



**Universidad
de Jaén**

Escuela Politécnica Superior
de Linares

Trabajo Fin de Grado

Análisis de cobertura radioeléctrica de sistema LoraWAN privado para monitorización de la calidad del agua.

Alumno: Antonio Jesús Quesada Salas

Tutor 1: Prof. D. Pedro Jesús Reche López

Tutor 2: Daniel Martos Pancorbo

**Depto.: Departamento de Ingeniería de
Telecomunicación**



**Universidad
de Jaén**

Escuela Politécnica Superior
de Linares

Análisis de cobertura radioeléctrica de sistema LoraWAN privado para monitorización de la calidad del agua.

Firma del alumno:

Firma tutor 1:

Firma tutor 2:

Resumen

Este proyecto surge a raíz de la disparidad entre el análisis teórico y los valores medidos observados en las implementaciones de redes LoRaWAN en entornos urbanos, con el propósito de establecer un sistema de monitorización de la calidad del agua en diversas ubicaciones de la ciudad. El proyecto se enfoca en realizar un análisis exhaustivo de la cobertura de radio utilizando la frecuencia de 868 MHz a través de la tecnología de comunicación LoRa, evaluando las antenas empleadas en la comunicación inalámbrica para la medición de la calidad del agua. Se procederá a un análisis crítico de diversas fuentes bibliográficas para determinar su relevancia y similitud con el trabajo en curso, complementando el estudio con un análisis detallado de los parámetros de propagación. Entre estos parámetros se incluyen la modulación, el ancho de banda, y otros factores técnicos cruciales. Además, se llevará a cabo una revisión de la normativa vigente para la frecuencia de 868 MHz y un análisis de la estación base. El objetivo es proporcionar información técnica valiosa para futuras implementaciones de redes LoRa por parte de InnovaSur. Se realizará una simulación de la cobertura de radio, comparando los resultados teóricos con las mediciones empíricas. Adicionalmente, se analizará el dispositivo Smart Water Plug&Sense de Libelium, calibrando sus sondas una vez que la red LoRaWAN esté operativa. Este enfoque metodológico permitirá una evaluación precisa y detallada de las capacidades y limitaciones de las redes LoRaWAN en entornos urbanos, proporcionando una base sólida para mejorar las futuras implementaciones y optimizaciones de estas redes en aplicaciones de monitorización ambiental.

Abstract

This project addresses the discrepancy between theoretical analysis and measured values in the implementation of LoRaWAN networks in urban environments. The aim is to establish a water quality monitoring system across various city locations. The project will conduct a detailed analysis of radio coverage using the 868 MHz frequency through LoRa communication, evaluating the antennas used in wireless communication for water quality measurement. A critical analysis of various bibliographic sources will be performed to determine their relevance and similarity to the current work, complemented by an in-depth analysis of propagation parameters. These parameters include modulation, bandwidth, and other crucial technical factors. Additionally, a review of the regulations for the 868 MHz frequency and an analysis of the base station will be conducted. The objective is to provide valuable technical information for future LoRa network implementations by InnovaSur. A radio coverage simulation will be performed, comparing theoretical results with empirical measurements. Furthermore, the Smart Water Plug&Sense device from Libelium will be studied, calibrating its sensors once the LoRaWAN network is operational. This methodological approach will allow for an accurate and detailed evaluation of the capabilities and limitations of LoRaWAN networks in urban environments, providing a solid foundation for improving future implementations and optimizations of these networks in environmental monitoring applications.

Índice

1	Capítulo 1	11
1.1	Introducción	11
1.2	Justificación del trabajo.....	11
1.3	Objetivos del trabajo fin de grado.....	12
1.4	Descripción de tareas realizadas en el trabajo fin de grado	12
1.5	Organización de la memoria	14
2	Capítulo 2: Estado del arte	15
2.1	Revisión de tecnologías LPWAN.....	15
2.2	Revisión bibliográfica estado del arte	16
2.3	Revisión de simuladores disponibles	18
2.3.1	Simuladores tipo outdoor	19
2.3.2	Simuladores tipo calculadora	22
3	Capítulo 3: LoRa y LoRaWAN.....	25
3.1	Introducción	25
3.2	Lora.....	25
3.2.1	Modulación CSS (Chirp spread spectrum).....	27
3.2.2	Tasa de error de bit	34
3.3	LoRaWAN.....	35
3.3.1	Introducción LoRaWAN	35
3.3.2	Estación base.....	35
3.3.3	Tipos de nodos finales.....	36
3.3.4	Seguridad en LoRaWAN	36
3.3.5	Tiempo en aire y ancho de banda	37
4	Materiales y métodos.....	39
4.1	Introducción	39
4.2	Modelo de espacio libre:.....	40
4.3	Modelo sobre tierra plana:	41
4.4	Reflexión en Tierra esférica.....	43
4.5	Cálculo de pérdidas adicionales debido a obstáculo tipo arista de cuchillo	45
4.6	Modelo de Lee:.....	46
4.7	Modelo Cost 231	48
4.8	Cálculo de pérdidas adicionales por difracción por tierra esférica.....	50

4.9	Estación base.....	53
4.10	Libelium Smart Water	55
4.11	Software waspmote:	56
4.12	Sensores de medición:	57
4.12.1	Sensor de PH:	57
4.12.2	Sensor ORP	60
4.12.3	Sensor de Oxígeno disuelto.....	62
4.12.4	Sensor de conductividad	64
4.12.5	Sensor de Temperatura.....	66
4.12.6	Sensor de turbidez:	66
4.13	Medidor LoraWAN	68
4.14	Plan de pruebas.....	69
4.14.1	Objetivo	69
5	Capítulo 5: Resultados y conclusiones	71
5.1	Cálculos teóricos.....	72
5.1.1	Espacio Libre.....	72
5.1.2	Modelo Cost 231	73
5.1.3	Modelo Tierra Plana	75
5.1.4	Reflexión en Tierra esférica.....	76
5.1.5	Modelo de Lee.....	78
5.1.6	Comparación atenuación modelo COST 231 y Modelo de Espacio libre	81
5.2	Simulaciones de cobertura.....	81
5.2.1	Simulación con Radio Mobile	82
5.2.2	Simulación con Xirio online	83
5.3	Conclusiones.....	87
5.4	Líneas futuras	88
6	Anexos	89
6.1	Anexo sensor de PH.....	89
6.2	Anexo sensor ORP:	90
6.3	Anexo Sensor Oxígeno disuelto.....	91
6.4	Anexo sensor de Conductividad	92
6.5	Anexo sensor de Temperatura.....	93
6.6	Anexo sensor de turbidez.....	94
6.7	Anexo código final Libelium Smart Water.....	95
6.8	Anexo librerías Waspnote	99
6.9	Anexo adición de dispositivo en estación base.....	99

6.10	Anexo toolbox MATLAB.....	101
6.10.1	Función Ate_Tierra_Plana	101
6.10.2	Función Ate_Cost231	102
6.10.3	Función Potencia_Lee	103
6.10.4	Función Ate_Arista	103
6.10.5	Función Ate_Espacio_libre	104
6.10.6	Función Ate_Curvatura	104
6.10.7	Función Ate_Curvatura2	105
6.10.8	Función dBm2dBu	106
6.10.9	Script ejemplo de uso Toolbox	106
7	Bibliografía	114

