccionada.
- Mapeo de cobertura: Generar una representación gráfica de datos en donde los valores se representen mediante colores de RSSI sobre el área en donde se está aplicando el análisis de las modulaciones.

## 3.3 Diseño

### 3.3.1. *Selección de componentes*

**3.3.1.1. Hardware.** El diseño de la red se compone a partir de una unidad de comunicación que sea compatible con IEEE 802.15.4g y una unidad que tenga la factibilidad del procesamiento de datos, para que el análisis de las diferentes modulaciones y la posterior selección de la más óptima sea totalmente justificado. Esto se lo puede observar de mejor manera en la siguiente Figura 13 en donde se visualiza tanto la unidad de comunicación y la unidad de procesamiento.

**Figura 13**  
*Esquema de hardware*



Como se pudo observar en la Figura se encuentran los elementos que conformaran el proyecto, así como también de su conexionado de forma simplificada. Este conexionado se lo detallará más adelante con mejor precisión, cuando ya se hayan seleccionado los componentes idóneos para establecer la red deseada para el análisis de las modulaciones establecidas con anterioridad.

**3.3.1.1.1. Unidad de Comunicación.** Existen una gran variedad de componentes de radio que puedan cumplir con la IEEE 802.15.4g, pero las más destacables para este estudio se los puede evidenciar en la siguiente Tabla 4 en donde se detalla cada uno en diferentes aspectos clave para su posterior selección.

**Tabla 4**  
*Comparativa entre módulos y placas de comunicación compatibles con IEEE 802.15.4g*

<b>Parámetro</b>	<b>Atmel AT86RF215</b>	<b>TI CC1312R</b>	<b>STM32 WL55 (ST)</b>	<b>EFR32 FG23 (Silicon Labs)</b>
<b>Banda de operación</b>	863 – 928 MHz y 2.4 GHz	169 / 410 / 868 MHz	169 / 433 / 868 MHz	868 / 915 MHz
<b>Modulaciones soportadas</b>	FSK, O-QPSK, SUN-OFDM	2-FSK, O-QPSK	FSK, BPSK, OOK	2-FSK, O-QPSK
<b>Sensibilidad típica</b>	-138 dBm (FSK, 2 kbps)	-121 dBm (2-FSK)	-126 dBm (FSK)	-129 dBm (2-FSK)
<b>Potencia de salida</b>	hasta +14 dBm	hasta +14 dBm	hasta +15 dBm	hasta +20 dBm
<b>Link budget</b>	~152 dB	~135 dB	~141 dB	~149 dB
<b>Interfaz Host</b>	SPI	SPI / UART	SPI	SPI
<b>Corriente en RX</b>	~4.0 mA	~3.7 mA a +14 dBm	~2.5 mA a +15 dBm	~3.5 mA a +20 dBm

Parámetro	Atmel AT86RF215	TI CC1312R	STM32 WL55 (ST)	EFR32 FG23 (Silicon Labs)
<b>Corriente en TX</b>	~25 mA a +14 dBm	~24 mA a +14 dBm	~24 mA a +15 dBm	~28 mA a +20 dBm
<b>Protocolos de red</b>	IEEE 802.15.4 g (nativo)	requiere TI-RTOS + HAL	integrado S2-LP	SDK propietario
<b>Ecosistema SW</b>	Microchip MPLAB + Libs	TI SimpleLink™	STM32CubeMX	Gecko SDK
<b>Dimensiones (mm)</b>	chip: 3.5 × 3.8 × 0.5	módulo: 25 × 16 × 2.2	módulo: 38 × 18 × 5	módulo: 23 × 15 × 2
<b>Costo aproximado (USD)</b>	~4 – 8 (solo chip)	~5 – 7	~10 – 15	~8 – 12

Como se pudo observar al comparar los distintos componentes, el **Atmel AT86RF215** se distingue por su capacidad dual de operar tanto en bandas sub-GHz como en 2.4 GHz y por ofrecer soporte nativo a las tres familias de PHY definidas en IEEE 802.15.4g (MR-FSK, MR-OQPSK y MR-OFDM). Esta versatilidad permite ajustar la red según requisitos de alcance o robustez, sin necesidad de hardware adicional. Su sensibilidad excepcional y un link-budget de aproximadamente 152 dB facilitan enlaces de largo alcance en campo abierto sin recurrir a repetidores, mientras que el ecosistema de desarrollo en MPLAB X con las bibliotecas de Microchip acelera significativamente la implementación del firmware. Es decir que presenta prestaciones adecuadas en cuanto a rango de frecuencias, rendimiento de enlace y facilidad de integración, volviéndolo en la opción más adecuada para un despliegue fiable y escalable en entornos LPWAN de gran extensión.

Como parte opcional se tiene considerado el uso del módulo **OPENMOTE-B** por ser una solución en el que se puede encontrar todo en uno, partiendo desde la integración de un microcontrolador, radio sub-GHz y USB-UART en un solo PCB de tamaño reducido. Su ecosistema de software y el soporte nativo para IEEE 802.15.4 facilitan la carga de firmware y la depuración sin necesidad de hardware adicional. Además, gracias a su bajo consumo y coste accesible permite prototipar rápidamente nodos de censado, permitiendo acelerar la fase de pruebas de funcionamiento mediante una comparativa más detallada en cada una de las modulaciones establecidas.

**3.3.1.1.2. Unidad de Procesamiento de Datos.** En cuanto al procesamiento de los datos obtenidos por la unidad de comunicación seleccionada pueden existir una gran variedad de microcontroladores aptos para este campo. Pero para este proyecto se tiene pensado los Raspberry para la posterior selección del más idóneo en cuanto a aplicación deseada del proyecto y cumplimiento de parámetros. En la siguiente Tabla 5 se puede observar la comparativa entre estos en cuanto a diferentes parámetros clave de análisis.

**Tabla 5**  
*Comparativas de Raspberry*

<b>Característica</b>	<b>Raspberry Pi 3</b>	<b>Raspberry Pi 4 Model B</b>	<b>Raspberry Pi 5</b>
	Broadcom BCM2837,	Broadcom BCM2711,	Broadcom BCM2712,
<b>Procesador</b>	4 × Cortex-A53 @1.2–1.4 GHz	4 × Cortex-A72 @1.5 GHz	4 × Cortex-A76 @2.4 GHz
<b>Memoria RAM</b>	1 GB LPDDR2	2 GB / 4 GB / 8 GB LPDDR4	4 GB / 8 GB LPDDR4X

Característica	Raspberry Pi 3	Raspberry Pi 4 Model	
		B	
<b>Conectividad</b>			
<b>Ethernet</b>	10/100 Mbps	10/100/1000 Mbps	10/100/1000 Mbps
<b>Puertos USB</b>	4 × USB 2.0	2 × USB 2.0 + 2 × USB 3.0	2 × USB 2.0 + 2 × USB 3.0
<b>Salida vídeo</b>	HDMI Full-Size	2 × micro-HDMI (4K60)	2 × micro-HDMI (4K60)
<b>Wi-Fi</b>	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n/ac (2×2 MIMO)	802.11 b/g/n/ac/ax (2×2 MIMO)
<b>Bluetooth</b>	4.1 (B) / 4.2 (B+)	5.0	5.3
<b>Alimentación</b>	5 V=2.5 A (Micro-USB)	5 V=3 A (USB-C)	5 V=3 A (USB-C PD)
<b>GPIO</b>	40 pines	40 pines	40 pines
<b>Consumo típico</b>	~2.5 W	3–7 W	3–8 W
<b>Precio aproximado</b>	35 USD	35–75 USD	60–90 USD

Como se pudo apreciar al comparar las distintas plataformas de computación embebida consideradas, el **Raspberry Pi 3** se distingue por ofrecer un balance ideal entre capacidad de proceso, consumo energético moderado y un conjunto de interfaces versátiles que facilitan la interconexión con sensores y módulos de radio en el testbed. Su arquitectura de cuatro núcleos ARM Cortex-A53 a 1,2 GHz y 1 GB de RAM permite ejecutar sin dificultades las pilas de

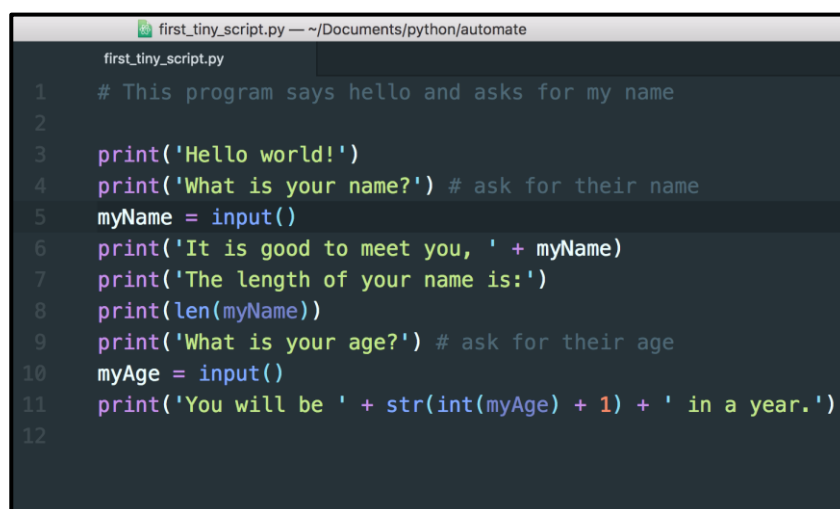
comunicaciones y las rutinas de registro de datos, mientras que su compatibilidad con distribuciones Linux ligeras y herramientas estándar como Python y C/C++ acelera el desarrollo y la depuración. Además, su amplia comunidad de soporte y el bajo costo del hardware reducen riesgos y plazos, y su factor de forma compacto favorece el diseño de nodos portátiles y energéticamente autónomos. Por todas estas razones, el Raspberry Pi 3 se eligió la plataforma más idónea para implementar y evaluar las funcionalidades del testbed en campo abierto.

Tanto la unidad de comunicación como la de procesamiento de datos fueron seleccionados específicamente para que cumplan con la aplicación y soporte de la banda 868 MHz como frecuencia principal para el cumplimiento legal y optimización de rendimiento en las bandas ISM sub-GHz establecidos en Ecuador por el ARCOTEL.

**3.3.1.2. Software.** Dentro de este aspecto se puede detallar tanto los programas y plataformas necesarios para configuración y análisis para el cumplimiento de diseño de la red deseada para las diferentes modulaciones de estudios especificados con anterioridad.

#### **3.3.1.2.1. Python**

**Figura 14**  
*Software Python*

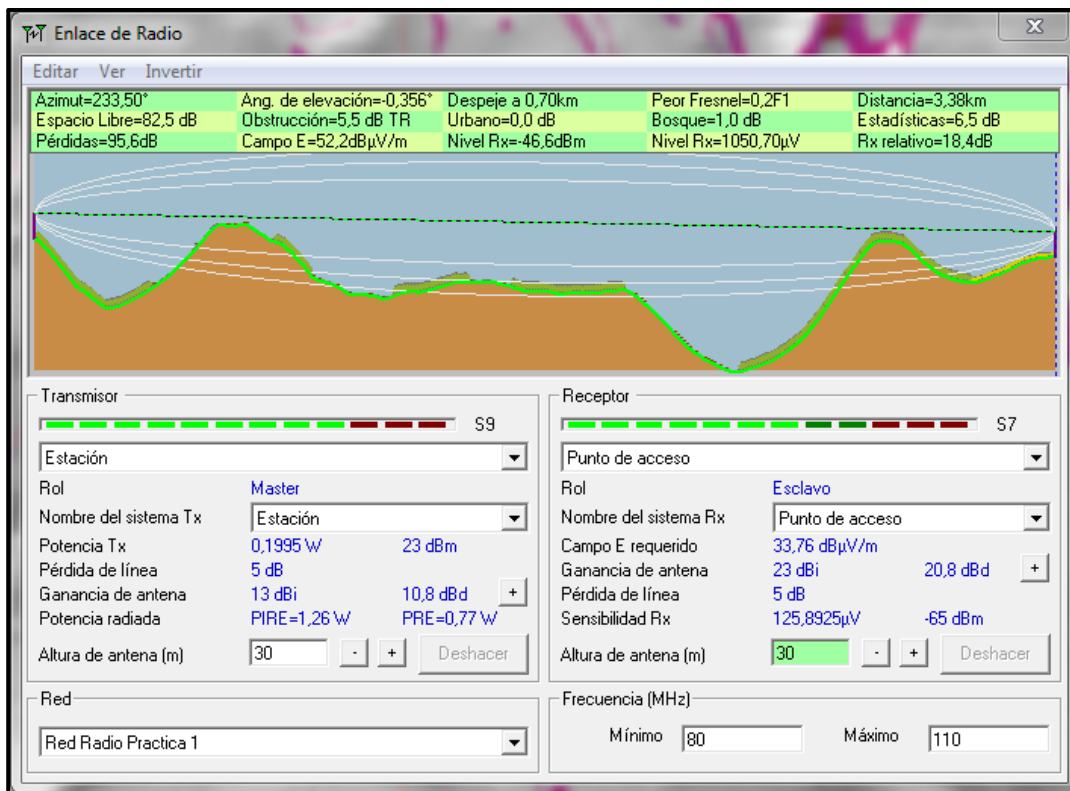
A screenshot of a code editor window showing a Python script named 'first\_tiny\_script.py'. The script contains 12 lines of code. Line 1 is a comment: '# This program says hello and asks for my name'. Line 2 is empty. Line 3: 'print('Hello world!')'. Line 4: 'print('What is your name?') # ask for their name'. Line 5: 'myName = input()'. Line 6: 'print('It is good to meet you, ' + myName)'. Line 7: 'print('The length of your name is:')'. Line 8: 'print(len(myName))'. Line 9: 'print('What is your age?') # ask for their age'. Line 10: 'myAge = input()'. Line 11: 'print('You will be ' + str(int(myAge) + 1) + ' in a year.')'. Line 12 is empty. The code is color-coded: comments are grey, strings are red, and code is white on a dark background.

```
first_tiny_script.py — ~/Documents/python/automate
first_tiny_script.py
1  # This program says hello and asks for my name
2
3  print('Hello world!')
4  print('What is your name?') # ask for their name
5  myName = input()
6  print('It is good to meet you, ' + myName)
7  print('The length of your name is:')
8  print(len(myName))
9  print('What is your age?') # ask for their age
10 myAge = input()
11 print('You will be ' + str(int(myAge) + 1) + ' in a year.')
12
```

Se optó por utilizar Python como lenguaje de programación principal del proyecto debido a su sencillez sintáctica y su extenso ecosistema de bibliotecas científicas y de redes. En el Raspberry Pi 3, Python funciona de forma nativa sobre Linux, lo que permite desarrollar y depurar scripts de adquisición de datos, procesamiento de señales y visualización directamente en el nodo sin necesidad de cruzar compilaciones complejas, estas razones son más que suficientes por lo que es la opción idónea para implementar rápidamente las funcionalidades de control, registro y análisis en el testbed.

### 3.3.1.2.2. *RadioMobile*

**Figura 15**  
*Software RadioMobile*



La utilización de RadioMobile responde a la necesidad de planificar la red IEEE 802.15.4g en la banda sub-GHz con la mayor precisión posible antes del despliegue físico. Su capacidad para modelar la propagación considerando la topografía y la vegetación del entorno, junto con la

simulación de distintos escenarios de modulación como MR-FSK, MR-O-QPSK y SUN-OFDM garantiza que la distribución de nodos cubra las distancias objetivo con un alto PDR. Además, la generación ágil de mapas de cobertura minimiza los tiempos y costos de prueba en campo.

### **3.3.2. Configuración de parámetros de radio y modulación**

**3.3.2.1. Selección de las modulaciones a analizar.** Para maximizar la llegada de paquetes en escenarios con 802.15.4g, se usarán explícitamente velocidades bajas de cada modulación, específicamente 2FSK a 50 kbps, OFDM a 100 kbps y OQPSK a 6.25 kbps. A continuación, se detalla el comportamiento esperado de cada modo en términos de alcance, sensibilidad y confiabilidad del enlace.

**3.3.2.1.1. 2FSK a 50 kbps.** Se caracteriza por tener modo obligatorio (Mode 1) de IEEE 802.15.4g, lo que permite emplear 2-FSK con índice de modulación 1.0, ancho de canal de 200 kHz y espectro ensanchado para mejorar la resistencia al ruido. Sensibilidad de alrededor de -138 dBm para 50 kbps en bandas de 863–870 MHz, lo que permite un enlace de hasta 152 dB con +14 dBm de potencia.

Estudios demuestran un  $PDR \geq 95\%$  a distancias de hasta 700 m en línea de vista, incluso con vegetación moderada, esto se debe a su excelente robustez y bajo requerimiento de señal mínimo, lo que lo vuelve ideal para asegurar la entrega de la mayoría de los paquetes en entornos ruidosos y amplios.

**3.3.2.1.2. OFDM a 100 kbps.** Contiene una sensibilidad aproximadamente de -103 dBm para 100 kbps OFDM link-budget de  $\sim 117$  dB a +14 dBm, en donde con un rendimiento de  $PDR \geq 90\%$  a 420 m en entornos con multipath y vegetación densa, gracias a la resistencia de OFDM al desvanecimiento. Todo esto gracias a que tiene un mejor compromiso entre velocidad y

robustez, para permitir la reducción de tiempo de transmisión y consecuentemente un consumo energético por paquete.