Índice de figuras

Figura 2.1 Comparativa comunicación inalámbrica [35].....	14
Figura 2.2 Interfaz de trabajo con Xirio.....	19
Figura 2.3 Entorno de trabajo Radio Mobile	21
Figura 3.1 Modelo OSI [14].....	24
Figura 3.2 Modulación en secuencia directa DSS [34]	26
Figura 3.3 Forma de onda de un chirp ascendente.....	27
Figura 3.4 Variación de frecuencia de un chirp ascendente y descendente sin modular.....	28
Figura 3.5 Señal LoRa sin modular y modulada.....	28
Figura 3.6 Régimen binario señal LoRa y relación con SF	28
Figura 3.7 Tasa de error de bit [7]	32
Figura 4.1 Modelo de espacio libre [19].....	38
Figura 4.2 Modelo de tierra plana [20]	41
Figura 4.3 Modelo de tierra plana [20]	41
Figura 4.4 Tierra plana con obstáculo	43
Figura 4.5 Pérdidas por difracción en una arista en filo de cuchillo.....	46
Figura 4.6 Modelo Cost 231	46
Figura 4.7 Estación base [16].....	51
Figura 4.8 Potencia de transmisión configurada.....	52
Figura 4.9 Waspote [21].....	53
Figura 4.10 Software Waspote.....	54
Figura 4.11 Referencia PH [22].....	55
Figura 4.12 Sensor de PH.....	56
Figura 4.13 Sockets Libelium [24].....	56
Figura 4.14 Referencias ORP [26]	58
Figura 4.15 Sensor ORP [25]	59
Figura 4.16 Sensor de Oxígeno disuelto [27].....	60
Figura 4.17 Sensor de conductividad [29]	62
Figura 4.18 Sensor de Temperatura [31].....	63
Figura 4.19 Placa Waspote [4].....	64
Figura 4.20 Posición sensor de turbidez [4].....	67
Figura 4.21 Medidor Lora [33].....	69
Figura 5.1 Ubicaciones medidas reales.....	71
Figura 5.2 Comparación resultados modelo Espacio libre y medidas reales.....	73
Figura 5.3 Comparación resultados modelo COST231 y medidas reales.....	74
Figura 5.4 Comparación resultados Tierra esférica y medidas reales.....	75
Figura 5.5 Comparación resultados Modelo de Lee y medidas reales.....	77
Figura 5.6 Comparación de atenuación en función de la distancia.....	79
Figura 5.7 Simulación con Radio Mobile.....	81
Figura 5.8 Simulación modelo de Espacio Libre.....	82
Figura 5.9 Simulación modelo Cost 231.....	81
Figura 5.10 Comparación modelo Espacio libre en Xirio y medidas reales.....	82
Figura 5.11 Comparación modelo COST231 en Xirio y medidas reales	
Figura 6.1 Adición de nodo a la estación.....	96

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Comparativa tecnologías inalámbricas [35]	14
Tabla 2.2 Comparativa tecnologías LPWAN [36].....	15
Tabla 2.3 Comparativa alcance artículos/trabajos relacionados	17
Tabla 2.4 Modelos disponibles en Xirio online.....	19
Tabla 2.5 Modelos disponibles en EDX	20
Tabla 3.1 Ancho de banda.....	29
Tabla 3.2 Factor de dispersión [3]	30
Tabla 3.3 Seguridad en LoRaWAN.....	35
Tabla 3.4 Factor de dispersión, tiempo en aire y throughput	35
Tabla 4.1 Atenuaciones Tierra Plana	43
Tabla 4.2 Especificaciones módulo LoRa.....	51
Tabla 4.3 Especificaciones técnicas.....	54
Tabla 4.4 Sockets Libelium.....	57
Tabla 4.5 Referencias oxígeno disuelto.....	60
Tabla 4.6 Referencias conductividad.....	62
Tabla 4.7 Pruebas realizadas.....	67
Tabla 5.1 Resultados modelo de Espacio libre.....	69
Tabla 5.2 Resultados modelo COST231	70
Tabla 5.3 Resultados modelo de Tierra plana.....	71
Tabla 5.4 Resultados reflexión en Tierra esférica.....	72
Tabla 5.5 Resultados modelo de Lee	74
Tabla 5.6 Resultados simulación modelo de Espacio libre.....	76
Tabla 5.7 Resultados simulación modelo COST231.....	78

1 Capítulo 1

1.1 Introducción

Este proyecto surge a raíz de la diferencia entre el análisis teórico de la red LoRaWAN en un entorno urbano y los resultados reales obtenidos al implementarla en una ciudad con numerosos edificios que dificultan la propagación de la señal. La red LoRaWAN se desplegará con el objetivo de analizar la calidad del agua en diferentes puntos de la ciudad, con el fin de establecer un sistema de monitorización que permita detectar variaciones en la calidad del agua y tomar medidas adecuadas en consecuencia. Para ello se realizará una revisión bibliográfica y estudio de la tecnología LoRaWAN para Internet de las Cosas (IoT), se hará un estudio de cobertura utilizando diferentes softwares de simulación para obtener un amplio abanico de resultados y posteriormente se comparará el sistema en estudio teórico con las medidas tomadas en la realidad. Además, se pretende instaurar una nueva tecnología de comunicaciones inalámbricas de alto alcance en áreas remotas, sin necesidad de Internet o almacenamiento local, aprovechando recursos tecnológicos para sectores como el agrario. Para no depender de una toma de corriente convencional, se propone un sistema de generación de energía renovable con un panel fotovoltaico para dotar de autonomía la estación que medirá la calidad del agua. Con la red LoRaWAN en producción, se llevará a cabo un estudio del dispositivo Smart Water Plug&Sense de Libelium junto con sus sensores, seguido de una calibración de los mismos.

1.2 Justificación del trabajo

Este proyecto se realiza debido a la necesidad de abordar la discrepancia entre los análisis teóricos y los resultados medidos durante la implementación de redes LoRaWAN en entornos urbanos complejos. La propagación de la señal en una ciudad con numerosos edificios presenta desafíos significativos, lo que hace crucial entender cómo estas barreras afectan la eficiencia y fiabilidad de la red LoRaWAN en la práctica.

Este proyecto resulta de interés para la empresa InnovaSur, ya que proporciona datos valiosos para la planificación de cobertura radioeléctrica en entornos urbanos complejos. Adicionalmente, permite obtener conclusiones sobre la herramienta de simulación más adecuada para futuros proyectos de IoT con sensores LoRa. Esto resulta esencial para comprender las posibles dificultades que pueden surgir al ubicar equipos en áreas densamente urbanizadas sin línea de visión directa, optimizando así la eficiencia y fiabilidad de las implementaciones. La incorporación de estas métricas y análisis detallados contribuye significativamente a la toma de decisiones informadas en el diseño y despliegue de redes de sensores IoT en entornos desafiantes.

En conclusión, este proyecto busca cerrar la brecha entre la teoría y la práctica en el despliegue de redes LoRaWAN y promover la innovación en el uso de IoT tanto en entornos urbanos complejos como en entornos rurales.

1.3 Objetivos del trabajo fin de grado

El objetivo de este trabajo es la realización de un estudio de cobertura radioeléctrica usando la frecuencia de 868 MHz, observando las características de las antenas empleadas en la comunicación inalámbrica, tanto la antena de la estación base como la antena del dispositivo encargado de captar los diferentes parámetros para medir la calidad del agua, obteniendo así un análisis en profundidad para futuras redes Lora que puedan ser puestas en producción por la empresa InnovaSur.

Una vez se hayan estudiado los equipos a utilizar será necesario realizar una simulación de la cobertura radioeléctrica siguiendo el modelo de propagación que más se ajuste al escenario final de dicha comunicación, adicionalmente se calculará la cobertura teórica mediante diferentes modelos de propagación usando MATLAB y se compararán los resultados obtenidos con el simulador y con MATLAB.

Finalmente, siguiendo los resultados obtenidos, se pondrá en práctica el estudio teórico, observando y analizando si el mismo es viable en el entorno elegido, valorando si la comunicación inalámbrica obtenida es suficientemente estable o puede ser susceptible a desconexiones.

Teniendo como objetivo principal el análisis radioeléctrico de una red Lora privada para la monitorización de la calidad del agua se deberán conseguir los siguientes objetivos específicos:

- Estudio de la arquitectura y funcionamiento de una red LoraWAN.
- Diseño de la arquitectura de red necesaria para la red LoraWAN.
- Configuración de la estación base y el equipo que medirá la calidad del agua.

1.4 Descripción de tareas realizadas en el trabajo fin de grado

Durante la ejecución del presente trabajo fin de grado, se han realizado las siguientes tareas técnicas:

- **Análisis Bibliográfico:** Se ha llevado a cabo una revisión exhaustiva de artículos y estudios previos relacionados con la tecnología LoRaWAN y aplicaciones similares, estableciendo una base comparativa para evaluar el alcance y relevancia de estos trabajos en el contexto del presente estudio.
- **Análisis Exhaustivo de la Tecnología LoRaWAN:** Se ha realizado un estudio detallado de la tecnología LoRaWAN, con un enfoque específico en los factores limitantes que impactan su desempeño en entornos urbanos, tales como la interferencia de edificaciones y la atenuación de la señal.

- Configuración de la Estación Base y del Dispositivo de Medición: Se ha realizado la configuración y puesta en marcha de la estación base y del dispositivo de medición de la calidad del agua, asegurando su correcto funcionamiento y su integración con la red LoRaWAN para la transmisión de datos.
- Mediciones de la Cobertura LoRaWAN: Se han realizado mediciones empíricas de la cobertura de la red LoRaWAN en la ubicación del dispositivo de medición de la calidad del agua, evaluando la eficacia de la señal y la capacidad de transmisión de datos en un entorno urbano complejo.
- Obtención y Análisis de Resultados: Tras la recopilación de datos de las mediciones de cobertura, se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos, permitiendo la formulación de conclusiones sobre el desempeño y la viabilidad de la red LoRaWAN para la monitorización de la calidad del agua en entornos urbanos.

Cronograma:

Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Análisis bibliográfico																
Análisis tecnología LoRaWAN																
Configuraciones dispositivos																
Mediciones cobertura																
Análisis de resultados																
Conclusiones																
Tutoría con tutor 1																
Tutoría con tutor 2																

Observando el cronograma anterior se puede visualizar de manera gráfica cómo se han distribuido la realización de las diferentes tareas en las semanas 1 a 16, siendo el tiempo de trabajo en cada semana de 30 horas.

Las tutorías han tenido un tiempo de dedicación de 2 horas cada una conformando un total de 14 horas distribuidas en las 16 semanas totales.

1.5 Organización de la memoria

La memoria del trabajo fin de grado está organizada en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: se presenta la introducción al tema, la justificación del trabajo, los objetivos principales y un resumen de las tareas realizadas durante la elaboración de la memoria.
- Capítulo 2: se lleva a cabo una revisión exhaustiva del estado del arte, analizando estudios y trabajos previos relevantes para el contexto del proyecto.
- Capítulo 3: se estudia en profundidad la tecnología LoRaWAN, con un enfoque en la modulación utilizada y factores críticos como el ancho de banda y otros parámetros técnicos relevantes.
- Capítulo 4: se revisan los diferentes modelos de propagación disponibles para el análisis teórico de la cobertura radioeléctrica. Además, se analiza el dispositivo utilizado en el estudio y se evalúan los diferentes softwares de simulación disponibles.
- Capítulo 5: se presentan los resultados obtenidos a lo largo del trabajo y se formulan las conclusiones derivadas del análisis de estos resultados, evaluando la viabilidad y efectividad de la implementación de la red LoRaWAN para la monitorización de la calidad del agua en entornos urbanos.

2 Capítulo 2: Estado del arte

2.1 Revisión de tecnologías LPWAN

LPWAN (Low Power Wide Area Network) es un tipo de red de comunicación inalámbrica diseñada para proporcionar conectividad de larga distancia con un consumo extremadamente bajo de energía. Estas redes están optimizadas para el envío eficiente de pequeños paquetes de datos, lo que las hace ideales para aplicaciones IoT donde los dispositivos están alimentados por baterías y requieren largos períodos de autonomía. Entre las tecnologías prominentes en este espacio se encuentran LoRa, Sigfox y NB-IoT, cada una ofreciendo diferentes ventajas en términos de cobertura, consumo de energía y costos de implementación.

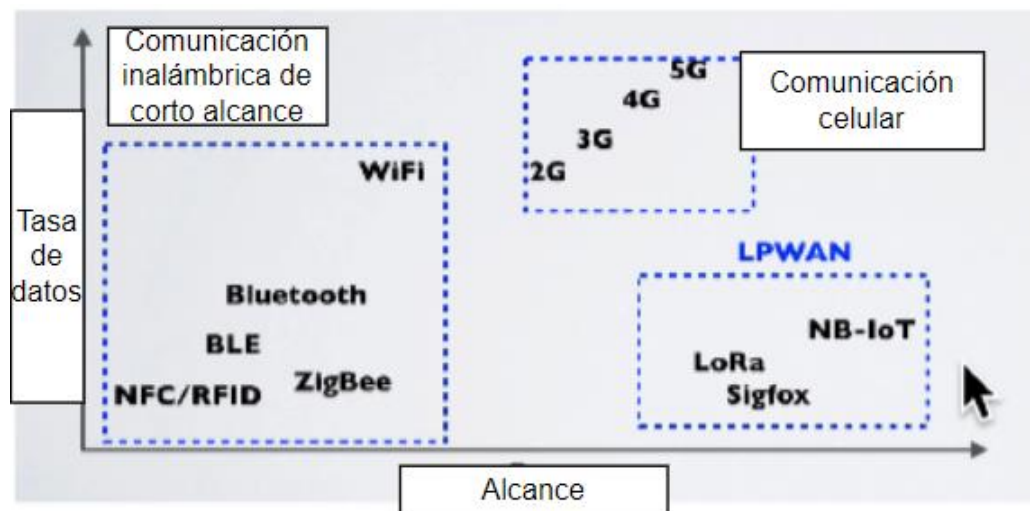


Figura 2.1 Comparativa comunicación inalámbrica [35]

En la figura 2.1 se compara tanto el alcance como la tasa de datos de las diferentes comunicaciones inalámbricas más usadas, viendo cómo LPWAN tiene un mayor alcance respecto a comunicaciones por WiFi por ejemplo teniendo una tasa de datos inferior.