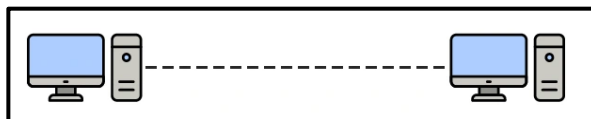
**3.3.2.1.3. OQSPK a 6.25 kbps.** Caracterizado por tener una sensibilidad típica que alcanza hasta -140 dBm siendo el modo con mayor sensibilidad dentro de 802.15.4g, lo que se traduce en un enlace superior a 154 dB con +14 dBm de salida. Permitiendo mantener un PDR > 98 % a distancias cercanas a 1000 m en condiciones de línea de vista y con alta atenuación. Maximizando la fiabilidad en la entrega de paquetes en donde la latencia es menos relevante.

En resumen, se puede decir que el 2FSK a 50 kbps garantiza un alto PDR hasta 700 m gracias a su elevada sensibilidad, el OQPSK a 6.25 kbps extiende el alcance hasta 1000 m con un PDR cercano al 99%, aplicable a datos críticos con alta atenuación y por último el OFDM a 100 kbps admite transmisiones rápidas en enlaces de corto a medio alcance, en este caso 420 m logrando una buena fiabilidad y menor latencia. Todas estas velocidades son idóneas para maximizar la probabilidad de entrega de paquetes sin la presencia de pérdidas o fallas durante el proceso.

### 3.3.3. *Diseño de la topología de red*

**3.3.3.1. Selección de la arquitectura de red.** En este aspecto se tiene pensado la topología de red punto a punto, esto debido a que consiste en un enlace dedicado y directo entre un nodo transmisor y un nodo receptor, lo que simplifica la gestión de la red y reduce la complejidad del protocolo de enrutamiento como se lo puede evidenciar en la siguiente Figura 16.

**Figura 16**  
*Topología punto a punto*



Esto es conveniente ya que al utilizar este tipo topología sobre la banda ISM de 868 MHz se aprovecha al máximo el enlace del módulo ATREB215-XPRO-A que contiene el microchip Atmel AT86RF215, lo que permite alcanzar distancias de hasta 1000 m sin la necesidad de nodos intermedios ni ruteo adicional.

Esto se traduce en un menor consumo energético al evitar retransmisiones múltiples y en una mayor predictibilidad de la latencia. La simplicidad del enlace directo también facilita el dimensionamiento de la red y el despliegue de nuevos nodos, esto se lo puede decir debido a que basta con posicionar cada transmisor en puntos predeterminados del campo y verificar el RSSI con la pasarela central, sin necesidad de configurar rutas o tablas de reenvío en cada dispositivo. Además, al eliminar topologías en malla o en estrella con múltiples saltos se reduce la complejidad del firmware y se minimizan los posibles puntos de fallo, logrando así que se incremente la fiabilidad del sistema en condiciones climáticas variables.

**3.3.3.2. Distribución de los nodos.** En este aspecto se puede mencionar que se describen los procedimientos empleados para determinar la distribución óptima de los nodos en el testbed. Primero, se desarrolló un cálculo teórico a partir de ecuaciones de enlace de punto a punto en resolución por distancia mediante las siguientes ecuaciones:

**Ecuación 1**  
*Pérdida en espacio libre*

$$L_{fs} = 20 * \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

**Ecuación 2**  
*Potencia isotrópica radiada equivalente*

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - L_{cables}$$

**Ecuación 3**  
*Potencia recibida*

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - L_{fs}$$

**Ecuación 4**  
*Margen del enlace*

$$\text{Margen} = P_{rx} - \text{Sensibilidad}$$

Todas estas ecuaciones aplicando las siguientes características, frecuencia de operación a 868 MHz con las diferentes modulaciones 2FSK-50, OFDM-100 y OQPSK-6.25 a las distancias establecidas de 420 m, 700 m y 1000 m se establecen ciertos parámetros como ganancia de antenas en Tx y Rx, potencia de transmisión, consideración de pérdidas totales, sensibilidad del receptor y finalmente la altura de la instalación de las antenas, todo esto con la finalidad de permitir estimar las distancias máximas de enlace con cada tipo de modulación. Posteriormente, estos valores se compararon y ajustaron mediante simulaciones en RadioMobile, herramienta que incorpora mapas de terreno real con el fin de validar en un entorno virtual las condiciones de cobertura y calidad de la señal antes de la implementación en campo.

**3.3.3.2.1. 2FSK-50**

**a. 420 metros**

Conociendo la distancia equivalentemente transformada de metros a kilómetros a 0.42 km se tiene respectivamente  $\log_{10}(d) = -0.3768$  y  $\log_{10}(f) = 2.9385$  se tiene los siguientes resultados.

$$L_{fs} = 20 * \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

$$L_{fs} = 20 * (-0.3768) + 20 * 2.9385 + 32.44$$

$$L_{fs} = 83.68 \text{ dB}$$

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - L_{cables}$$

$$PIRE = 14 + 2.4 - 0.5$$

$$PIRE = 15.9 \text{ dBm}$$

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - L_{fs}$$

$$P_{rx} = 15.9 + 2.4 - 83.68$$

$$P_{rx} = -65.38 \text{ dBm}$$

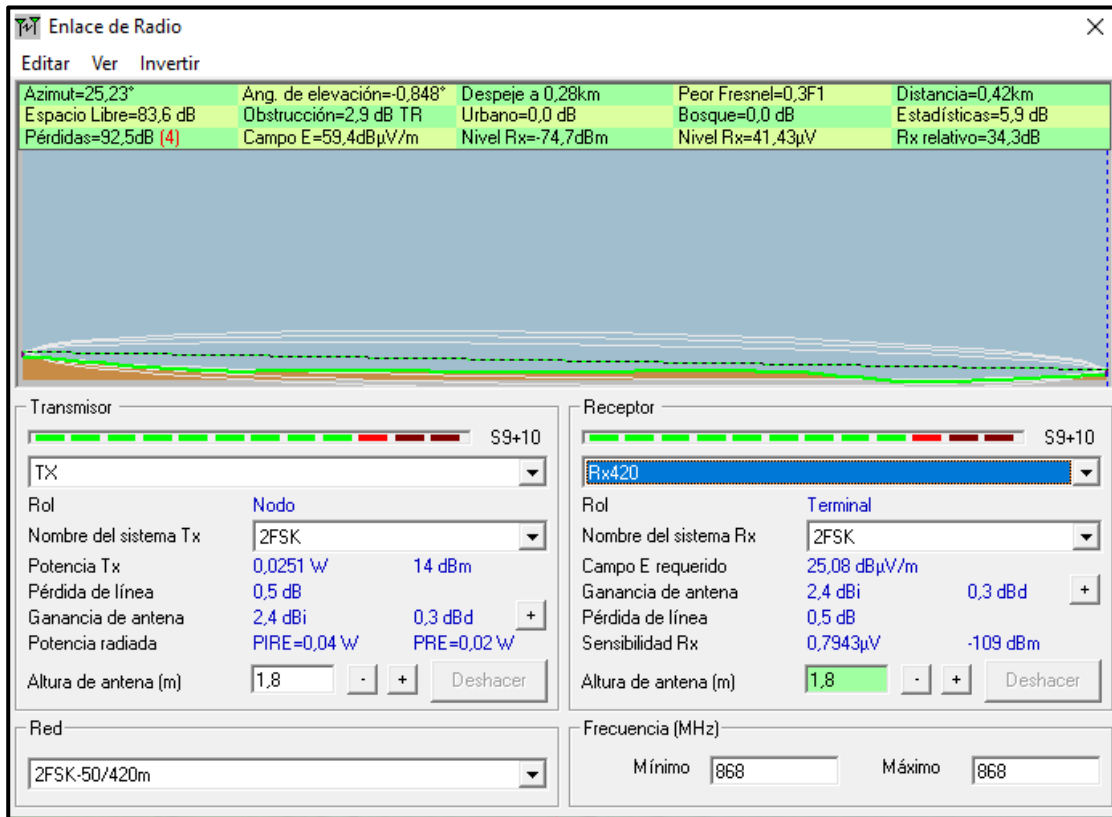
$$\text{Margen} = P_{rx} - \text{Sensibilidad}$$

$$\text{Margen} = -65.38 - (-109)$$

$$\text{Margen} = 43.62 \text{ dB}$$

Con respecto a la simulación en RadioMobile se puede visualizar la Figura 17 en donde se detalla de mejor manera los parámetros calculados teóricamente en el programa.

**Figura 17**  
Establecimiento de parámetros 2FSK-50 a 420 m en RadioMobile



El sistema presenta un margen superior a 34 dB por encima del umbral de sensibilidad, garantizando un enlace altamente confiable. La leve obstrucción en la zona de Fresnel no compromete la calidad del enlace.

Para una mejor visualización más realista sobre la distribución del terreno se puede observar la siguiente Figura 18, en donde se detalla la exportación de la información de RadioMobile a GoogleEarth. (Ver Anexo 4)

**Figura 18**  
Exportación de parámetros 2FSK-50 a 420 m de RadioMobile en GoogleEarth



**b. 700 metros**

Conociendo la distancia equivalentemente transformada de metros a kilómetros a 0.7 km se tiene respectivamente  $\log_{10}(d) = -0.1549$  y  $\log_{10}(f) = 2.9385$  se tiene los siguientes resultados.

$$L_{fs} = 20 * \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

$$L_{fs} = 20 * (-0.1549) + 20 * 2.9385 + 32.44$$

$$L_{fs} = 88.11 \text{ dB}$$

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - L_{cables}$$

$$PIRE = 14 + 2.4 - 0.5$$

$$PIRE = 15.9 \text{ dBm}$$

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - L_{fs}$$

$$P_{rx} = 15.9 + 2.4 - 88.11$$

$$P_{rx} = -69.81 \text{ dBm}$$

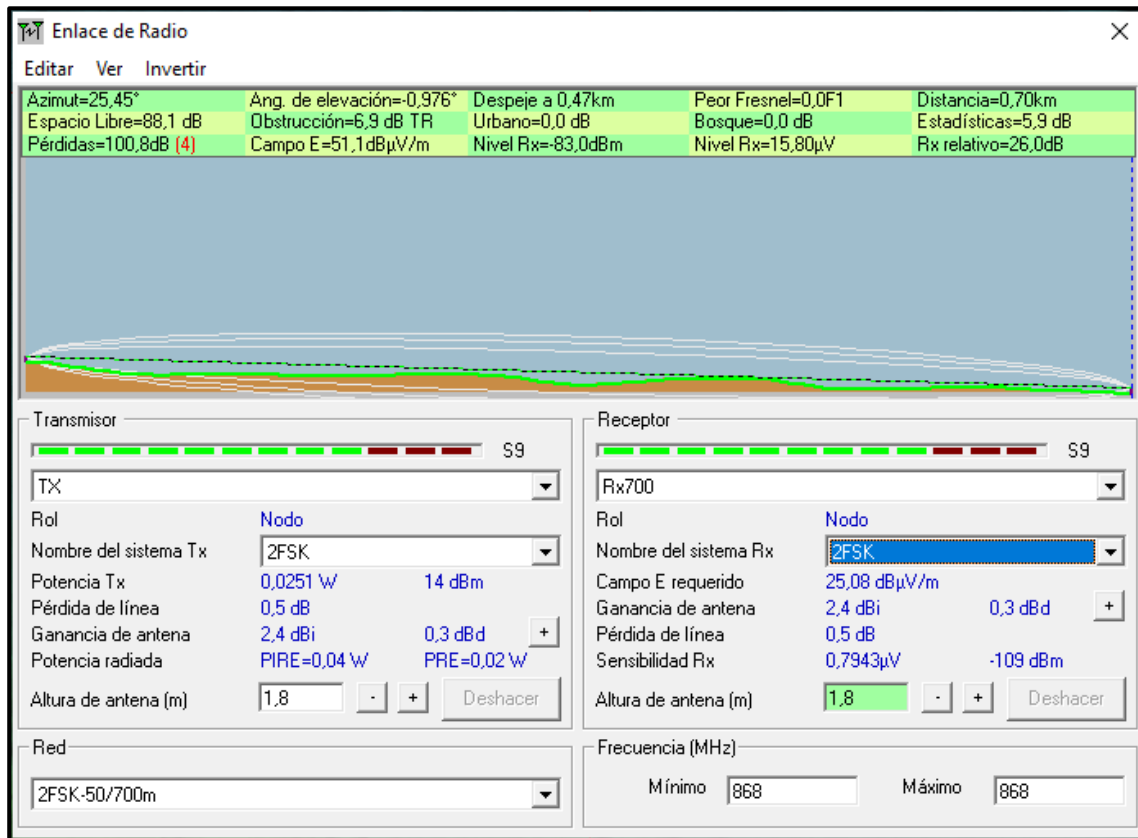
$$\text{Margen} = P_{rx} - \text{Sensibilidad}$$

$$\text{Margen} = -69.81 - (-109)$$

$$\text{Margen} = 39.19 \text{ dB}$$

Con respecto a la simulación en RadioMobile se puede visualizar la Figura 19 en donde se detalla de mejor manera los parámetros calculados teóricamente en el programa.

**Figura 19**  
Establecimiento de parámetros 2FSK-50 a 700 m en RadioMobile



A 700 metros el enlace mantiene un margen operativo aceptable de 26 dB. El despeje total de la zona de Fresnel asegura una buena propagación sin riesgo de interferencia por obstáculos. Para una mejor visualización más realista sobre la distribución del terreno se puede observar la siguiente Figura 20, en donde se detalla la exportación de la información de RadioMobile a GoogleEarth. (Ver Anexo 5)

**Figura 20**  
Exportación de parámetros 2FSK-50 a 700 m de RadioMobile en GoogleEarth



### c. 1000 metros

Conociendo la distancia equivalentemente transformada de metros a kilómetros a 1 km se tiene respectivamente  $\log_{10}(d) = 0$  y  $\log_{10}(f) = 2.9385$  se tiene los siguientes resultados.

$$L_{fs} = 20 * \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

$$L_{fs} = 20 * 0 + 20 * 2.9385 + 32.44$$

$$L_{fs} = 91.21 \text{ dB}$$

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - L_{cables}$$

$$PIRE = 14 + 2.4 - 0.5$$

$$PIRE = 15.9 \text{ dBm}$$

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - L_{fs}$$

$$P_{rx} = 15.9 + 2.4 - 91.21$$

$$P_{rx} = -72.91 \text{ dBm}$$

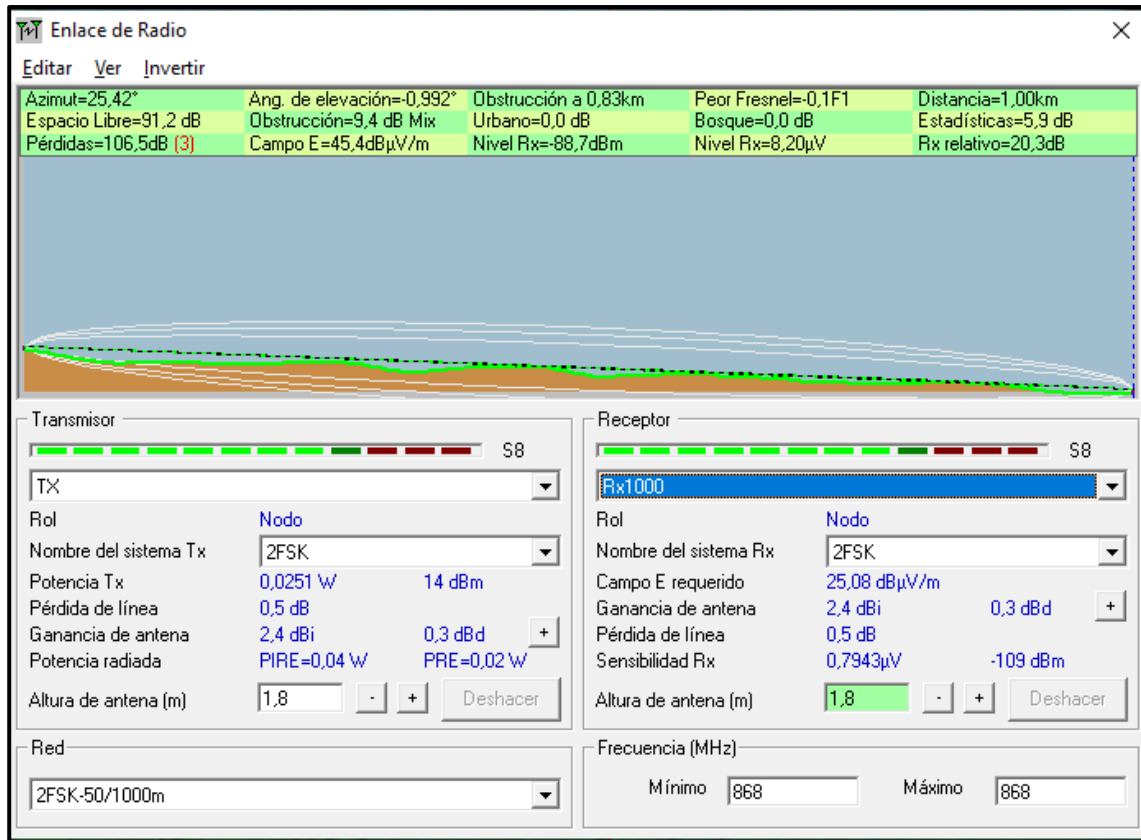
$$Margen = P_{rx} - Sensibilidad$$

$$Margen = -72.91 - (-109)$$

$$Margen = 36.09 \text{ dB}$$

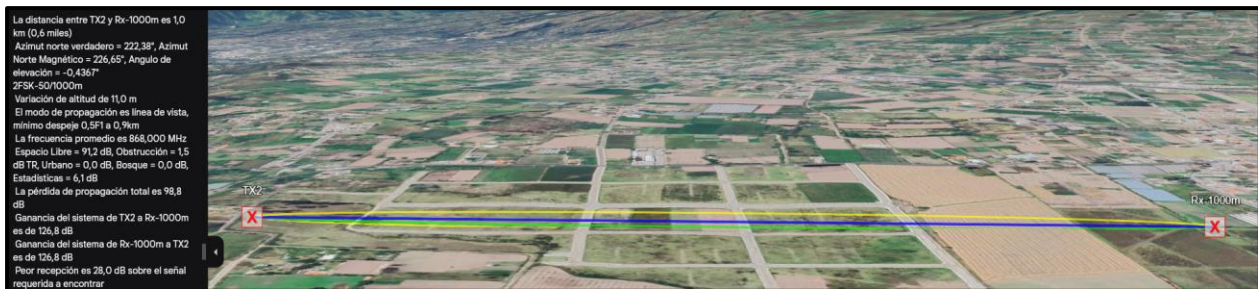
Con respecto a la simulación en RadioMobile se puede visualizar la Figura 21 en donde se detalla de mejor manera los parámetros calculados teóricamente en el programa.