Tecnología inalámbrica	Comunicación inalámbrica	Alcance (m)	Potencia transmitida
Bluetooth	Corto alcance	10	2.5 mW
WIFI	Corto alcance	50	80 mW
3G/4G	Celular	5000	500 mW
LoRa	LPWAN	5000 ambiente urbano hasta 15000 espacio libre y ambiente rural	20 mW

Tabla 2.1 Comparativa tecnologías inalámbricas [35]

En la tabla 2.2 se destacan las diferencias entre diversas tecnologías inalámbricas, resaltando especialmente la potencia utilizada por la red LoRa (20 mW), considerablemente menor en comparación con las tecnologías 3G/4G. A pesar de esto, la red LoRa muestra un alcance notablemente superior en condiciones ideales.

	LoRa	Sigfox	NB-IoT
Ancho de banda	250 KHz	100 Hz	200 KHz
Tasa de datos	20 Kbps	100 bps	200 Kbps
Red privada	Sí	No	No
Consumo de energía	Bajo	Bajo	Bajo

Tabla 2.2 Comparativa tecnologías LPWAN [36]

Al analizar la tabla 2.2, se observa que LoRa ofrece una red privada, a diferencia de Sigfox y NB-IoT. En términos de ancho de banda, LoRa proporciona el espectro más amplio entre las tres tecnologías. Comparado con Sigfox, LoRa exhibe una capacidad de ancho de banda significativamente superior. Al considerar la comparativa entre LoRa y NB-IoT, se descarta el uso de NB-IoT debido a los costos recurrentes asociados con las tarjetas SIM requeridas en los dispositivos para su operación, una exigencia que no aplica en LoRa.

2.2 Revisión bibliográfica estado del arte

Para la elaboración de la presente memoria, se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica de diferentes artículos publicados en revistas especializadas y actas de congresos relacionados con el tema central de este trabajo. En particular, se han analizado publicaciones que abordan diversas perspectivas teóricas y prácticas, contribuyendo así a un enfoque integral y actualizado del tema. Entre los artículos estudiados para la elaboración de esta memoria se encuentran investigaciones relevantes y estudios destacados que proporcionan una base sólida y rigurosa para el desarrollo del contenido presentado. Entre los artículos destacan:

En el estudio realizado por Semtech en 2019 [5], se llevó a cabo un exhaustivo análisis de la comunicación LoRa, definiendo sus características y especificando los rangos de cobertura que esta tecnología puede alcanzar según los distintos entornos de implementación. Se determinó que, en entornos urbanos, LoRa puede cubrir distancias de hasta 5 kilómetros, mientras que en entornos rurales su alcance puede extenderse hasta 15 kilómetros. Además, se destacó la importancia del bajo consumo energético de los dispositivos que emplean esta tecnología y su capacidad para transmitir la información medida mediante tramas de corta longitud, lo cual es crucial para aplicaciones en redes de sensores de bajo consumo y larga duración.

Este análisis es particularmente relevante para el presente trabajo, ya que se ha investigado tanto el alcance como la capacidad de la comunicación LoRa, aspectos fundamentales para su implementación efectiva en diversos escenarios.

Faber et al. [6] han llevado a cabo una investigación teórica y experimental sobre la comunicación LoRa en un canal AWGN (ruido aditivo blanco y gaussiano) y una relación señal-ruido (SNR) negativa. En este artículo, se subraya la importancia de la tasa de codificación en LoRa. Tras realizar estudios preliminares, se implementó el sistema bajo análisis, obteniéndose resultados que mostraron una concordancia significativa con los modelos teóricos propuestos. Este trabajo es de particular relevancia para el presente estudio, ya que ambos comparten el objetivo final de comparar los resultados teóricos con los obtenidos en la práctica, validando así la precisión y eficacia de los modelos teóricos en escenarios reales.

En Silva et al. [7], se realiza un análisis exhaustivo de los diversos parámetros asociados con la comunicación LoRa. Entre los aspectos examinados, se revisa la capacidad del canal, destacando la importancia de la relación señal-ruido (SNR). Además, se detalla el método para calcular el período de símbolo, considerando el factor de espectro y el ancho de banda disponible para la comunicación. El estudio también aborda la relación entre el régimen binario, el factor de espectro, el ancho de banda y la tasa de codificación. Se presentan las ecuaciones necesarias para el cálculo de la tasa de error de bit (BER) y se discuten los resultados obtenidos al implementar una pequeña red LoRa, proporcionando una visión integral y aplicada de los parámetros críticos que afectan el rendimiento de esta tecnología de comunicación. Este artículo es fundamental para esta memoria, ya que sirve de apoyo para el estudio de los diferentes parámetros relevantes en la comunicación LoRa, proporcionando una base teórica y experimental robusta para el análisis y la implementación

En Gilson et al. [8], se lleva a cabo una evaluación exhaustiva de una red LoRa con un alto número de dispositivos, considerando aspectos tales como el porcentaje de tramas recibidas sin error en la estación base. Además, se demuestra la capacidad de LoRa para la recepción de paquetes superpuestos y se evalúa el impacto del multitrayecto, las interferencias y el rendimiento del enlace ascendente. Este estudio es crucial para el presente trabajo, ya que se pretende evaluar las pérdidas causadas por las difracciones en entornos urbanos, proporcionando datos empíricos y análisis detallados que respaldan el objetivo de investigar la robustez y eficiencia de las redes LoRa en condiciones de alta densidad de dispositivos y complejidad ambiental.

Comparativa del alcance de los diferentes artículos mencionados respecto al alcance del presente trabajo:

Artículo/trabajo	Implementación real	Análisis LoraWAN	Mediciones reales	Estudio nodo final
Estudio de Semtech en 2019 [5]	No	Sí	No	Sí
Faber et al. [6]	Sí	Sí	Sí	No
Silva et al. [7]	Sí	Sí	No	No
Gilson et al. [8]	Sí	No	Sí	No

Tabla 2.3 Comparativa alcance artículos/trabajos relacionados

Como se puede observar en la Tabla 2.3, a la vista de la bibliografía consultada, aún se requiere más estudios que combinen resultados obtenidos mediante estudios analíticos o simulación y las mediciones en entornos reales, de forma que se puedan cotejar y comparar ambos tipos de estudios. En el presente trabajo se pretende presentar un análisis donde se combinen ambos tipos de estudios, destacando que modelos de propagación radioeléctrica permiten predecir con mayor exactitud los resultados que se obtienen en entornos reales.

2.3 Revisión de simuladores disponibles

A lo largo de esta sección se hará una revisión de los diferentes softwares de simulación de cobertura radioeléctrica aportando una serie de parámetros tales como distancia entre antenas, altura, grado de urbanización, etc

Se hará una distinción entre simuladores de tipo calculadora y simuladores de tipo outdoor [43].

Los simuladores de tipo outdoor son herramientas empleadas para modelar y analizar la propagación de señales radioeléctricas en entornos exteriores. Estas herramientas incluyen capacidades para el modelado del terreno, considerando la topografía y geografía del área, así como la representación de obstáculos como edificios y elementos naturales. Además, estos simuladores incorporan variables medioambientales, como condiciones climáticas, y la simulación de interferencias que pueden afectar la calidad y alcance de la señal.

Las calculadoras son herramientas técnicas utilizadas para el cálculo de diversos parámetros en sistemas de comunicaciones. Estas calculadoras consideran factores específicos como las pérdidas en espacio libre, la altura de las antenas, la distancia entre obstáculos y la frecuencia de operación. Mediante el uso de fórmulas y modelos matemáticos precisos, estas herramientas permiten evaluar y optimizar el rendimiento de enlaces de comunicación, proporcionando estimaciones precisas de las pérdidas de señal y facilitando la planificación y diseño de redes inalámbricas.

2.3.1 Simuladores tipo outdoor

2.3.1.1 Xirio

Xirio Online [9] es un software creado por la empresa Intelia Consultores en el año 2009, se trata de una herramienta muy útil en el terreno de las telecomunicaciones pues permite realizar simulaciones usando cartografía en alta resolución, en ambientes urbanos y rurales. Esta herramienta permite realizar diversas simulaciones haciendo uso de diferentes modelos de propagación, según se ajusten en mayor medida al escenario real de la simulación radioeléctrica. Xirio Online utiliza la cartografía proporcionada por GoogleMaps, teniendo así la cartografía de todo el mundo para poder realizar los análisis radioeléctricos, existe la herramienta SharePlace, que permite compartir los resultados con otras personas y consultar otros estudios que se hayan realizado previamente.

En cuanto a los modelos de propagación con los que se puede trabajar utilizando la herramienta Xirio son los siguientes:

Modelo/método	Validez y uso
Rec. UIT-R P.526	Válido para frecuencias superiores a 30 MHz, utilizado para simulación en entornos rurales y mixtos.
Método Deygout	Válido para frecuencias superiores a 30 MHz, utilizado para simulación en entornos rurales y mixtos.
Método de línea de vista	Uso únicamente para condiciones de despejamiento, usando la atenuación en espacio libre.
Rec. UIT-R P.1546	Válido para frecuencias de 30 MHz a 1 GHz, utilizado para simulación en entornos rurales con distancias superiores a 100 km.
Modelo Okumura-Hata	Válido para frecuencias de 150 MHz a 2 GHz, utilizado para simulación en entornos rurales y urbanos.
Modelo Xia-Bertoni	Válido para frecuencias de 800 MHz a 2 GHz, utilizado para simulación en entornos urbanos.
Rec. UIT-R P.1411	Válido para frecuencias de 800 MHz a 5 GHz, utilizado para simulación en entornos urbanos.
Modelo COST 231	Válido para frecuencias de 800 MHz a 2 GHz, utilizado para simulación en entornos urbanos.
Método Stanford University Interim	Válido para frecuencias menores de 11 GHz, recomendado para simulaciones WiMAX.

Rec. UIT-R P.1812	Válido para frecuencias de 30 MHz a 3 GHz, utilizado para simulación en entornos rurales y mixtos.
Rec. UIT-R P.452	Válido para frecuencias de 700 MHz a 50 GHz, utilizado para el cálculo de interferencias en radioenlaces de servicio fijo.
Rec. UIT-R P.528	Válido para frecuencias de 125 MHz a 15.5 GHz, utilizado para el cálculo en servicios móviles aeronáuticos y de radionavegación que usan ondas métricas, decimétricas y centimétricas.
Rec. UIT-R P.1147	Válido para frecuencias de 150 KHz a 1700 KHz, utilizado para vanos de 50 a 12000 km.

Tabla 2.4 Modelos disponibles en Xirio online

La ventaja de Xirio Online es la versatilidad en cuanto a los diferentes modelos de propagación con los que se pueden realizar las simulaciones, así como los diferentes tipos de antenas que se pueden usar, el inconveniente es que para la realización de simulaciones utilizando algunos modelos y con resolución alta y media es necesario afrontar un pago.



Figura 2.2 Interfaz de trabajo con Xirio

2.3.1.2 EDX Signal Pro

EDX Signal Pro [10] se trata de un software parecido a Xirio Online, el cual permite la realización de simulaciones de cobertura radioeléctrica en redes 5G, LTE, FWA, IOT, LMR y MESH. El rango de frecuencias que permite usar va desde los 30MHz a 100 GHz y permite realizar la planificación añadiendo factores atenuantes como vegetación, construcciones, obstrucciones, etc.

Los modelos de propagación que utiliza EDX Signal Pro son una combinación de los siguientes modelos:

Modelo/método	Validez y uso
Modelos de trazado de rayos en 2D y 3D	Utilizado en microcélulas exteriores y entornos LAN, PBX y células extendidas inalámbricas de interiores
Modelo de interiores simplificado de EDX	Diseñado para los cálculos de señal en interiores usando el rayo directo y la penetración en interiores.
Modelo de propagación COST-231 Walfisch-Ikegami	Utilizado en estudios simplificados de microcélulas exteriores.

Tabla 2.5 Modelos disponibles en EDX

Al igual que Xirio permite compartir las simulaciones creadas con grupos de trabajo para no duplicar trabajos similares, así como el análisis radioeléctrico haciendo uso de diferentes modelos de propagación, una de las ventajas que tiene EDX Signal Pro respecto a Xirio [10] [9] es el modo de pago, con Xirio tenemos un crédito que se va agotando a medida que se realizan las simulaciones de alta resolución, en cambio, EDX permite realizar pagos de forma mensual o por uso, permitiendo un número flexible de usuarios. Una desventaja sería que para hacer uso de Xirio basta con entrar en la web mientras que EDX necesita una instalación en un ordenador.

2.3.1.3 Radio Mobile

Radio Mobile [11] es un software al igual que EDX y Xirio que permite realizar análisis radioeléctricos, este software tiene una gran ventaja respecto a los dos anteriores, es gratuito, aunque tiene una gran limitación respecto a los dos software anteriores y es que no permite realizar simulaciones haciendo uso de varios modelos de propagación, permite el uso de un único modelo y se trata del modelo Longley-Rice, es un modelo de predicción troposférica para transmisión radio sobre terrenos irregulares en enlaces de medio-largo alcance, este software está mucho más limitado en cuanto a frecuencias ya que permite trabajar en un rango de 20 MHz a 40 GHz y unas distancias de entre 1 y 2000 kilómetros. Al igual que el software EDX para trabajar con Radio Mobile será necesario instalar los diferentes paquetes del mismo en un ordenador.

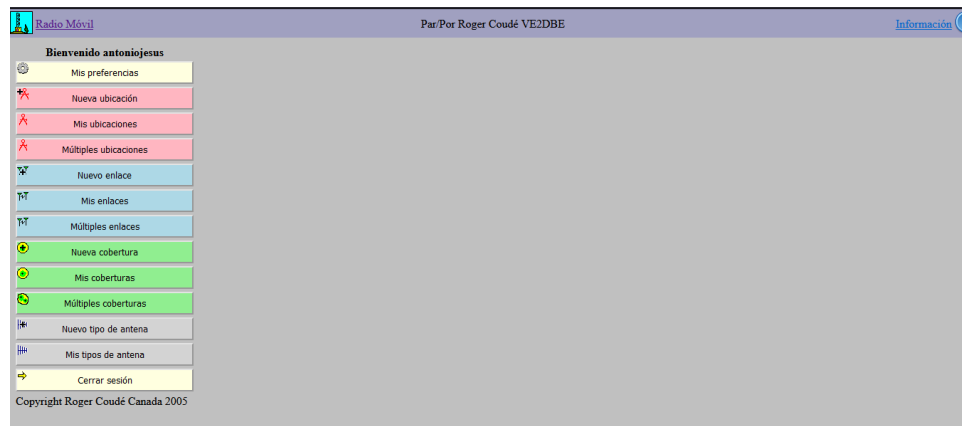


Figura 2.3 Entorno de trabajo Radio Mobile

2.3.2 Simuladores tipo calculadora

2.3.2.1 Calculadora online everythingRF

La calculadora online everythingRF [12] en espacio libre permite realizar cálculos de la atenuación que tendrá una señal al propagarse en espacio libre, para realizar el cálculo solamente habrá que introducir la distancia entre antenas, la ganancia de la antena transmisora y receptora, así como la frecuencia de operación. Haciendo uso de esta calculadora podremos saber las pérdidas que tendremos como mínimo a la hora de la realización de una comunicación RF.