**Figura 21**  
Establecimiento de parámetros 2FSK-50 a 1000 m en RadioMobile



Aunque el margen se reduce a 20.3 dB, el enlace sigue siendo viable. La ligera obstrucción en la zona de Fresnel no representa un riesgo inmediato, pero se recomienda mantener despejada la trayectoria ante posibles variaciones ambientales. Para una mejor visualización más realista sobre la distribución del terreno se puede observar la siguiente Figura 22, en donde se detalla la exportación de la información de RadioMobile a GoogleEarth. (Ver Anexo 6)

**Figura 22**  
Exportación de parámetros 2FSK-50 a 1000 m de RadioMobile en GoogleEarth



Otra forma de visualizar de los resultados obtenidos matemáticamente se los detalla a continuación en la siguiente Tabla 6 con los diferentes parámetros calculados para posteriormente realizar una comparativa entre los parámetros calculados con respecto a los obtenidos por RadioMobile.

**Tabla 6**  
Resultados obtenidos para la modulación 2FSK-50 calculada de forma matemática

<b>Distancia (km)</b>	<b><math>L_{fs}</math> (dB)</b>	<b>PIRE (dBm)</b>	<b><math>P_{rx}</math> (dBm)</b>	<b>Margen (dB)</b>
0.42km	83.68	15.9	-65.38	43.62
0.7 km	88.11	15.9	-69.81	39.19
1 km	91.21	15.9	-72.91	36.09

Con los parámetros considerados el enlace demuestra ser viable para distancias de hasta 1 km. La resolución de cada fórmula permite verificar el comportamiento del enlace paso a paso y comprobar que los márgenes de operación se mantienen seguros por encima de los 30 dB. Este enfoque refuerza la aplicabilidad de la modulación 2FSK-50 en sistemas de baja potencia para entornos IoT. Pero al presentarse siempre la caracterización de que en todo calculo siempre hay la factibilidad de error, por lo que a continuación se realizará un análisis comparativo entre los datos calculados con respecto al programa RadioMobile en la siguiente Tabla 7.

**Tabla 7**  
Comparativa entre los valores calculados matemáticamente con respecto a los RadioMobile para la modulación 2FSK-50

<b>Distancia</b>	<b><math>P_{rx}</math> (Calculado)</b>	<b><math>P_{rx}</math> (Radio Mobile)</b>	<b>Margen (Calculado)</b>	<b>Margen (Radio Mobile)</b>
<b>0.42 km</b>	-66.86	-74.7	42.14	34.3
<b>0.7 km</b>	-71.3	-83.0	37.7	26.0
<b>1 km</b>	-74.4	-88.7	34.6	20.3

Los valores obtenidos mediante cálculos manuales muestran un comportamiento teórico ideal basado en pérdidas por espacio libre. Por otro lado, Radio Mobile incorpora elementos adicionales como obstrucciones del terreno, despeje de la zona de Fresnel y estadísticas ambientales que explican por qué los valores de potencia recibida son ligeramente más bajos. A pesar de estas diferencias, los márgenes de enlace en ambos métodos coinciden en que el sistema es funcional hasta 1 km con márgenes superiores a 20 dB.

En resumen, se puede mencionar que la comparación entre el modelo teórico y la simulación práctica permite concluir que los cálculos manuales ofrecen una excelente base de predicción, mientras que Radio Mobile permite validar su viabilidad considerando condiciones reales. La coherencia entre ambos enfoques demuestra que el sistema basado en modulación 2FSK-50 a 868 MHz es técnicamente viable para distancias de hasta 1 km, reafirmando su uso en aplicaciones IoT y redes de sensores de bajo consumo energético.

### **3.3.3.2.2. OFDM-100**

#### **a. 420 m**

Conociendo la distancia equivalentemente transformada de metros a kilómetros a 0.42 km se tiene respectivamente  $\log_{10}(d) = -0.3768$  y  $\log_{10}(f) = 2.9385$  se tiene los siguientes resultados.

$$L_{fs} = 20 * \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

$$L_{fs} = 20 * (-0.3768) + 20 * 2.9385 + 32.44$$

$$L_{fs} = 83.68 \text{ dB}$$

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - L_{cables}$$

$$PIRE = 10 + 2.4 - 0.5$$

$$PIRE = 11.9 \text{ dBm}$$

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - L_{fs}$$

$$P_{rx} = 11.9 + 2.4 - 83.68$$

$$P_{rx} = -69.38 \text{ dBm}$$

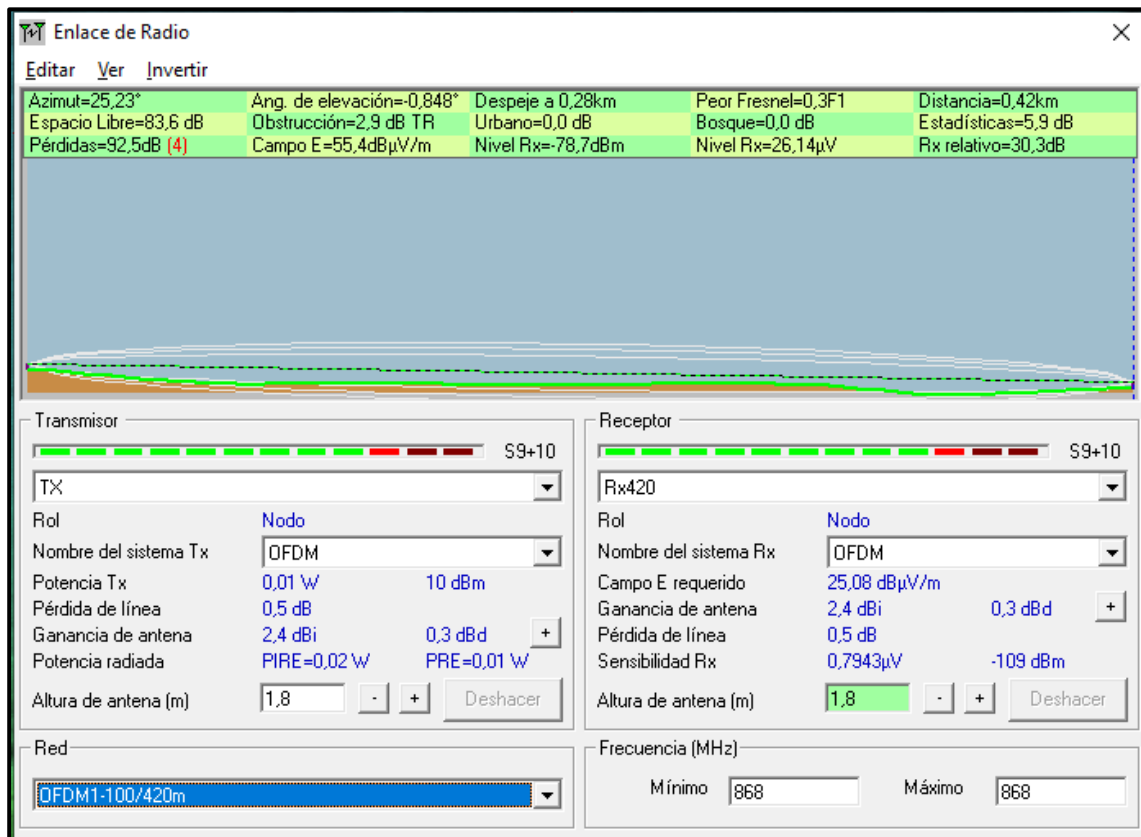
$$\text{Margen} = P_{rx} - \text{Sensibilidad}$$

$$\text{Margen} = -69.38 - (-109)$$

$$\text{Margen} = 39.62 \text{ dB}$$

Con respecto a la simulación en RadioMobile se puede visualizar la Figura 23 en donde se detalla de mejor manera los parámetros calculados teóricamente en el programa.

**Figura 23**  
Establecimiento de parámetros OFDM-100 a 420 m en RadioMobile



Como se pudo observar en la figura el nivel de señal recibido es de -78.7 dBm, resultando en un margen de enlace de 30.3 dB sobre la sensibilidad del receptor. La zona de Fresnel está

parcialmente despejada a 0.3F1, y el perfil del terreno no presenta obstrucciones significativas. Por lo que se puede mencionar que el enlace es sólido y permite utilizar modulaciones de mayor eficiencia dentro del perfil OFDM1-100. Para una mejor visualización más realista sobre la distribución del terreno se puede observar la siguiente Figura 24, en donde se detalla la exportación de la información de RadioMobile a GoogleEarth. (Ver Anexo 7)

**Figura 24**

*Exportación de parámetros OFDM-100 a 420 m de RadioMobile en GoogleEarth*



**b. 700 m**

Conociendo la distancia equivalentemente transformada de metros a kilómetros a 0.7 km se tiene respectivamente  $\log_{10}(d) = -0.1549$  y  $\log_{10}(f) = 2.9385$  se tiene los siguientes resultados.

$$L_{fs} = 20 * \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

$$L_{fs} = 20 * (-0.1549) + 20 * 2.9385 + 32.44$$

$$L_{fs} = 88.11 \text{ dB}$$

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - L_{cables}$$

$$PIRE = 10 + 2.4 - 0.5$$

$$PIRE = 11.9 \text{ dBm}$$

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - L_{fs}$$

$$P_{rx} = 11.9 + 2.4 - 88.11$$

$$P_{rx} = -73.81 \text{ dBm}$$

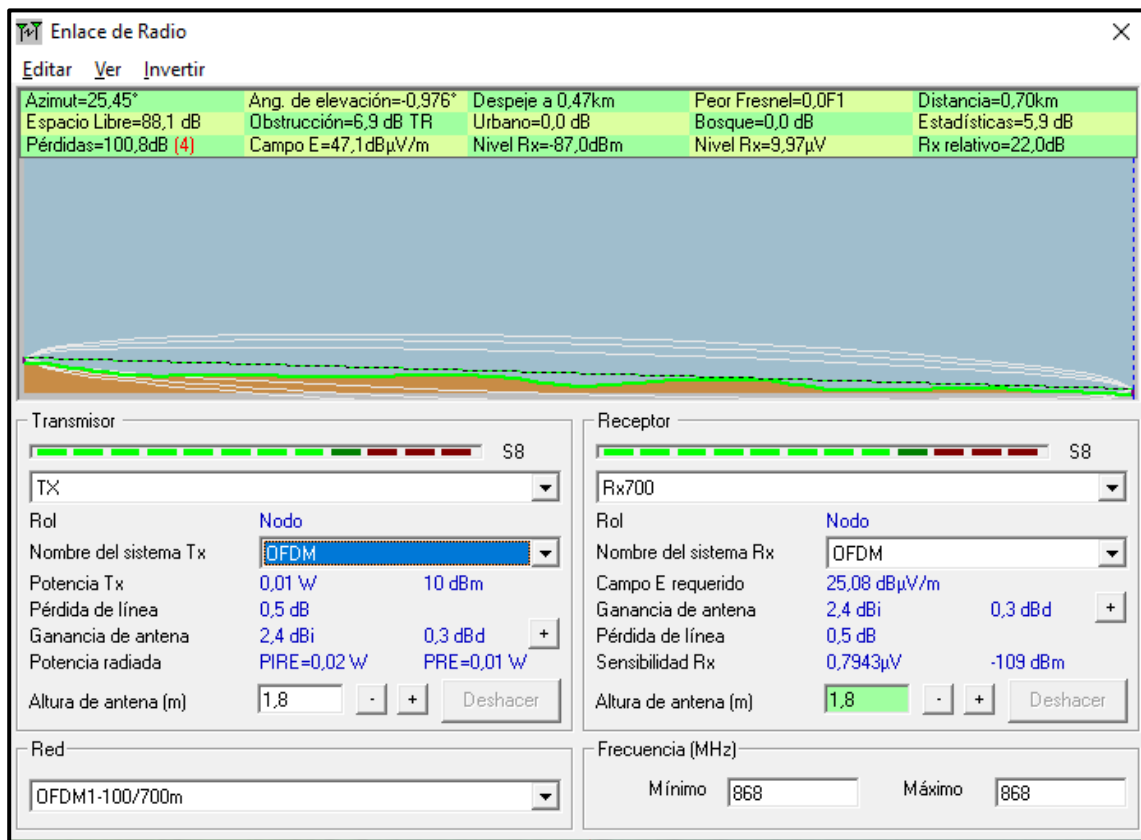
$$\text{Margen} = P_{rx} - \text{Sensibilidad}$$

$$\text{Margen} = -73.81 - (-109)$$

$$\text{Margen} = 35.19 \text{ dB}$$

Con respecto a la simulación en RadioMobile se puede visualizar la Figura 25 en donde se detalla de mejor manera los parámetros calculados teóricamente en el programa.

**Figura 25**  
Establecimiento de parámetros OFDM-100 a 700 m en RadioMobile



Como se pudo observar el nivel recibido es de -87.0 dBm, lo que ofrece un margen de 22 dB. Además de presenciar que la zona de Fresnel se encuentra completamente despejada a 0.0F1, lo que es ideal. Aunque hay una ligera obstrucción de terreno con un valor de 6.9 dB no afecta

significativamente el rendimiento. Por lo que se puede llegar a mencionar que este enlace sigue siendo confiable y estable para modulaciones medias como QPSK.

Para una mejor visualización más realista sobre la distribución del terreno se puede observar la siguiente Figura 26, en donde se detalla la exportación de la información de RadioMobile a GoogleEarth. (Ver Anexo 8)

**Figura 26**

*Exportación de parámetros OFDM-100 a 700 m de RadioMobile en GoogleEarth*



### c. 1000 m

Conociendo la distancia equivalentemente transformada de metros a kilómetros a 1 km se tiene respectivamente  $\log_{10}(d) = 0$  y  $\log_{10}(f) = 2.9385$  se tiene los siguientes resultados.

$$L_{fs} = 20 * \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

$$L_{fs} = 20 * 0 + 20 * 2.9385 + 32.44$$

$$L_{fs} = 91.21 \text{ dB}$$

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - L_{cables}$$

$$PIRE = 10 + 2.4 - 0.5$$

$$PIRE = 11.9 \text{ dBm}$$

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - L_{fs}$$

$$P_{rx} = 11.9 + 2.4 - 91.21$$

$$P_{rx} = -76.91 \text{ dBm}$$

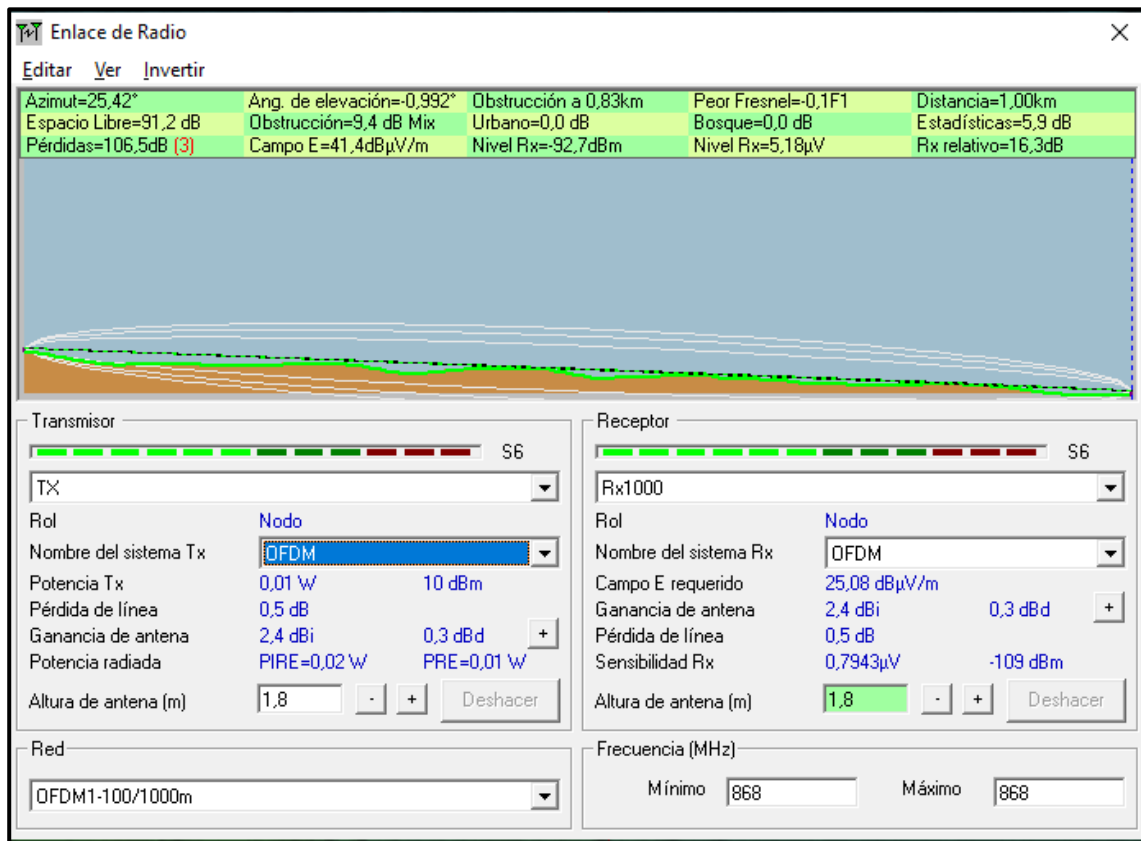
$$\text{Margen} = P_{rx} - \text{Sensibilidad}$$

$$\text{Margen} = -76.91 - (-109)$$

$$\text{Margen} = 32.09 \text{ dB}$$

Con respecto a la simulación en RadioMobile se puede visualizar la Figura 27 en donde se detalla de mejor manera los parámetros calculados teóricamente en el programa.