La calculadora online everythingRF de transmisión de Friis [13] permite realizar cálculos de la potencia en dBm y en vatios que llegará a la antena receptora al propagarse una señal en espacio libre, para realizar el cálculo solamente habrá que introducir la distancia entre antenas, la ganancia de la antena transmisora y receptora, la potencia transmitida, así como la longitud de onda de operación. Haciendo uso de esta calculadora podremos saber la cantidad de potencia que llegará a la antena receptora en condiciones ideales.

2.3.2.2 Calculadora online GBPR

La calculadora en línea GBPR [37] permite calcular los límites de la zona de Fresnel, lo cual es fundamental para evaluar cómo los obstáculos en el entorno pueden afectar una comunicación inalámbrica. Existen varias zonas de Fresnel, siendo la más crítica la primera zona, que se encuentra más cercana a la línea de visión directa entre el transmisor y el receptor. La presencia de obstáculos en esta primera zona puede inducir reflexiones y difracciones que deterioran la calidad de la señal.

Para utilizar la calculadora, es necesario ingresar la frecuencia de operación, la distancia del transmisor al obstáculo y la distancia del obstáculo al receptor. Sin embargo, en este análisis, no se tratará de un único obstáculo, lo que complicaría significativamente la determinación de la distancia del obstáculo más crítico. Por esta razón, se ha decidido no utilizar esta calculadora en la elaboración de la presente memoria.

La calculadora en línea GBPR [38] permite calcular las pérdidas ocasionadas por un obstáculo tipo filo de cuchillo en el enlace de transmisión. Este tipo de obstrucción se refiere a un obstáculo con un borde afilado que difracta la onda electromagnética, causando pérdidas adicionales en la señal. Para utilizar esta calculadora, es necesario conocer la distancia entre el transmisor y la obstrucción, la altura de la misma y la frecuencia de operación. Al igual que con la calculadora de la zona de Fresnel, esta herramienta no será utilizada en el presente informe debido a la complejidad de determinar con precisión la distancia entre la obstrucción y la antena transmisora, además habría más de un obstáculo dificultando aún más el cálculo.

La herramienta de cálculo de elevación de antenas transmisora y receptora [39] permite determinar los ángulos de elevación óptimos necesarios para una alineación adecuada. Para utilizar esta calculadora, es esencial tener información precisa sobre la altura de la antena transmisora y receptora respecto al suelo, así como la distancia entre ambas antenas. Además, se emplea el coeficiente de tierra ficticia $k=1.33$, que representa el factor de radio efectivo de la Tierra, influyendo en la pérdida de señal debido a la propagación sobre el terreno.

Este procedimiento es crucial en el diseño y la implementación de sistemas de comunicaciones inalámbricas, asegurando una óptima orientación de las antenas para maximizar la eficiencia y la calidad de la transmisión de señales. Los ángulos de elevación calculados permiten establecer una conexión robusta y confiable entre las antenas, optimizando el rendimiento del sistema en diferentes condiciones de terreno y distancia.

3 Capítulo 3: LoRa y LoRaWAN

3.1 Introducción

En el capítulo 3 se llevará a cabo una revisión bibliográfica de las tecnologías LoRa y LoRaWAN, examinando sus peculiaridades y características distintivas. A continuación, se presenta una breve introducción sobre LoRa Alliance y Semtech, dos entidades clave en el desarrollo y promoción de estas tecnologías.

LoRa Alliance es una asociación de empresas fundada en 2015 con el propósito de abordar las necesidades de conectividad en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT). Esta organización sin ánimo de lucro promueve el uso de la tecnología LoRa en el ecosistema IoT, enfocándose en la definición y desarrollo de normas para el protocolo LoRaWAN, asegurando la interoperabilidad, escalabilidad y seguridad en los despliegues de IoT. Además, ofrece un programa de certificación para dispositivos LoRaWAN y fomenta la colaboración entre sus miembros, impulsando el desarrollo de nuevas soluciones y la adopción de mejores prácticas en la industria.

Semtech Corporation es una empresa líder en la industria de semiconductores, especializada en el diseño y suministro de productos analógicos y de señal mixta de alta precisión. Destaca por su enfoque en la tecnología LoRa y LoRaWAN, siendo reconocida por el desarrollo de chips LoRa, esenciales para la comunicación de largo alcance y baja potencia, ampliamente utilizados en el ecosistema IoT.

En resumen, tanto LoRa Alliance como Semtech desempeñan roles cruciales en la estandarización, certificación y desarrollo de la tecnología LoRa y LoRaWAN, contribuyendo significativamente al avance de la conectividad IoT a nivel global.

3.2 Lora

El significado de LoRa es Long Range, utilizando este método de comunicación inalámbrico se consigue una red con un gran alcance, haciendo uso de una potencia muy baja, LoRa es un protocolo propietario desarrollado por Semtech [1]., se basa en el uso de la modulación CSS, dicha modulación utiliza la técnica de espectro ensanchado, haciendo uso de los pulsos “chirp” modulados en frecuencia lineal, de forma que la información se transmite en ráfagas. El protocolo LoRa está específicamente destinado a su uso en el mundo IoT, ya que este presenta normalmente tasas de transmisión de datos bajas y el consumo de energía es mínimo.

El término LoRa hace referencia a la capa física que permite la comunicación con un elevado alcance, por ello LoRa se sitúa en el nivel 1 del modelo OSI tal y como se puede observar en la figura 3.1.

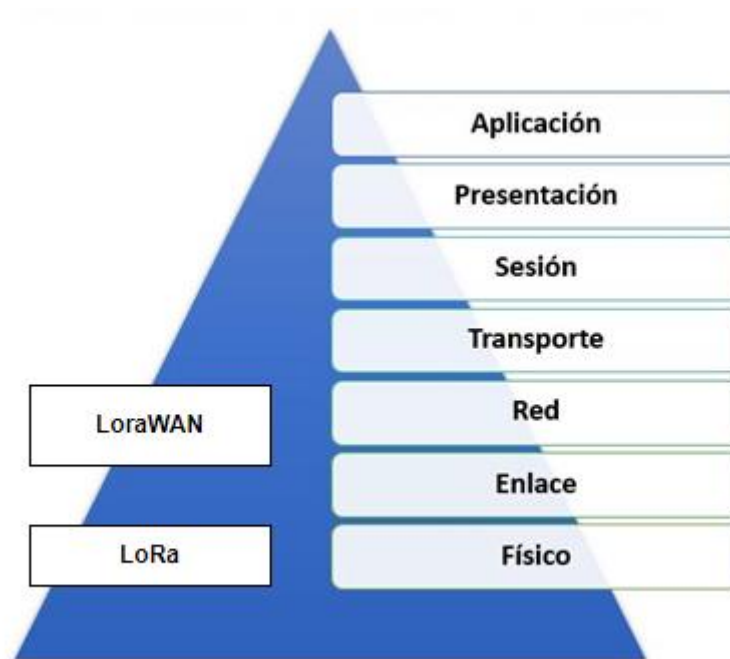


Figura 3.1 Modelo OSI [14]

LoRa opera en diferentes bandas de frecuencia dependiendo del lugar donde se utilice, en Europa la frecuencia usada es 868 MHz y 433 MHz, 915 MHz en América del Norte y Australia, 923 MHz en Asia, a pesar de que LoRa es un protocolo propietario, usa bandas de frecuencia no licenciadas [1].

La comunicación LoRa es normalmente bidireccional, la estación base también puede enviar información en sentido descendente, mensajes downlink, aunque realmente la comunicación ascendente es la más importante, desde el nodo final hasta la estación base, mensajes uplink.

Los pulsos chirp a través de los cuales se envían las tramas en la tecnología LoRa pueden ocupar anchos de banda comprendidos entre 125, 250 o 500 KHz [3]. En la comunicación LoRa los efectos de la interferencia se mitigan utilizando códigos correctores forward en combinación con la modulación CSS (Chirp spread spectrum), una técnica de variación de frecuencia de manera lineal a lo largo del tiempo. Consiste en la transmisión de datos en una determinada frecuencia durante un periodo de tiempo limitado, una vez transcurre ese periodo la transmisión se produce en otra frecuencia cercana evitando así la interferencia [3].

3.2.1 Modulación CSS (Chirp spread spectrum)

Para la comunicación LoRa se utiliza la modulación CSS (Chirp spread spectrum), una técnica de variación de frecuencia de manera lineal a lo largo del tiempo, esta modulación basada en la técnica del espectro ensanchado es robusta frente al efecto doppler y el multitrayecto [7].

La modulación CSS se basa en el uso de pulsos chirp, modulados en frecuencia para codificar la información a enviar. La frecuencia de portadora varía de forma continua y lineal con el tiempo.

Al modular la secuencia de datos (secuencia de bits) con una secuencia de código (secuencia de bits predefinida) se genera una tasa de bit significativamente mayor y obtendremos una señal de salida con un ancho de banda mayor al que teníamos antes de la modulación, al haber aumentado el ancho de banda hemos reducido la relación señal ruido (SNR) pues al ser el ancho de banda mayor estaremos más expuestos a interferencias. En la figura 1.2 podemos observar cómo el ancho de banda se hace mayor al modular las dos secuencias para ser transmitidas.

Los bits de la secuencia de código predefinida se les llama chirp para diferenciarlos de los bits de la secuencia de datos.

El espectro ensanchado por chirp ó CSS (Chirp Spread Spectrum) es una técnica que guarda gran relación con la técnica conocida como espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) [44] [45]. En DSSS se transmiten símbolos con una tasa de transmisión (en símbolos) por segundo $R_s = 1/T_s$ siendo T_s el tiempo de duración del símbolo en segundos. En general, cada símbolo transmitido transporta $k = \log_2(M)$ bits de información siendo M el número de símbolos (señales) distintas que pueden transmitirse, aunque en el ejemplo de la figura 3.2 se emplean $M = 2$ niveles de señalización y cada símbolo transmite solo $k=1$ bit. La expansión espectral que consigue esta técnica se consigue multiplicando la secuencia de símbolos que tendría multiplicando por una secuencia de chips, donde cada chip tiene una duración $T_c < T_s$. La tasa de chip (es decir el número de chips / segundo) es lógicamente la inversa del tiempo de chip $R_c = 1/T_c$. Estas secuencias de chips son códigos pseudoaleatorios y cada comunicación utiliza un código pseudoaleatorio ortogonal al del resto de comunicaciones lo que proporciona acceso múltiple por división de código (CDMA) y permite la compartición segura del medio.

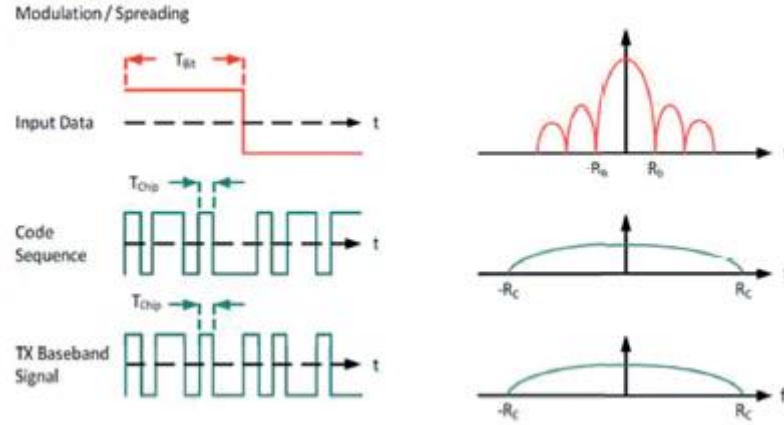


Figura 3.2 Modulación en secuencia directa DSS [34]

El ancho de banda de la señal de datos es justamente $BW_0 = R_s$, pero el ancho de banda del código pseudoaleatorio es $BW = R_c$, como normalmente $T_c \ll T_s$, se cumple que $BW \gg BW_0$, por lo que el espectro de la señal a transmitir (que resulta de la convolución del espectro de la señal de datos y el espectro del código secuencia) tendrá un ancho de banda dado por $BW_{tx} = BW_0 + BW \approx BW$, por lo que podemos concluir que el ancho de banda de la señal de espectro ensanchado viene dada por la ecuación siguiente:

$$BW = R_c = \frac{1}{T_c} \quad (1)$$

En recepción la señal de espectro ensanchado recibida se multiplicaría por la secuencia código empleada en transmisión, eliminando así el ensanchamiento espectral y recuperando la señal de datos original de ancho de banda $BW_0 = R_s$. Las técnicas de espectro ensanchado aportan robustez frente a ruido e interferencias. Nótese que, por ejemplo, la presencia de una señal no deseada presente a la entrada del receptor al ser multiplicado por la secuencia código sufrirá un ensanchamiento espectral de forma que su ancho de banda será $BW = R_c$ y mediante un filtrado con un ancho de banda $BW_0 = R_s$ se elimina la mayor parte de la señal indeseada, que cae fuera del ancho de banda de la señal de datos. El problema de la técnica DSSS es que requiere relojes suficientemente precisos para que la señal recibida sea multiplicada por una réplica bien sincronizada de la secuencia código empleada en el transmisor [34].

La tecnología LoRa de Semtech [42], que emplea una técnica conocida como espectro ensanchado por chirp (CSS por Chirp Spread Spectrum) no necesita una sincronización tan precisa entre transmisor y receptor. En lugar de utilizar la secuencia código de DSSS, genera una señal chirp cuya frecuencia varía de manera continua (ver figura 3.2), lo que permite expandir el espectro de la señal. En el caso de CSS los desajustes de sincronización entre el transmisor y el receptor equivalen a desajustes temporales, que pueden ser corregidos fácilmente por el decodificador.