**Figura 27**  
Establecimiento de parámetros OFDM-100 a 1000 m en RadioMobile



Como se pudo evidenciar el nivel recibido es de -92.7 dBm con un margen de 16.3 dB, valor considerado el más bajo de los tres casos, en donde también se detalla que la zona de Fresnel está apenas despejada a 0.1F1 y existe una obstrucción significativa del terreno de un valor de 9.4 dB proyectando a establecerse que aunque el enlace es viable es más susceptible a degradación por condiciones externas, por lo que se recomienda usar modulaciones robustas como BPSK o

QPSK y considerar mejoras como mayor ganancia de antena. Para una mejor visualización más realista sobre la distribución del terreno se puede observar la siguiente Figura 28, en donde se detalla la exportación de la información de RadioMobile a GoogleEarth. (Ver Anexo 9)

**Figura 28**

*Exportación de parámetros OFDM-100 a 1000 m de RadioMobile en GoogleEarth*



Como aspecto analítico de los tres escenarios 420 m, 700 m y 1000 m en RadioMobile se puede decir que todos los enlaces son técnicamente viables bajo la configuración OFDM1-100 a 868 MHz. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia el nivel de señal recibido disminuye y el margen de enlace se reduce progresivamente, mientras que a 420 m se dispone de un margen excelente y condiciones óptimas a 700 m el enlace se mantiene estable, pero comienza a mostrar vulnerabilidades menores. A 1000 m el margen es el más ajustado y las condiciones del terreno generan mayores pérdidas, lo cual podría comprometer la estabilidad del enlace en condiciones reales. Por tanto, se recomienda adaptar la modulación, elevar las antenas o aumentar la ganancia en escenarios superiores a 700 m para mantener la calidad del enlace.

Para mejor visualización de los resultados obtenidos matemáticamente se los detalla a continuación en la siguiente Tabla 8 con los diferentes parámetros calculados.

**Tabla 8**

*Resultados obtenidos para la modulación OFDM-100 calculada de forma matemática*

<b>Distancia (km)</b>	<b><math>L_{fs}</math> (dB)</b>	<b>PIRE (dBm)</b>	<b><math>P_{rx}</math> (dBm)</b>	<b>Margen (dB)</b>
0.42km	83.68	11.9	-69.38	39.62

0.7 km	88.11	11..9	-73.81	35.19
1 km	91.21	11.9	-76.91	32.09

Como se pudo observar en la Tabla los resultados obtenidos muestran una clara disminución en la potencia recibida a medida que la distancia aumenta, lo que también reduce el margen de enlace. Aunque a 0.42 km el sistema tiene un margen aceptable, a 0.7 km y 1.0 km se acerca al límite de sensibilidad del receptor. Esto indica que para distancias superiores a 700 metros sería recomendable aumentar la ganancia de antenas o mejorar las condiciones del entorno para asegurar una comunicación estable en enlaces OFDM a 868 MHz. Pero al presentarse siempre la caracterización de que en todo calculo siempre hay la factibilidad de error, por lo que a continuación se realizará un análisis comparativo entre los datos calculados con respecto al programa RadioMobile en la siguiente Tabla 9.

**Tabla 9**  
*Comparativa entre los valores calculados matemáticamente con respecto a los RadioMobile para la modulación OFDM-100*

<b>Distancia</b>	<b><math>P_{rx}</math> (Calculado)</b>	<b><math>P_{rx}</math> (Radio Mobile)</b>	<b>Margen (Calculado)</b>	<b>Margen (Radio Mobile)</b>
<b>0.42 km</b>	-78.8	-78.7	30.2	30.3
<b>0.7 km</b>	-85.7	-87.0	23.3	22.0
<b>1 km</b>	-88.7	-92.7	20.3	16.3

Los resultados obtenidos mediante cálculos manuales y los generados en Radio Mobile presentan una excelente correlación, especialmente en la distancia de 420 metros donde el nivel de señal y el margen de enlace prácticamente coinciden. A 700 metros el RadioMobile muestra una pérdida levemente mayor reflejada en una disminución del nivel recibido y del margen de enlace, lo cual puede atribuirse a la consideración de obstrucciones del terreno en la simulación. En la distancia de 1000 metros la diferencia es más notoria con una caída de aproximadamente 4

dB en el margen respecto al cálculo manual, debido principalmente al perfil real del terreno y la obstrucción acumulada que RadioMobile integra en sus estimaciones. Esto evidencia la ventaja del modelo de simulación al incorporar factores de propagación más realistas, aunque los cálculos manuales siguen siendo una base muy útil para validar la viabilidad inicial de un enlace.

Ambos métodos concuerdan en la recomendación de reforzar el diseño del enlace en los aspectos de ganancia, altura y modulación para distancias superiores a 700 m, asegurando la estabilidad del sistema en condiciones reales. En resumen, se puede mencionar que la tabla comparativa demuestra que los resultados de los cálculos teóricos y las simulaciones en RadioMobile son coherentes en todos los casos, a pesar de presentar algunas ligeras diferencias en el nivel de señal y el margen de enlace, pero estos se deben principalmente a los factores adicionales que considera RadioMobile como el perfil del terreno y obstrucciones físicas, en los tres escenarios ambos métodos coinciden en que el enlace es viable, aunque a 1000 m el margen se reduce significativamente, por lo que esto evidencia la utilidad del cálculo manual para estimaciones preliminares, complementadas posteriormente con herramientas de simulación para ajustes finos.

### **3.3.3.2.3. OQPSK-6.25**

#### **a. 420 m**

Conociendo la distancia equivalentemente transformada de metros a kilómetros a 0.42 km se tiene respectivamente  $\log_{10}(d) = -0.3768$  y  $\log_{10}(f) = 2.9385$  se tiene los siguientes resultados.

$$L_{fs} = 20 * \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

$$L_{fs} = 20 * (-0.3768) + 20 * 2.9385 + 32.44$$

$$L_{fs} = 83.68 \text{ dB}$$

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - L_{cables}$$

$$PIRE = 14 + 2.4 - 0.5$$

$$PIRE = 15.9 \text{ dBm}$$

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - L_{fs}$$

$$P_{rx} = 15.9 + 2.4 - 83.68$$

$$P_{rx} = -65.38 \text{ dBm}$$

$$\text{Margen} = P_{rx} - \text{Sensibilidad}$$

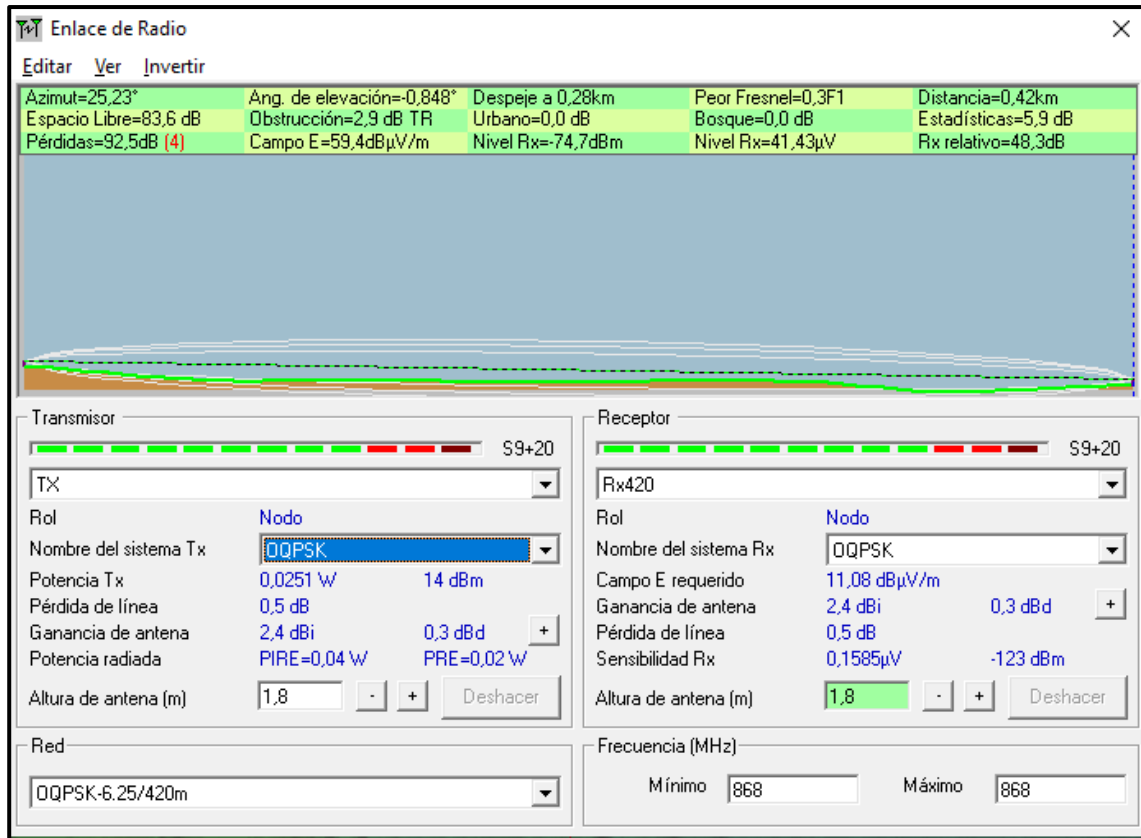
$$\text{Margen} = -65.38 - (-123)$$

$$\text{Margen} = 57.62 \text{ dB}$$

Con respecto a la simulación en RadioMobile se puede visualizar la Figura 29 en donde se detalla de mejor manera los parámetros calculados teóricamente en el programa.

**Figura 29**

*Establecimiento de parámetros OPSK-6.25 a 420 m en RadioMobile*



Como se pudo visualizar el nivel de señal recibido es de -74.7 dBm, resultando en un margen de enlace de 48.3 dB sobre la sensibilidad del receptor con una zona de Fresnel parcialmente despejada de 0.3F1 y el perfil del terreno no presenta obstrucciones críticas. Por lo que se puede decir que el enlace es robusto y muy estable para aplicaciones de bajo consumo, permitiendo una comunicación eficiente y confiable en redes IoT. Para una mejor visualización más realista sobre la distribución del terreno se puede observar la siguiente Figura 30, en donde se detalla la exportación de la información de RadioMobile a GoogleEarth. (Ver Anexo 10)

**Figura 30**  
Exportación de parámetros OQPSK-6.25 a 420 m de RadioMobile en GoogleEarth



**b. 700 m**

Conociendo la distancia equivalentemente transformada de metros a kilómetros a 0.7 km se tiene respectivamente  $\log_{10}(d) = -0.1549$  y  $\log_{10}(f) = 2.9385$  se tiene los siguientes resultados.

$$L_{fs} = 20 * \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

$$L_{fs} = 20 * (-0.1549) + 20 * 2.9385 + 32.44$$

$$L_{fs} = 88.11 \text{ dB}$$

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - L_{cables}$$

$$PIRE = 14 + 2.4 - 0.5$$

$$PIRE = 15.9 \text{ dBm}$$

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - L_{fs}$$

$$P_{rx} = 15.9 + 2.4 - 88.11$$

$$P_{rx} = -69.81 \text{ dBm}$$

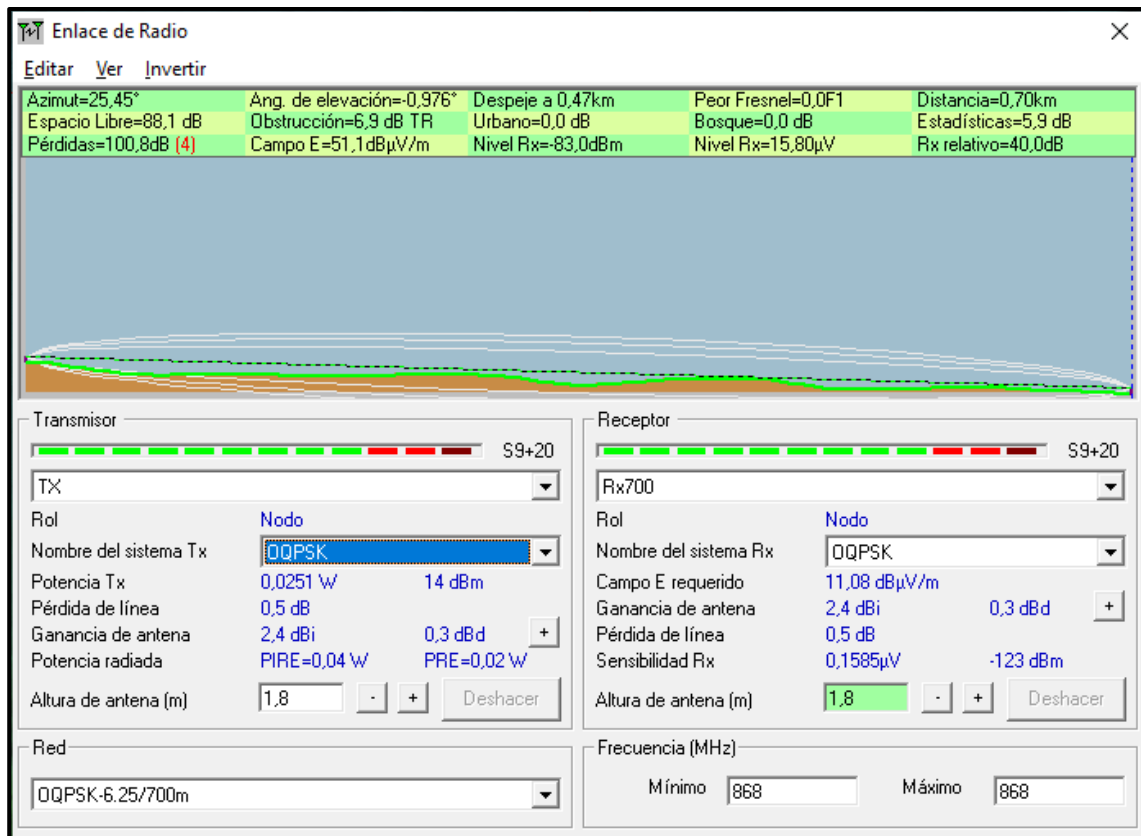
$$Margen = P_{rx} - \text{Sensibilidad}$$

$$Margen = -69.81 - (-123)$$

$$Margen = 53.19 \text{ dB}$$

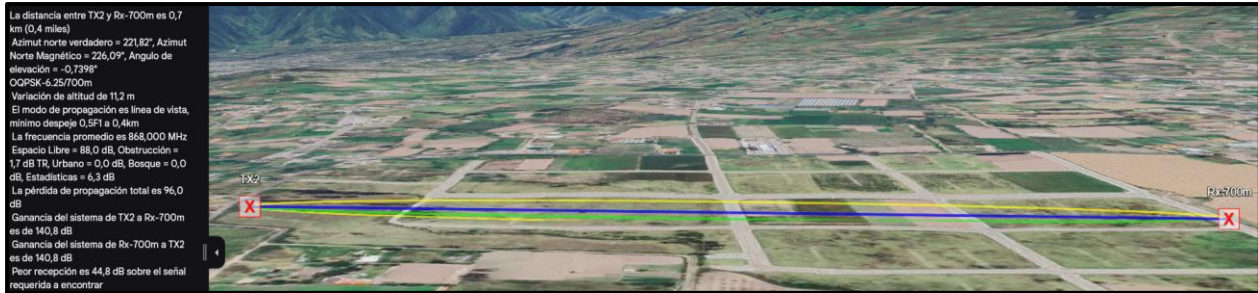
Con respecto a la simulación en RadioMobile se puede visualizar la Figura 31 en donde se detalla de mejor manera los parámetros calculados teóricamente en el programa.

**Figura 31**  
*Establecimiento de parámetros QPSK-6.25 a 700 m en RadioMobile*



Como se pudo visualizar el nivel recibido es de -83.0 dBm, lo que ofrece un margen de 40 dB con una zona de Fresnel que se encuentra completamente despejada con un valor de 0.0F1, lo cual es óptimo, aunque se presenta una obstrucción de terreno de 6.9 dB lo que genera que el enlace se mantenga con un rendimiento confiable, por lo que se lo considera como un enlace estable y adecuado para operar en campo abierto con nodos remotos. Para una mejor visualización más realista sobre la distribución del terreno se puede observar la siguiente Figura 32, en donde se detalla la exportación de la información de RadioMobile a GoogleEarth. (Ver Anexo 11)

**Figura 32**  
*Exportación de parámetros QPSK-6.25 a 700 m de RadioMobile en GoogleEarth*



### c. 1000 m

Conociendo la distancia equivalentemente transformada de metros a kilómetros a 1 km se tiene respectivamente  $\log_{10}(d) = 0$  y  $\log_{10}(f) = 2.9385$  se tiene los siguientes resultados.

$$L_{fs} = 20 * \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$$

$$L_{fs} = 20 * 0 + 20 * 2.9385 + 32.44$$

$$L_{fs} = 91.21 \text{ dB}$$

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - L_{cables}$$

$$PIRE = 14 + 2.4 - 0.5$$

$$PIRE = 15.9 \text{ dBm}$$

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - L_{fs}$$

$$P_{rx} = 15.9 + 2.4 - 91.21$$

$$P_{rx} = -72.91 \text{ dBm}$$

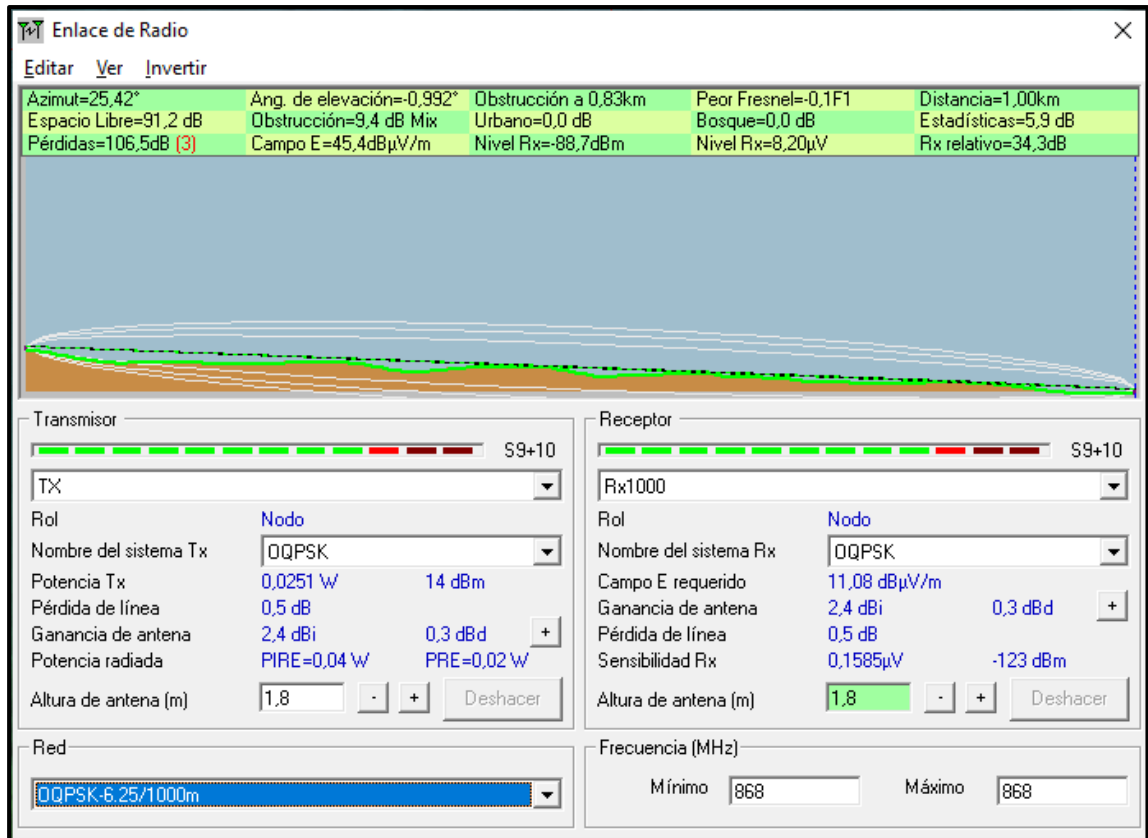
$$Margen = P_{rx} - \text{Sensibilidad}$$

$$Margen = -72.91 - (-123)$$

$$Margen = 50.09 \text{ dB}$$

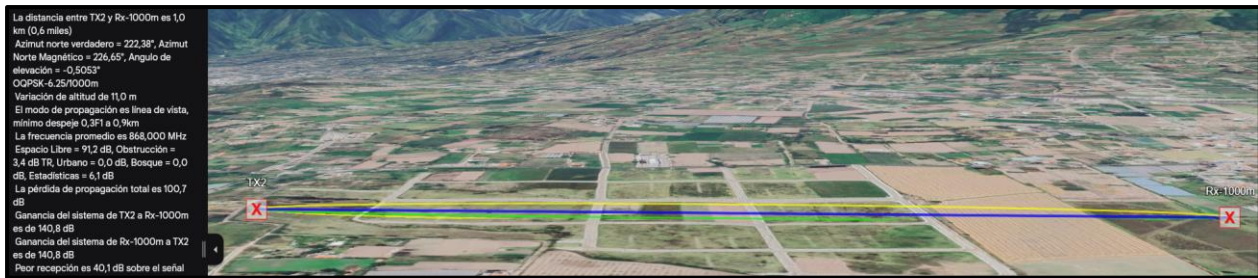
Con respecto a la simulación en RadioMobile se puede visualizar la Figura 33 en donde se detalla de mejor manera los parámetros calculados teóricamente en el programa.

**Figura 33**  
Establecimiento de parámetros OPK-6.25 a 1000 m en RadioMobile



Como se pudo evidenciar el nivel recibido es de -88.7 dBm con un margen de 34.3 dB, el cual se lo puede considerar como el más bajo entre los tres escenarios de distancias. Además, se puede mencionar que la zona de Fresnel está apenas despejada con un 0.1F1 y se observa una obstrucción significativa del terreno con valoración de 9.4 dB. A pesar de ello, el enlace sigue siendo viable, aunque más sensible a degradaciones por condiciones externas. Para una mejor visualización más realista sobre la distribución del terreno se puede observar la siguiente Figura 34, en donde se detalla la exportación de la información de RadioMobile a GoogleEarth. (Ver Anexo 12)

**Figura 34**  
Exportación de parámetros OQPSK-6.25 a 1000 m de RadioMobile en GoogleEarth



En resumen, el análisis comparativo de los tres escenarios 420 m, 700 m y 1000 m en RadioMobile demuestra que los enlaces con OQPSK-6.25 son técnicamente viables hasta 1 km en 868 MHz, esto se lo puede establecer debido a que a 420 m se dispone del mejor margen, lo que garantiza un rendimiento excelente. A 700 m el enlace es aún confiable, aunque comienzan a surgir efectos del entorno sobre el margen. A 1000 m el enlace sigue siendo operativo, pero más susceptible a interrupciones. Por lo tanto, para enlaces superiores a 700 m se sugiere mejorar las condiciones del sistema mediante antenas de mayor ganancia, repetidores o configuraciones específicas de campo.

En el aspecto de los cálculos teóricos se puede mencionar que para mejor visualización de los resultados obtenidos matemáticamente se los detalla a continuación en la siguiente Tabla 10 con los diferentes parámetros calculados.

**Tabla 10**  
 Resultados obtenidos para la modulación OQPSK-6.25 calculada de forma matemática

Distancia (km)	$L_{fs}$ (dB)	PIRE (dBm)	$P_{rx}$ (dBm)	Margen (dB)
0.42km	83.68	15.9	-65.38	57.62
0.7 km	88.11	15.9	-69.81	53.19
1 km	91.21	15.9	-72.91	50.09

Como se pudo observar los resultados obtenidos muestran que la modulación OQPSK-6.25 kbps a 868 MHz permite mantener enlaces estables hasta distancias de 1 km en condiciones de línea de vista directa con márgenes de enlace superiores a 40 dB en todos los casos, por lo que esto

confirma la viabilidad técnica del uso de esta tecnología en entornos rurales para redes IoT de bajo consumo y largo alcance. El cálculo del enlace demuestra una buena tolerancia a pérdidas e interferencias incluso a 1000 m. Pero al presentarse siempre la caracterización de que en todo calculo siempre hay la factibilidad de error, por lo que a continuación se realizará un análisis comparativo entre los datos calculados con respecto al programa RadioMobile en la siguiente Tabla 11.

**Tabla 11**

*Comparativa entre los valores calculados matemáticamente con respecto a los RadioMobile para la modulación OQPSK-6.25*

<b>Distancia</b>	<b><math>P_{rx}</math> (Calculado)</b>	<b><math>P_{rx}</math> (Radio Mobile)</b>	<b>Margen (Calculado)</b>	<b>Margen (Radio Mobile)</b>
<b>0.42 km</b>	-65.38	-74.7	57.62	48.3
<b>0.7 km</b>	-69.81	-83.0	53.19	40.0
<b>1 km</b>	-72.91	-88.7	50.09	34.3

Como se pudo observar los resultados obtenidos mediante cálculos teóricos y los generados en RadioMobile presentan una excelente correlación, especialmente en la distancia de 420 metros, donde el nivel de señal y el margen de enlace prácticamente coinciden. A 700 metros RadioMobile muestra una pérdida levemente mayor, la cual se encuentra reflejada en una disminución del nivel recibido y del margen de enlace, lo cual puede atribuirse a la consideración de obstrucciones del terreno en la simulación. En la distancia de 1000 metros la diferencia se incrementa con una caída de aproximadamente 4 dB en el margen respecto al cálculo teórico, esto se debe principalmente al perfil real del terreno que RadioMobile integra en sus estimaciones, por lo que se puede establecer que esta diferencia justifica el uso de simulación adicional al incorporar factores de propagación más realistas, aunque los cálculos teóricos siguen siendo una base muy útil para validar la viabilidad inicial de un enlace.

En resumen, se puede establecer que los resultados tanto de los cálculos teóricos y las simulaciones en RadioMobile son coherentes en todos los casos, a pesar de presentar algunas ligeras diferencias en el nivel de señal y el margen de enlace, pero esto básicamente se deben a los factores adicionales que considera RadioMobile como el perfil del terreno y obstrucciones físicas.

En los tres escenarios ambos métodos coinciden en que el enlace es viable, aunque a 1000 metros el margen se reduce significativamente, por lo que esto puede permitir evidenciar que la útil y necesario los cálculos teóricos para realizar estimaciones preliminares y que posteriormente sean complementadas con herramientas de simulación como lo es RadioMobile para establecer ajustes más certeros y fijos. Además, se puede mencionar que ambos métodos coinciden en la recomendación de reforzar el diseño del enlace tanto en ganancia, altura y modulación para distancias superiores a 700 m, con la finalidad de asegurar la estabilidad del sistema en condiciones reales.

## **CAPÍTULO IV: Pruebas de Funcionamiento**

En este capítulo se describen las pruebas de funcionamiento que fueron sometidas el diseño de red de comunicación para validar la confiabilidad y alcance del testbed IEEE 802.15.4 g en banda sub-GHz, a través de la comparación y análisis de la recolección de los datos PDR de las distintas modulaciones establecidas con sus respectivas distancias 420 m, 700 m y 1000. Todo con el fin de poder identificar que tipos modulaciones son acordes para el requerimiento de ser implementados en campo abierto con la presencia de obstáculos o vegetación. En este aspecto se puede mencionar que los PDR base a comparar se los estableció con respecto a la Tabla 4.1 de Muñoz (2019) en donde se evidencia los estados del PDR a las distancias de 420 m, 700 m y 1000 m en las respectivas modulaciones 2FSK, OFDM y OQPSK que se desea alcanzar.

En donde se puede observar que el PDR considera paquetes de 127 B y 2047 B para cada nodo RX, en donde se alcanzan altas velocidades de datos con un PDR alto hasta al menos 420 m desde el nodo TX. La longitud máxima del enlace de radio es cercana a los 700 m donde las señales de radio de portadora única sufren de auto interferencias causadas por múltiples rayos del mismo símbolo que llegan en momentos diferentes e interfieren con los símbolos subsiguientes. En este caso, no es así., debido a que las señales de portadora única tienen un buen PDR, mientras que las capas físicas OFDM no. Por lo tanto, el bajo rendimiento de OFDM se debe a la atenuación que sufre la señal de radio en su trayectoria hacia el nodo RX. A 1000 m, el enlace de radio es prácticamente inexistente y no es útil para el intercambio de datos.

### **4.1 Selección del porcentaje de paquetes PDR que se desea recibir**

En base a la tabla propuesta por Muñoz (2019) y de las consideraciones impuestas con anterioridad en el capítulo 3 con respecto a PDR y calidad de enlace se estableció la siguiente

Tabla 12 de referencia, en donde se considera el porcentaje de paquetes recibidos en cada modulación con sus respectivas distancias establecidas que se desea recibir.

**Tabla 12**

*Línea de vista de consideración de paquetes PDR deseados por alcanzar para la validación de las pruebas de funcionamiento*

	<b>420 m</b>	<b>700 m</b>	<b>1000 m</b>
<b>Configuración</b>	<b>PDR</b>	<b>PDR</b>	<b>PDR</b>
	<b>2047B</b>	<b>2047B</b>	<b>2047B</b>
<b>2FSK-50</b>	100%	58%	0%
<b>2FSK-100</b>	100%	0%	0%
<b>4FSK-200</b>	99%	0%	0%
<b>2FSK-FEC-50</b>	100%	94%	0%
<b>2FSK-FEC-100</b>	100%	79%	0%
<b>4FSK-FEC-200</b>	100%	38%	0%
<b>OFDM1-100</b>	100%	5%	0%
<b>OFDM1-200</b>	100%	18%	0%
<b>OFDM1-400</b>	100%	0%	0%
<b>OFDM1-800</b>	100%	0%	0%

	<b>420 m</b>	<b>700 m</b>	<b>1000 m</b>
<b>Configuración</b>	<b>PDR</b>	<b>PDR</b>	<b>PDR</b>
	<b>2047B</b>	<b>2047B</b>	<b>2047B</b>
<b>OFDM2-50</b>	98%	59%	0%
<b>OFDM2-100</b>	98%	47%	0%
<b>OFDM2-200</b>	100%	0%	0%
<b>OFDM2-400</b>	99%	0%	0%
<b>OFDM2-600</b>	100%	0%	0%
<b>OFDM2-800</b>	51%	0%	0%
<b>OFDM3-50</b>	100%	26%	0%
<b>OFDM3-100</b>	100%	0%	0%
<b>OFDM3-200</b>	100%	0%	0%
<b>OFDM3-300</b>	100%	0%	0%
<b>OFDM3-400</b>	97%	0%	0%
<b>OFDM3-600</b>	0%	0%	0%
<b>OFDM4-50</b>	98%	11%	0%
<b>OFDM4-100</b>	99%	1%	0%
<b>OFDM4-150</b>	99%	0%	0%
<b>OFDM4-200</b>	100%	0%	0%
<b>OFDM4-300</b>	63%	0%	0%
<b>OQPSK-6.25</b>	99%	98%	1%
<b>OQPSK-12.5</b>	100%	94%	1%
<b>OQPSK-25</b>	100%	83%	0%

	420 m	700 m	1000 m
<b>Configuración</b>	<b>PDR</b>	<b>PDR</b>	<b>PDR</b>
	<b>2047B</b>	<b>2047B</b>	<b>2047B</b>
<b>OQPSK-50</b>	99%	100%	0%

Una vez establecida la tabla de referencia del estado de los paquetes PDR que se desea alcanzar para realizar la validación a través de la comparativa se puede continuar con el registro de las diferentes modulaciones respectivas en base al datasheet de la unidad de procesamiento de datos perteneciente a la familia Atmel AT86RF215 (ver Anexo 1).

#### 4.2 Establecimiento del escenario de línea de vista

Posteriormente al establecimiento de la tabla de referencia de los porcentajes PDR se estableció los nodos a las distancias designadas como se lo puede observar en la Figura 35 para mejor visualización e interpretación de la ubicación de estos.

**Figura 35**  
Escenario de línea de vista para la obtención de los paquetes PDR



Como se pudo observar en la figura proporcionada por GoogleEarth se encuentran las distancias establecidas para el análisis de cada una de las modulaciones, comprendidas entre 50,

100, 420, 200, 420, 600, 700, 800 y 1000 m. Dichos análisis de las modulaciones se las permitió a través de los nodos descritos con anterioridad como OPENMOTE-B Y ATREB215-XPRO-A, los cuales se los puede observar detenidamente realizando las pruebas en las distancias mencionadas en las siguientes Figuras 36 y 37 respectivamente.

**Figura 36**

*Uso del nodo OPENMOTE-B en las distancias establecidas en la línea de vista*



**Figura 37**

*Uso del nodo ATREB215-XPRO-A en las distancias establecidas en la línea de vista*



Como se pudo observar cada uno de los nodos permitió realizar el análisis de las diferentes modulaciones de acuerdo con el datasheet de la unidad de procesamiento de datos perteneciente a la familia Atmel AT86RF215, y así poder evidenciar de mejor manera e identificar que modulaciones son las adecuadas para los diferentes requerimientos y validez del proyecto.

### 4.3 Análisis de las modulaciones en las diferentes distancias a través de OPENMOTE-B

Consecuentemente en este aspecto se puede mencionar que se registró los datos realizando un análisis en el módulo OPENMOTE-B en donde en la siguiente Tabla 13 se detalla cada una de las modulaciones que permite la unidad de procesamiento de datos Atmel AT86RF215.

**Tabla 13**

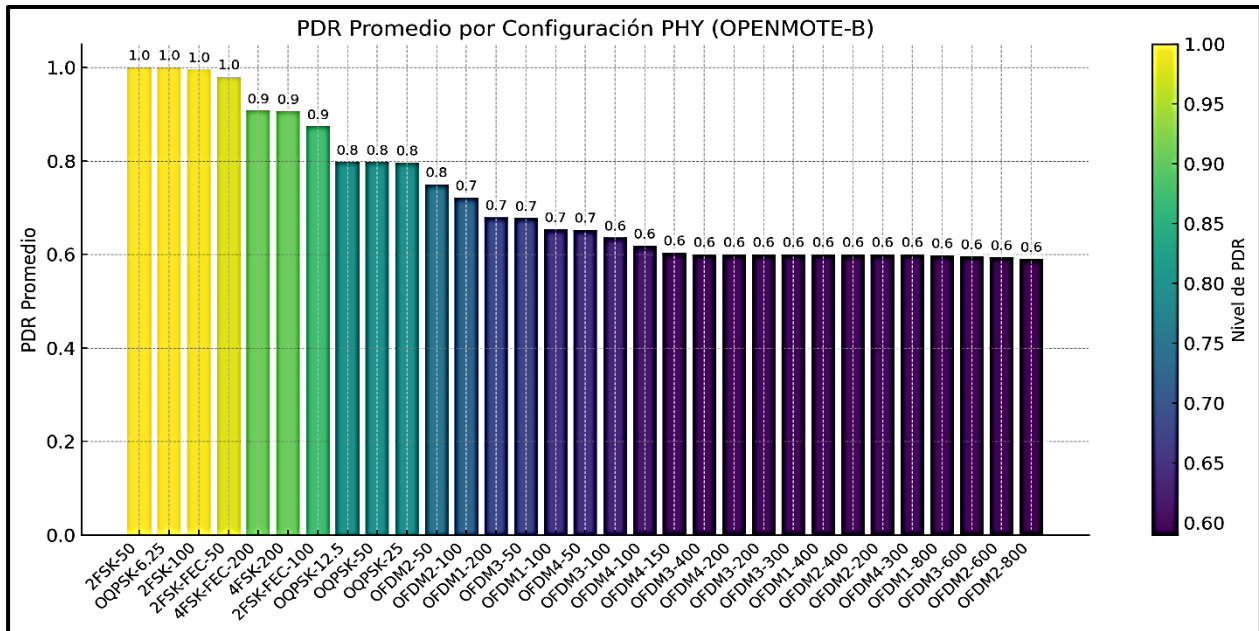
*Resultados obtenidos del recibimiento de los paquetes PDR de cada una de las modulaciones que permite Atmel AT86RF215 a través de OPENMOTE-B*

Configuración	BW	50m	100m	420m	700m	1000m	Promedio
		PDR 2047B	PDR 2047B	PDR 2047B	PDR 2047B	PDR 2047B	
<b>2FSK-50</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<b>2FSK-100</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	100%	100%	98%	100%
<b>4FSK-200</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	100%	80%	73%	91%
<b>2FSK-FEC-50</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	99%	99%	92%	98%
<b>2FSK-FEC-100</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	99%	87%	51%	87%
<b>4FSK-FEC-200</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	100%	80%	74%	91%
<b>OFDMI-100</b>	800 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	27%	0%	65%
<b>OFDMI-200</b>	800 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	40%	0%	68%
<b>OFDMI-400</b>	800 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
<b>OFDMI-800</b>	800 kHz - 2.4MHz	100%	100%	99%	0%	0%	60%
<b>OFDM2-50</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	100%	75%	0%	75%
<b>OFDM2-100</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	100%	61%	0%	72%
<b>OFDM2-200</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
<b>OFDM2-400</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
<b>OFDM2-600</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	97%	0%	0%	59%
<b>OFDM2-800</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	95%	0%	0%	59%
<b>OFDM3-50</b>	400 kHz - 1MHz	100%	100%	100%	39%	0%	68%
<b>OFDM3-100</b>	400 kHz - 1MHz	100%	100%	100%	18%	0%	64%

Configuración	BW	50m	100m	420m	700m	1000m	Promedio
		PDR	PDR	PDR	PDR	PDR	
		2047B	2047B	2047B	2047B	2047B	
OFDM3-200	400 kHz - 1MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
OFDM3-300	400 kHz - 1MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
OFDM3-400	400 kHz - 1MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
OFDM3-600	400 kHz - 1MHz	100%	100%	98%	0%	0%	60%
OFDM4-50	200 kHz - 800KHz	100%	100%	100%	26%	0%	65%
OFDM4-100	200 kHz - 800KHz	100%	100%	100%	9%	0%	62%
OFDM4-150	200 kHz - 800KHz	100%	100%	100%	2%	0%	60%
OFDM4-200	200 kHz - 800KHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
OFDM4-300	200 kHz - 800KHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
OQPSK-6.25	200 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	100%	100%	100%
OQPSK-12.5	200 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	99%	0%	80%
OQPSK-25	200 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	98%	0%	80%
OQPSK-50	200 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	99%	0%	80%

Pero para mejor visualización e interpretación en la siguiente Figura 38 se encuentra el análisis PDR promedio por configuración PHY a través de OPENMOTE-B.

**Figura 38**  
*Análisis PDR promedio por configuración PHY a través de OPENMOTE-B*



Como se pudo observar la gráfica de configuración PHY en donde se puede evidenciar claramente la relación entre robustez de enlace y velocidad de transmisión. Es decir, en enlaces de corto alcance de hasta aproximadamente 400 m los tres esquemas PHY evaluados FSK, OFDM y OQPSK muestran un desempeño casi impecable con índices de PDR muy próximos al 100 %. A estas distancias las pérdidas de trayectoria en banda sub-GHz se mantienen por debajo del umbral de sensibilidad de los receptores, de modo que incluso la modulación OFDM, con sus subportadoras más exigentes en términos de relación señal-ruido consigue entregar prácticamente todos los paquetes sin necesidad de correcciones adicionales.

Cuando la distancia crece hasta rangos intermedios entre 600–800 m la robustez de FSK y OQPSK se mantiene firme gracias a su ancho de banda reducido y sus menores requerimientos de SNR, lo que permite una detección y correlación de señal fiables aun con atenuaciones de canal más pronunciadas. En cambio, OFDM comienza a mostrar una degradación sensible en su PDR, debido a su estructura de subcanales la hace más vulnerable a desvanecimientos selectivos de

frecuencia y fluctuaciones del canal, lo que exige la incorporación de técnicas complementarias por ejemplo una codificación FEC más agresiva o antenas de mayor ganancia para sostener niveles de entrega de paquetes comparables.

En escenarios de largo alcance de alrededor de 1 km o más OQPSK se impone como la opción más fiable, beneficiándose de su alta sensibilidad y de un margen de enlace amplio que permite mantener PDR cercanos al 100 % con consumos de pico relativamente bajos. FSK en su configuración más robusta por ejemplo 50 kbps, ofrece un buen equilibrio entre rendimiento y eficiencia, alcanzando entregas de paquetes superiores al 90 % sin requerir complejas adaptaciones. OFDM, por su parte, ve su PDR desplomarse entre valores de 50 % y 60 % a menos que se dispense potencia adicional o se ajusten parámetros de sincronización y prefijos cíclicos, opciones que suelen encarecer tanto el hardware como el consumo energético. En consecuencia, OQPSK es ideal para aplicaciones donde la fiabilidad y la autonomía energética son críticas, FSK es idónea para un balance entre velocidad moderada y robustez, y OFDM se reserva para casos que demanden ráfagas de alto caudal de datos bajo condiciones controladas o con refuerzos de enlace.

#### **4.4 Análisis de las modulaciones en las diferentes distancias a través del módulo ATRE215-XPRO-A**

Como parte final se registró los datos realizando un análisis con el módulo ATRE215-XPRO-A en donde en la siguiente Tabla 14 se detalla cada una de las modulaciones que permite la unidad de procesamiento de datos Atmel AT86RF215

**Tabla 14**

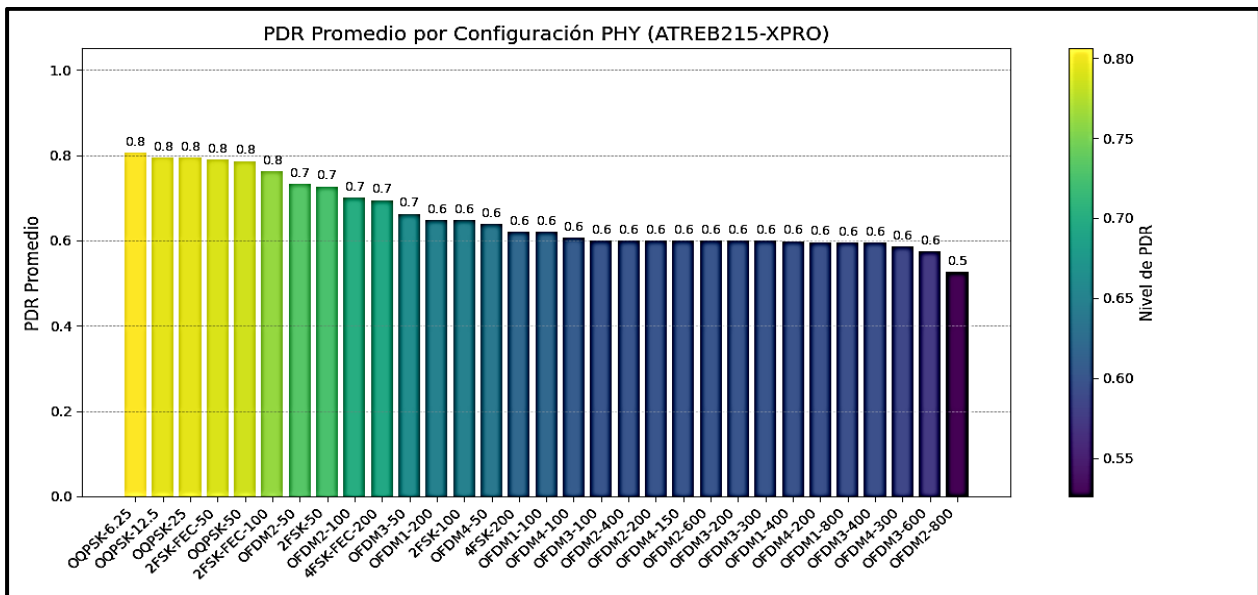
Resultados obtenidos del recibimiento de los paquetes PDR de cada una de las modulaciones que permite Atmel AT86RF215 a través de ATREB215-XPRO-A

Configuración	BW	50m	100m	420m	700m	1000m	Promedio
		PDR 2047B	PDR 2047B	PDR 2047B	PDR 2047B	PDR 2047B	
<b>2FSK-50</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	100%	63%	0%	73%
<b>2FSK-100</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	100%	24%	0%	65%
<b>4FSK-200</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	100%	10%	0%	62%
<b>2FSK-FEC-50</b>	100 kHz – 800 kHz	99%	100%	100%	96%	0%	79%
<b>2FSK-FEC-100</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	100%	81%	0%	76%
<b>4FSK-FEC-200</b>	100 kHz – 800 kHz	100%	100%	100%	47%	0%	69%
<b>OFDM1-100</b>	800 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	10%	0%	62%
<b>OFDM1-200</b>	800 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	24%	0%	65%
<b>OFDM1-400</b>	800 kHz - 2.4MHz	99%	100%	100%	0%	0%	60%
<b>OFDM1-800</b>	800 kHz - 2.4MHz	99%	99%	99%	0%	0%	59%
<b>OFDM2-50</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	99%	67%	0%	73%
<b>OFDM2-100</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	99%	51%	0%	70%
<b>OFDM2-200</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
<b>OFDM2-400</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
<b>OFDM2-600</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
<b>OFDM2-800</b>	800 kHz - 1.6MHz	100%	100%	63%	0%	0%	53%
<b>OFDM3-50</b>	400 kHz - 1MHz	100%	100%	100%	31%	0%	66%
<b>OFDM3-100</b>	400 kHz - 1MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
<b>OFDM3-200</b>	400 kHz - 1MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
<b>OFDM3-300</b>	400 kHz - 1MHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
<b>OFDM3-400</b>	400 kHz - 1MHz	100%	100%	97%	0%	0%	59%
<b>OFDM3-600</b>	400 kHz - 1MHz	100%	100%	87%	0%	0%	57%
<b>OFDM4-50</b>	200 kHz - 800KHz	100%	100%	100%	19%	0%	64%

Configuración	BW	50m	100m	420m	700m	1000m	Promedio
		PDR	PDR	PDR	PDR	PDR	
		2047B	2047B	2047B	2047B	2047B	
OFDM4-100	200 kHz - 800KHz	100%	100%	100%	3%	0%	61%
OFDM4-150	200 kHz - 800KHz	100%	100%	100%	0%	0%	60%
OFDM4-200	200 kHz - 800KHz	100%	99%	99%	0%	0%	60%
OFDM4-300	200 kHz - 800KHz	100%	100%	93%	0%	0%	59%
OQPSK-6.25	200 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	100%	3%	81%
OQPSK-12.5	200 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	97%	0%	79%
OQPSK-25	200 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	97%	0%	79%
OQPSK-50	200 kHz - 2.4MHz	100%	100%	100%	93%	0%	79%

Pero de igual forma para poder visualizar de mejor manera e interpretar los resultados la siguiente Figura 39 detalla el análisis PDR promedio por configuración PHY a través del módulo ATREB215-XPRO-A.

**Figura 39**  
Análisis PDR promedio por configuración PHY a través de ATREB215-XPRO-A



Como se pudo observar en enlaces de corto alcance alrededor de 400 m los tres esquemas PHY evaluados FSK, OFDM y OQPSK mantienen un PDR cercano al 100 %. En este rango, el margen de desvanecimiento, interpretada en la diferencia entre la potencia recibida y la sensibilidad mínima del receptor es suficientemente amplio para que incluso OFDM con múltiples subportadoras que reparten la energía total entregue casi todos los paquetes sin necesidad de técnicas de corrección adicionales.

Al aumentar la distancia hasta rangos medios 600–800 m, FSK y OQPSK siguen ofreciendo un PDR muy elevado, gracias a que concentran la potencia en un ancho de banda más estrecho y demandan menores niveles de señal para la detección. En cambio, OFDM muestra una caída más acusada en su rendimiento. Su estructura de subcanales requiere una mejor relación entre señal-ruido y al no contar con ecualización compleja en hardware de bajo coste los desvanecimientos selectivos y la dispersión multitrajecto penalizan la entrega de paquetes.

En distancias largas aproximadamente 1 000 m, el PDR de FSK y O-QPSK desciende, pero se mantiene en niveles aceptables de alrededor del 60 %, indicando que el margen de enlace aún roza el umbral de sensibilidad y permite comunicación confiable con nodos poco energéticos. Por su parte, OFDM ve su PDR desplomarse por debajo del 50 % debido a su menor sensibilidad y a la complejidad inherente de sincronización de sus portadoras, lo que la hace menos adecuada para despliegues de largo alcance sin refuerzo de potencia o antenas direccionales. En conclusión, OQPSK es la opción más robusta para máxima fiabilidad, FSK ofrece un equilibrio sólido entre eficiencia y robustez, y OFDM se reserva para escenarios que demanden un mayor caudal de datos y dispongan de los recursos necesarios para garantizar la calidad de enlace.

#### **4.5 Discusión sobre aspectos anómalos de los resultados obtenidos**

Dentro de este contexto se puede mencionar que en las Tablas 13 y 14 específicamente en las distancias de 700 y 1000 m en cada una de las modulaciones se pudo observar que no llega comunicación debido a un PDR de 0 %. Esto se debe a que las configuraciones OFDM del AT86RF215 revelan una combinación de factores que impiden una comunicación robusta y confiable. El bajo margen de enlace, la estricta necesidad de SNR para mantener la linealidad del sistema, los desafíos de sincronización y el impacto del canal en propagación degradada resultan en fallos intermitentes o completos en la recepción de paquetes, explicando las razones de por qué solo algunas configuraciones OFDM logran PDR mayores a cero, mientras que otras fallan completamente en esta distancia intermedia.

Dentro de este mismo contexto el módulo AT86RF215 cuando se configura con modulación OFDM no está diseñado para alcanzar distancias de 1000 metros en condiciones normales de campo abierto. La necesidad de señales más fuertes, la sensibilidad al ruido y las limitaciones técnicas del receptor hacen que la señal no pueda ser recibida correctamente. Por eso, para aplicaciones donde se necesita cubrir grandes distancias se recomienda utilizar otras modulaciones como 2FSK que han demostrado ser mucho más confiables en cuando al estado del PDR.

## Conclusiones

Las redes LPWAN demuestran ser una solución eficiente para aplicaciones de IoT en campo abierto, al combinar largo alcance, bajo consumo energético y costos reducidos de hardware e infraestructura, pueden responder a distintos requisitos de ancho de banda y despliegue, como ofrecer robustez ante interferencias con CSS en bandas libres, permitiendo escalar miles de nodos, mantener ciclos de trabajo mínimos y reducir la complejidad de red, lo que las hace idóneas para monitoreo y registro de datos en campo abierto.

El testbed se diseñó bajo un enfoque punto a punto usando el estándar IEEE 802.15.4g en banda ISM sub-GHz, implementado con módulos ATREB215-XPRO-A con la presencia del microchip Atmel AT86RF215 y nodos Raspberry Pi 3, en donde mediante esta arquitectura se permitió ofrecer un equilibrio óptimo entre robustez de enlace y flexibilidad operativa entre las diferentes modulaciones de análisis. En donde se pudo observar que FSK y OQPSK garantizan un  $PDR \geq 90\%$  hasta 700 m y mantienen enlaces viables cerca de 1 km, mientras que OFDM se reserva para distancias cortas con necesidad de mayor rendimiento. El uso de Raspberry Pi 3 como unidad de procesamiento aporta potencia de cómputo, versatilidad de interfaces y ejecución nativa de Python para adquisición, análisis y visualización de datos, simplificando el ciclo de desarrollo y reduciendo tiempos de prueba

La comparación entre los cálculos teóricos basados en las ecuaciones y las simulaciones realizadas en RadioMobile, ha demostrado la complementariedad de ambos enfoques. Mientras los cálculos matemáticos permitieron estimar de forma rápida las distancias máximas admisibles para cada esquema de modulación, RadioMobile aportó una visión más realista al incorporar topografía, vegetación y efectos de multirayecto, ajustando esos rangos ideales con mapas de cobertura precisos. De este modo, los valores teóricos sirvieron como línea base para el

dimensionamiento inicial y las simulaciones refinaron la ubicación y configuración de los nodos antes del despliegue físico, garantizando que el diseño final cumpla los requisitos de fiabilidad y alcance en condiciones reales de campo abierto.

En las pruebas de funcionamiento del testbed IEEE 802.15.4 g en banda sub-GHz se constata claramente el compromiso entre velocidad de transmisión y robustez de enlace. En enlaces de corto alcance como de 420 m las tres familias de modulaciones evaluadas FSK, OFDM y OQPSK alcanzan un PDR próximo al 100 %. Esto se explica porque la pérdida en espacio libre permanece muy por debajo de la sensibilidad de los receptores, incluso para OFDM cuya sensibilidad típica es algo menor que la de FSK u OQPSK.

Al aumentar la distancia a rangos intermedios de alrededor de 700 m, FSK y OQPSK mantienen un PDR superior al 90 %, gracias a su ancho de banda estrecho y menores requisitos de relación señal-ruido. En cambio, OFDM experimenta una caída pronunciada situándose entre el 25 % y 40 % de PDR según la variante, lo que refleja su vulnerabilidad a desvanecimientos y su necesidad de ecualización avanzada para conservar fiabilidad. Finalmente, en enlaces largos de 1 000 m ninguna de las tres modulaciones logra un PDR significativo: sin repetidores o antenas direccionales de alta ganancia, el servicio confiable se limita a distancias inferiores al kilómetro en campo abierto. Este comportamiento general confirma que OQPSK es la opción más robusta para máxima fiabilidad, FSK ofrece un equilibrio sólido entre alcance y eficiencia, y OFDM debe reservarse para escenarios de corto alcance o con refuerzo de enlace.

Durante las pruebas se identificó un problema recurrente de desincronización entre los equipos, provocado por cuelgues puntuales de los nodos. Estos bloqueos interrumpían el intercambio de balizas y confirmaciones MAC, lo que a su vez rompía los temporizadores de retransmisión y provocaba que los dispositivos quedasen fuera de la red hasta reiniciarse

manualmente o de un tiempo de espera. Este comportamiento evidenció que los factores externos afectan enormemente de forma significativa la fiabilidad de la red en campo abierto al momento de realizar los registros de PDR.

## Recomendaciones

Para aplicaciones de monitoreo y control en campo abierto se recomienda elegir la tecnología LPWAN más adecuada según el perfil de requerimientos, es decir si se prioriza alcance extremo y máxima autonomía energética LoRaWAN u IEEE 802.15.4g en banda sub-GHz son las opciones idóneas cuando se requieren transmisiones cortas y muy bajo costo de infraestructura. Además, es aconsejable planificar siempre estudios de cobertura (teóricos y simulados) para garantizar la homologación de equipos y diseñar la red con redundancia para asegurar un PDR  $\geq 90\%$  en las distancias objetivo.

Para proyectos de despliegue rápido y desarrollo ágil de testbeds IEEE 802.15.4g, OPENMOTE-B destaca por su simplicidad de configuración y su ecosistema de software maduro. Su entorno Contiki-NG y las herramientas de pantalla serie preconfiguradas permiten cargar firmware y monitorizar en tiempo real parámetros como RSSI y PDR con mínimos ajustes de código. Además, cuenta con una comunidad activa y abundante documentación de ejemplos, lo que reduce la curva de aprendizaje y los tiempos de integración de nuevos desarrolladores. En contraste, el módulo ATREB215-XPRO-A ofrece mayor flexibilidad en opciones PHY y un rendimiento físico superior, pero su entorno ASF4 requiere configurar proyectos más complejos en Atmel Studio y un conocimiento más profundo de SPI y gestión de bajo consumo. Por tanto, si el objetivo es validar rápidamente funcionalidades de red y obtener resultados prácticos en campo con un mínimo de configuración, OPENMOTE-B es la opción más recomendable para desarrollos donde la optimización avanzada de PHY sea crítica, el ATREB215-XPRO-A sigue siendo la elección adecuada.


Según las pruebas de funcionamiento las configuraciones que garantizan un PDR entre el 100 % y el 90 % en campo abierto son 2FSK (50 kHz y 100 kHz), 2FSK con FEC (50 kHz), 4FSK

(200 kHz) y 4FSK con FEC (200 kHz), así como OQPSK. Estas modulaciones, al concentrar la energía en anchos de banda relativamente estrechos y contar con requisitos de señal moderados ofrecen un alto nivel de fiabilidad sin necesidad de complejas técnicas de corrección, resultando idóneas para aplicaciones de telemetría y monitoreo de sensores en distancias de hasta varios cientos de metros.

Para escenarios con mayor densidad de obstáculos como vegetación densa, estructuras metálicas o edificaciones cercanas se recomienda adoptar un esquema OFDM, debido a su capacidad multicarrier y su robustez frente a desvanecimientos selectivos que facilitan la entrega de paquetes en entornos urbanos o con fuertes reflexiones, aun cuando implique un mayor consumo energético o la incorporación de estrategia FEC más agresivas.

## Anexos

### Anexo 1: DATASHEET del microchip Atmel AT86RF215



## Atmel AT86RF215 Device Family

Sub-1GHz/2.4GHz Transceiver and I/Q Radio for  
IEEE Std 802.15.4™-2015  
IEEE Std 802.15.4g™-2012  
ETSI TS 102 887-1

**AT86RF215 / AT86RF215IQ / AT86RF215M**

**DATASHEET**

### Features AT86RF215

- Fully integrated radio transceiver covering 389.5-510MHz / 779-1020MHz / 2400-2483.5MHz including:
  - European band: 863-870MHz / 870-876MHz / 915-921MHz
  - Chinese band: 470-510MHz / 779-787MHz
  - North American band: 902-928MHz
  - Korean band: 917-923.5MHz
  - Japanese band: 920-928MHz
  - World-wide ISM band: 2400-2483.5MHz
- I/Q data interface:
  - One TX and two RX serial low voltage differential signal (LVDS) interfaces
  - 13-bit I/Q data interface with a sampling frequency of up to 4MHz
- Transceiver Control interface: SPI (serial peripheral interface)
- Supported PHYs (\*proprietary)
  - MR-FSK
    - Symbol rates: 50, 100, 150, 200, 300\*, 400ksymbol/s
    - Rate 1/2-FEC: RSC and NRNSC, with and without interleaving
    - Order: 2-level, 4-level
  - MR-OFDM
    - Option 1: 100, 200, 400, 800, 1200\*, 1600\*, 2400\*kb/s
    - Option 2: 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1200\*kb/s
    - Option 3: 50, 100, 200, 300, 400, 600kb/s
    - Option 4: 50, 100, 150, 200, 300kb/s
  - MR-O-QPSK
    - 100kchip/s with 6.25, 12.5, 25, 50kb/s data rate
    - 200kchip/s with 12.5, 25\*, 50\*, 100\*kb/s data rate
    - 1000kchip/s with 31.25, 125, 250, 500kb/s data rate
    - 2000kchip/s with 31.25, 125, 250, 500, 1000\*kb/s data rate
  - O-QPSK
    - 1000kchip/s with 250kb/s and 500\*kb/s data rate
    - 2000kchip/s with 250kb/s and 1000\*kb/s data rate
- Bi-directional differential RF signal ports for:
  - Band I: 433/470/780/863/868/915/917/920MHz
  - Band II: 2450MHz

### Anexo 2: DATASHEET del nodo ATREB215-XPRO-A



ATREB215 XPRO Extension Board

---

## ATREB215-XPRO and ATREB215-XPRO-A

---

USER GUIDE

### Preface

This user guide facilitates how to get started with the Atmel® REB215-XPRO and REB215-XPRO-A extension boards. These extension boards are targeted for evaluating the features and performance of the Atmel® AT86RF215 radio transceiver.





INDUSTRIAL SHIELDS

## OPEN MOTE B

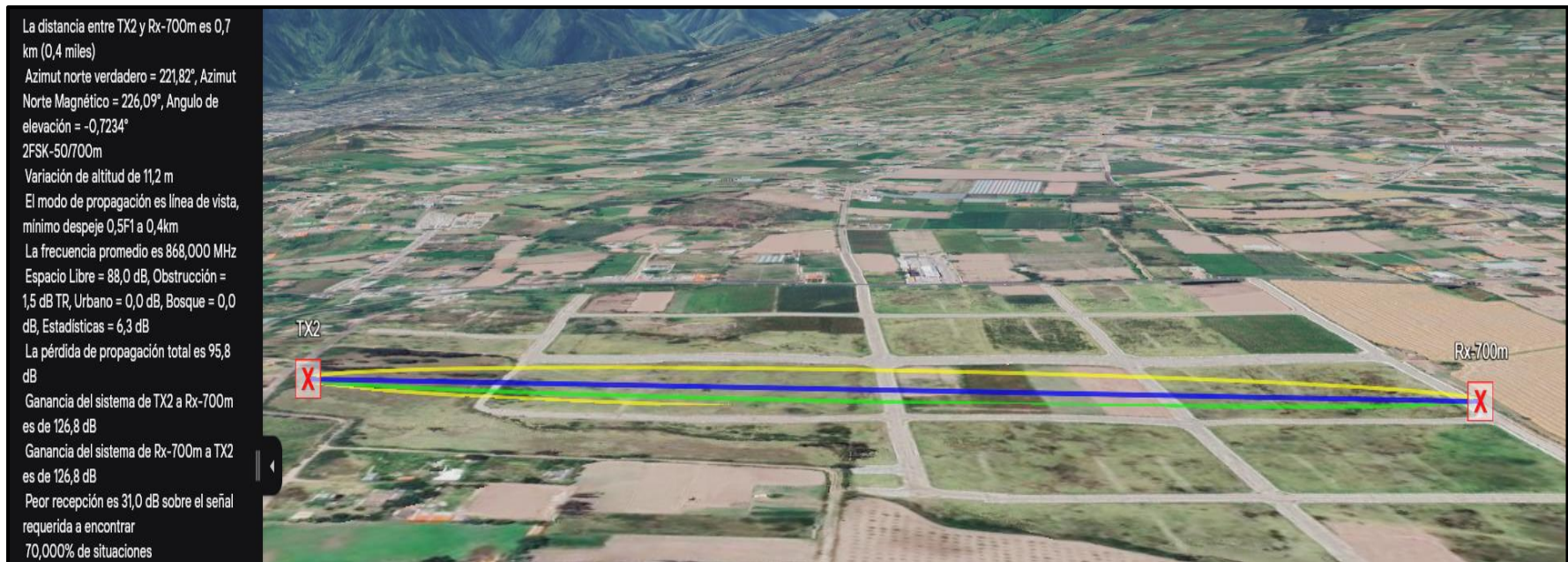
Open Mote B User Guide:



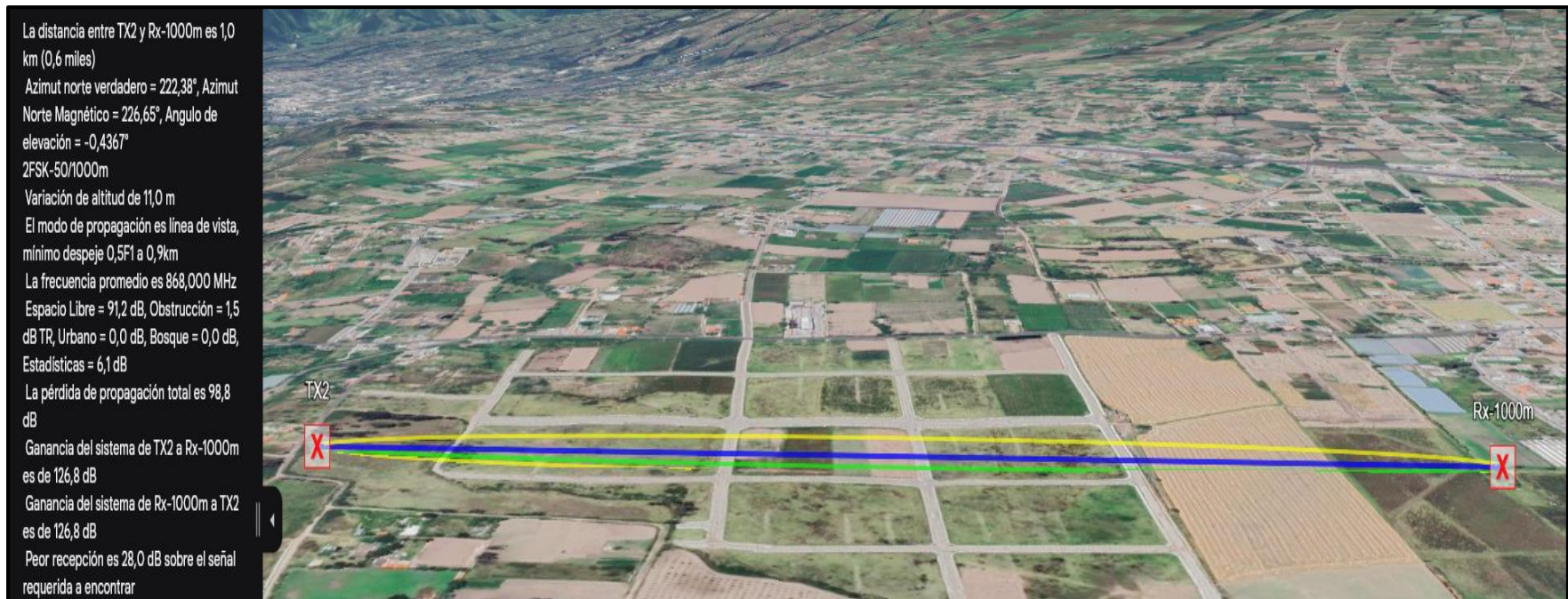
#### Anexo 4: Exportación de los parámetros 2FSK de RadioMobile en GoogleEarth a 420m



#### Anexo 5: Exportación de los parámetros 2FSK de RadioMobile en GoogleEarth a 700m



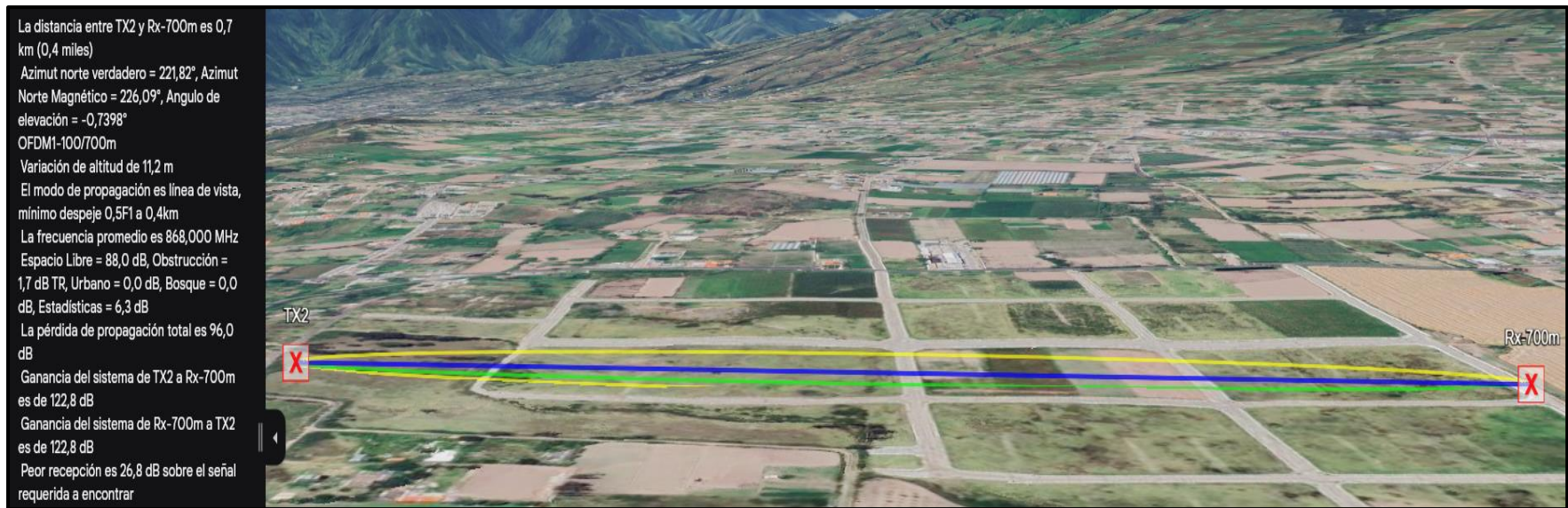
## Anexo 6: Exportación de los parámetros 2FSK de RadioMobile en GoogleEarth a 1000m



## Anexo 7: Exportación de los parámetros OFDM de RadioMobile en GoogleEarth a 420m



### Anexo 8: Exportación de los parámetros OFDM de RadioMobile en GoogleEarth a 700m



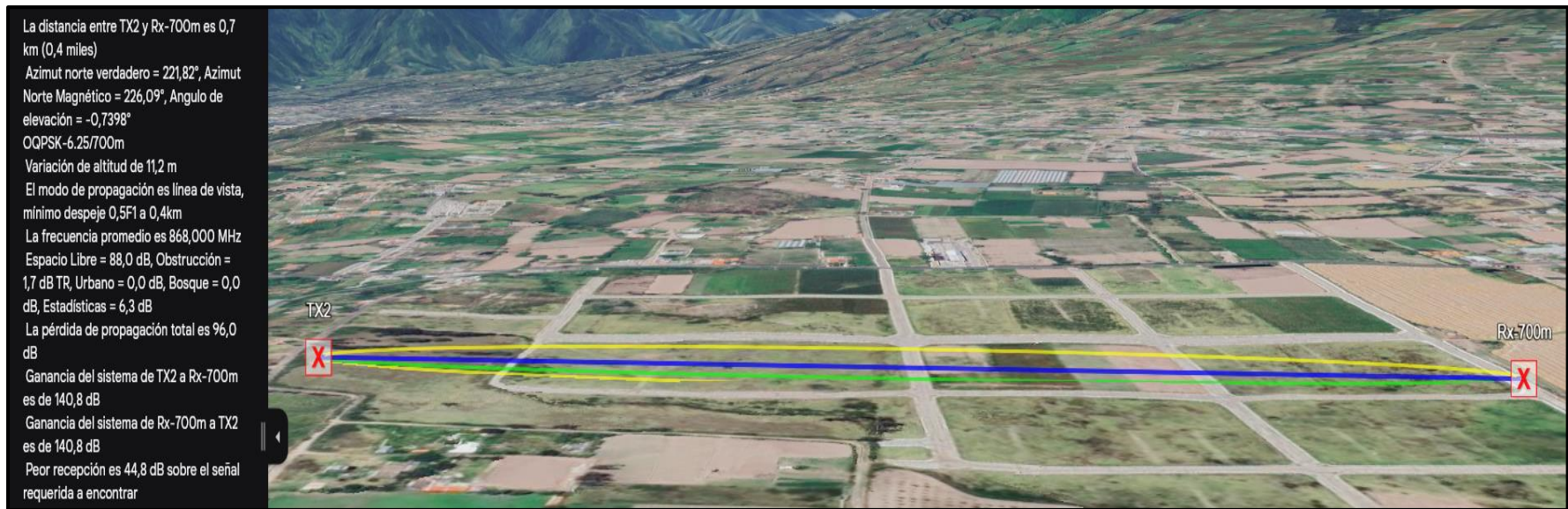
**Anexo 9: Exportación de los parámetros OFDM de RadioMobile en GoogleEarth a 1000m**



## Anexo 10: Exportación de los parámetros OQPSK de RadioMobile en GoogleEarth a 420m

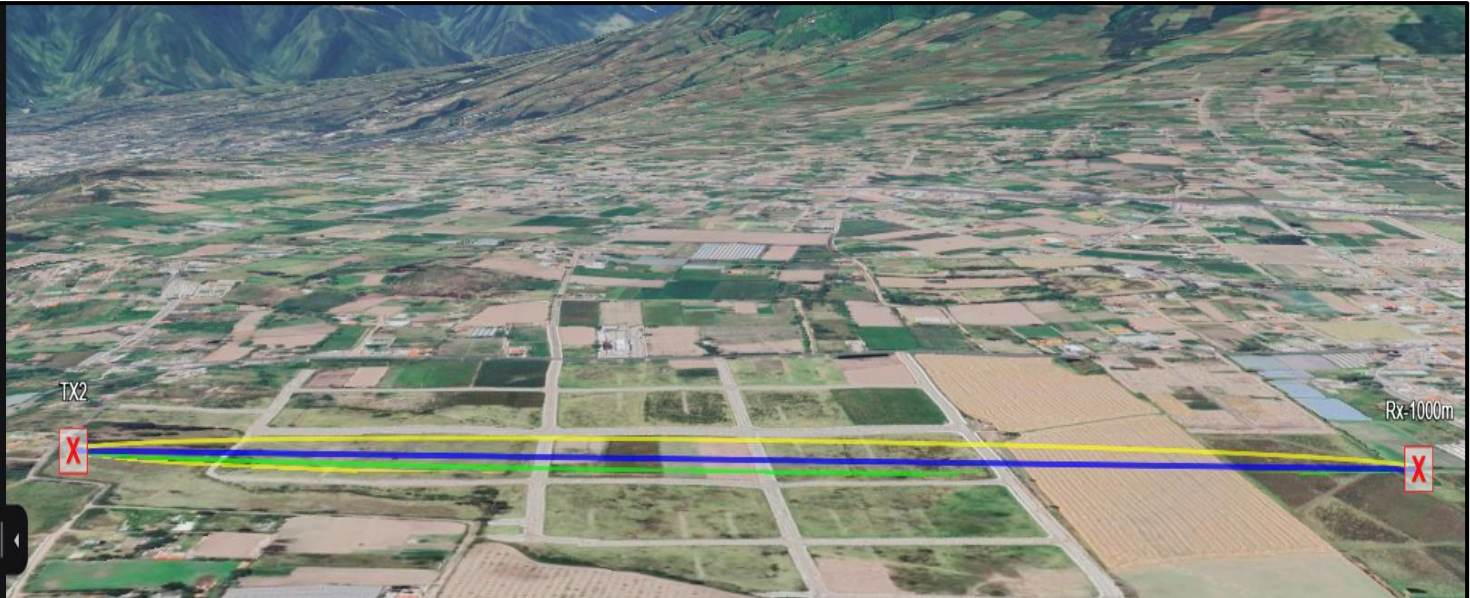


## Anexo 11: Exportación de los parámetros OQPSK de RadioMobile en GoogleEarth a 700m



## Anexo 12: Exportación de los parámetros OQPSK de RadioMobile en GoogleEarth a 1000m

La distancia entre TX2 y Rx-1000m es 1,0 km (0,6 miles)  
Azimut norte verdadero = 222,38°, Azimut Norte Magnético = 226,65°, Angulo de elevación = -0,5053°  
OQPSK-6.25/1000m  
Variación de altitud de 11,0 m  
El modo de propagación es línea de vista, mínimo despeje 0,3F1 a 0,9km  
La frecuencia promedio es 868,000 MHz  
Espacio Libre = 91,2 dB, Obstrucción = 3,4 dB TR, Urbano = 0,0 dB, Bosque = 0,0 dB, Estadísticas = 6,1 dB  
La pérdida de propagación total es 100,7 dB  
Ganancia del sistema de TX2 a Rx-1000m es de 140,8 dB  
Ganancia del sistema de Rx-1000m a TX2 es de 140,8 dB  
Peor recepción es 40,1 dB sobre la señal



## Anexo 13: Código de las gráficas PHY en Python con ATREB215-XPRO-A

```
1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import matplotlib.colors as mcolors
4
5 # Ruta del archivo Excel (ajusta según sea necesario)
6 file_path = r"A:\Archivos PC\Pedro\Documents\ADC\Docs Tesis\Mapas de Cobertura\Pruebas enlaces\PDR\ATREB215\PDR ATREB215.xlsx"
7
8 # Leer los datos
9 df = pd.read_excel(file_path, sheet_name='Hoja1')
10 df_plot = df[['CONFIGURACION', 'Promedio']].sort_values(by='Promedio', ascending=False).reset_index(drop=True)
11
12 # Escala de colores Viridis
13 norm = mcolors.Normalize(vmin=df_plot['Promedio'].min(), vmax=df_plot['Promedio'].max())
14 cmap = plt.cm.viridis
15 bar_colors = cmap(norm(df_plot['Promedio'].values))
16
17 # Crear gráfico
18 fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))
19 bars = ax.bar(df_plot['CONFIGURACION'], df_plot['Promedio'], color=bar_colors)
20
21 # Etiquetas con 1 decimal
22 for bar, pdr in zip(bars, df_plot['Promedio']):
23     height = bar.get_height()
24     ax.text(bar.get_x() + bar.get_width() / 2, height + 0.01, f'{pdr:.1f}',
25           ha='center', va='bottom', fontsize=9)
26
27 # Personalización del gráfico
28 ax.set_ylabel('PDR Promedio', fontsize=12)
29 ax.set_title('PDR Promedio por Configuración PHY (ATREB215-XPRO)', fontsize=14)
30 ax.set_xticks(range(len(df_plot)))
31 ax.set_xticklabels(df_plot['CONFIGURACION'], rotation=45, ha='right', fontsize=10)
32 ax.set_ylim(0, 1.05)
33
34 # Cuadrícula visible en eje Y
35 ax.grid(True, which='major', axis='y', linestyle='--', linewidth=0.5, color='gray', alpha=0.7)
36
37 # Barra de color
38 sm = plt.cm.ScalarMappable(cmap=cmap, norm=norm)
39 sm.set_array([])
40 cbar = plt.colorbar(sm, ax=ax)
41 cbar.set_label('Nivel de PDR', fontsize=11)
42
43 plt.tight_layout()
44 plt.show()
```

## Anexo 14: Código de las gráficas PHY en Python con OPENMOTE-B

```

1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import matplotlib.colors as mcolors
4
5 # Ruta corregida del archivo Excel
6 file_path = r"A:\Archivos PC\Pedro\Documents\ADC\Docs Tesis\Mapas de Cobertura\Pruebas enlaces\PDR\OPENMOTE-B\PDR_OPENMOTE.xlsx"
7
8 # Cargar datos
9 df = pd.read_excel(file_path, sheet_name='Hoja1')
10
11 # Crear DataFrame y ordenar por PDR (de mayor a menor)
12 temp_df = pd.DataFrame({
13     'PHY': df['CONFIGURACION'],
14     'PDR': df['Promedio']
15 }).sort_values(by='PDR', ascending=False).reset_index(drop=True)
16
17 # Normalización para aplicar viridis
18 norm = mcolors.Normalize(vmin=temp_df['PDR'].min(), vmax=temp_df['PDR'].max())
19 cmap = plt.cm.viridis
20 bar_colors = cmap(norm(temp_df['PDR'].values))
21
22 # Crear figura y ejes
23 fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))
24 bars = ax.bar(temp_df['PHY'], temp_df['PDR'], color=bar_colors)
25
26 # Etiquetas sobre las barras
27 for bar, value in zip(bars, temp_df['PDR']):
28     ax.text(bar.get_x() + bar.get_width() / 2, bar.get_height() + 0.01,
29           f'{value:.2f}', ha='center', va='bottom', fontsize=9)
30
31 # Personalización
32 ax.set_xticklabels(temp_df['PHY'], rotation=45, ha='right', fontsize=10)
33 ax.set_ylabel('PDR Promedio', fontsize=12)
34 ax.set_title('PDR Promedio por Configuración PHY (OPENMOTE-B)', fontsize=14)
35 ax.set_ylim(0, 1.05)
36 ax.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.6)
37
38 # Barra de color
39 sm = plt.cm.ScalarMappable(cmap=cmap, norm=norm)
40 sm.set_array([])
41 cbar = fig.colorbar(sm, ax=ax)
42 cbar.set_label('Nivel de PDR', fontsize=11)
43
44 plt.tight_layout()
45 plt.show()
46

```

## Bibliografía

802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. (2016). *IEEE-STD*, 1-709.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7460875>

ARCOTEL. (2015). *Boletín Estadístico del Sector de Telecomunicaciones-Nº6*. ARCOTEL.

<https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/11/Boletin6.pdf>

ARCOTEL. (2018). *Norma Técnica de espectro de uso libre y de espectro para uso determinado*

*en bandas libres*. ARCOTEL. [http://www.arcotel.gob.ec/wp-](http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2019/05/R.O.-545_-Res_ARCOTEL-2018-0661-UL-UDBL.pdf)

[content/uploads/2019/05/R.O.-545\\_-Res\\_ARCOTEL-2018-0661-UL-UDBL.pdf](http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2019/05/R.O.-545_-Res_ARCOTEL-2018-0661-UL-UDBL.pdf)

ARCOTEL. (2021). *Plan Nacional de Frecuencias*. ARCOTEL. [https://www.arcotel.gob.ec/wp-](https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2021/10/PNF-V.6.0_14-07-21_v.1.pdf)

[content/uploads/2021/10/PNF-V.6.0\\_14-07-21\\_v.1.pdf](https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2021/10/PNF-V.6.0_14-07-21_v.1.pdf)

Asaduzzaman, A., Chidella, K., & Mridha, M. (2015). A Time and Energy Efficient Parking

System Using ZigBee Communication Protocol. *IEEE SoutheastCon*, 1-5.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/SECON.2015.7132927>

Castillo, E., & Marticorena, P. (2022). *Red LPWAN que mide el consumo de agua potable en el*

*distrito de Daniel Hernández*. [https://repositorio.unh.edu.pe/bitstreams/89cd239a-966a-](https://repositorio.unh.edu.pe/bitstreams/89cd239a-966a-4d2b-85cc-957e0e047aea/download)

[4d2b-85cc-957e0e047aea/download](https://repositorio.unh.edu.pe/bitstreams/89cd239a-966a-4d2b-85cc-957e0e047aea/download)

Chang, K.-H., & Mason, B. (2012). The IEEE 802.15.4g standard for smart metering utility

networks. *IEEE SmartGridComm*, 476-480.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2012.6486030>

Díaz, J., & Mejía, M. (2019). *Implementación de un algoritmo para la detección de nodos caídos*

*y fallos de enlace en topologías tipo árbol utilizando el estándar IEEE 802.15.4*. Tesis de

pregrado, Escuela Politécnica Nacional.

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20267/1/CD%209723.pdf>

- Gardašević, G., Katzis, K., Bajić, D., & Berbakov, L. (2020). Emerging Wireless Sensor Networks and Internet of Things Technologies—Foundations of Smart Healthcare . *MDPI*, 20(13). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s20133619>
- Geeksforgeeks. (22 de febrero de 2023). *Introduction of IEEE 802.15.4 Technology*. Geeksforgeeks: <https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/introduction-of-ieee-802-15-4-technology/>
- Gélvez, L., & Santos, L. (2020). Internet de las Cosas: una revisión de vulnerabilidades, amenazas y contramedidas. *Revista Ingenio*, 17(1), 56-64. <https://doi.org/https://doi.org/10.22463/2011642x.2370>
- Hanes, D., Salgueiro, G., Grossetete, P., Barton, R., & Henry, J. (2017). *IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and use cases for the Internet of Things*. CISCO Press. <https://nibmehub.com/opac-service/pdf/read/IoT%20Fundamentals.pdf>
- Harada, H., Mizutani, K., Fujiwara, J., Mochizuki, K., Obata, K., & Okumura, R. (2017). IEEE 802.15.4g Based Wi-SUN Communication Systems. *IEICE Transactions on Communications*, E100(7), 1032-1043. <https://doi.org/https://doi.org/10.1587/transcom.2016SCI0002>
- Hernández, S. (2020). *Estudio en detalle de LoRaWAN. Comparación con otras tecnologías LPWAN considerando diferentes patrones de tráfico*. <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/106369/7/shernandezc6TFM0120memoria.pdf>
- IEEE STD. (2012). 802.15.4g-2012 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-- Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering

- Utility Networks. *IEEE Standards*, 1-252.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6190698>
- Keysight Solutions. (2015). *What is the Internet of Things (IoT)?* Keysight Solutions:  
[https://www.keysight.com/us/en/other/cia404.html?srcurl=https://www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/All/06\\_IoT\\_M2M.pdf](https://www.keysight.com/us/en/other/cia404.html?srcurl=https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/06_IoT_M2M.pdf)
- Laoyan, S. (6 de febrero de 2025). *Qué es la metodología waterfall y cuándo utilizarla*. asana:  
<https://asana.com/es/resources/waterfall-project-management-methodology>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-scale IoT Deployment. *ICT Express*, 5(1), 1-7.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>
- Mendivil, L. (2017). *Comparación de soluciones basadas en LPWAN e IEEE 802.15.4 para aplicaciones de salud móvil ("m-Health")*. Tesis de postgrado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.  
[https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1274/1/tesis\\_LJGM\\_2017.pdf#:~:text=La%20tecnolog%C3%ADa%20inal%C3%A1mbrica%20basada%20en,dise%C3%B1ada%20para%20operar%20sobre%20bandas](https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1274/1/tesis_LJGM_2017.pdf#:~:text=La%20tecnolog%C3%ADa%20inal%C3%A1mbrica%20basada%20en,dise%C3%B1ada%20para%20operar%20sobre%20bandas)
- Muñoz, J. (2019). *km-scale Industrial Networking*. Université Pierre et Marie Curie. Computer Science [cs]. UPMC - Sorbonne. <https://theses.hal.science/tel-02285706v2/document>
- Portilla, D., Quintana, W., & Salazar, M. (2024). Topología de Malla para la Simulación, Resiliencia a Fallos y Optimización de. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 9(3), 51-56. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-seguridad-defensa/article/download/3760/3231>

- Righetti, F., Vallati, C., Comola, D., & Anastasi, G. (2019). Performance Measurements of IEEE 802.15.4g Wireless Networks. *IEEE WoWMoM*, 1-6.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2019.8793051>
- Singh, A. (16 de abril de 2025). *¿Qué es la topología punto a punto?* Shiksha Online:  
[https://www-shiksha-com.translate.google.com/online-courses/articles/what-is-point-to-point-topology-blogId-156937?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-shiksha-com.translate.google.com/online-courses/articles/what-is-point-to-point-topology-blogId-156937?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)
- Sum, C.-S., Azizur, M., Lu, L., Kojima, F., & Harada, H. (2012). On communication and interference range of IEEE 802.15.4g smart utility networks. *IEEE WCNC*, 1169-1174.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/WCNC.2012.6213953>
- Tonato, C., & Sinche, S. (2022). Análisis comparativo entre arquitecturas de sistemas IoT. *RITI*, 10(21), 40-55. <https://doi.org/https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.006>
- Topologías de Redes. (2019). *Topología de red en estrella*. Topologías de Redes:  
<https://topologiasdered.com/red-en-estrella/>
- Véliz, K., & Mar, O. (2022). Estado del arte de un sistema IoT, para la interacción con los visitantes de museos. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, 15(3), 124-138. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8590689.pdf>
- Yachirema, D. (2019). *Arquitectura de interoperabilidad de dispositivos físicos para el internet de las cosas (IoT)*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.  
<https://riunet.upv.es/bitstreams/607a90e6-2e90-4fb7-baa0-2322bd86edbc/download>