Según Semtech [42] los desajustes de frecuencia entre el transmisor y el receptor pueden alcanzar hasta el 25% del ancho de banda sin afectar el rendimiento de la decodificación, este hecho explica también la robustez de LoRa frente a los desplazamientos de frecuencia que producen el efecto Doppler.

Adicionalmente podemos observar la relación entre la tasa de chip y el ancho de banda, a medida que la tasa de chip es mayor, mayor será el ancho de banda. [34]

En LoRa, la señal portadora no modulada cambia su frecuencia de manera continua. Los chirps pueden ser ascendentes (up-chirp) o descendentes (down-chirp). Un chirp ascendente inicialmente comienza desde una frecuencia baja, hasta alcanzar una frecuencia más alta, mientras que un chirp descendente comienza a una frecuencia más alta y desciende hasta una frecuencia baja.

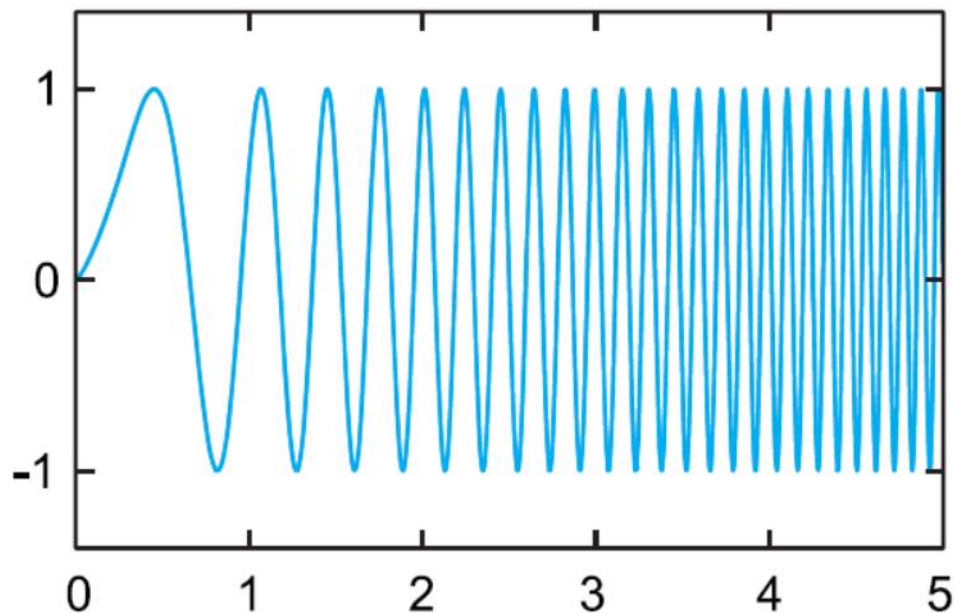


Figura 3.3 Forma de onda de un chirp ascendente

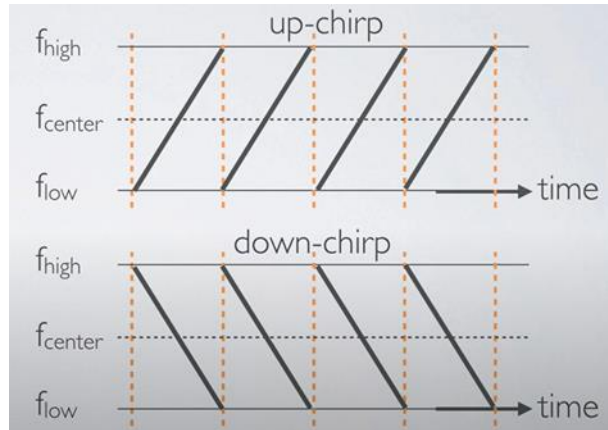


Figura 3.4 Variación de frecuencia de un chirp ascendente y descendente sin modular

Cuando la señal es modulada, los saltos en frecuencia determinan el símbolo que está siendo transmitido.

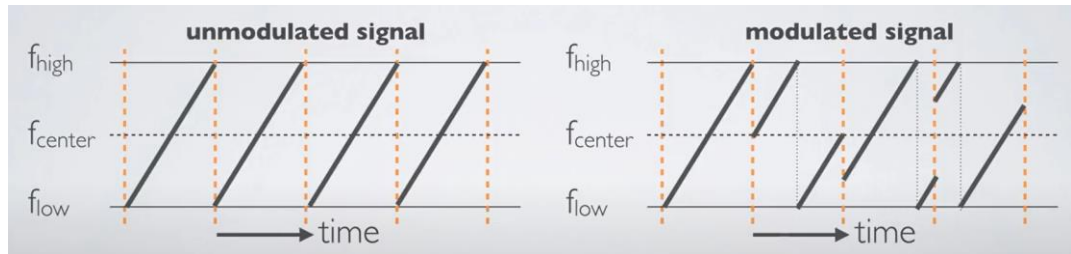


Figura 3.5 Señal LoRa sin modular y modular

El número de bits que componen un símbolo (un chirp modulado) es lo que se denomina Spread Factor (SF). En la figura siguiente se señala la variación en frecuencia en chirp ascendente modulado con el símbolo “1011111” (que en decimal sería 95), el $SF = 7$.

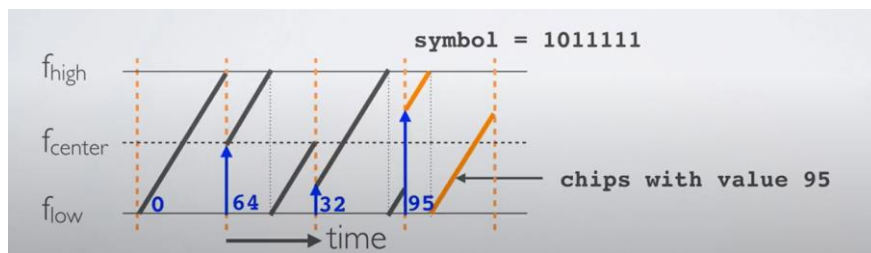


Figura 3.6 Régimen binario señal LoRa y relación con SF

El chirp modulado (es decir el símbolo) está dividido en 2^{SF} unidades de información que llamaremos chips. El ancho de banda de la señal LoRa coincide con la tasa de chips (el número de chips transmitidos por segundo), por tanto, el chip rate puede calcularse mediante:

$$R_c = \frac{1}{T_c} = BW \quad (2)$$

Dado que $T_c = \frac{T_s}{2^{SF}}$, podemos calcular tasa de símbolos que se transmiten:

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (3)$$

Dado que el número de bits en un símbolo es SF, el régimen binario viene dado por:

$$R_b = R_s \cdot SF = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \quad (4)$$

Como vemos a medida que aumenta el SF menor es la velocidad de transmisión.

El ancho de banda de la señal de datos es justamente R_s por lo que el incremento del ancho de banda es 2^{SF} por el proceso de modulación de LoRa.

En la comunicación Lora se utiliza una corrección de errores hacia delante, FEC (Forward error control), para poder detectar y recuperar errores que se puedan producir durante la comunicación en los bits. La tasa de codificación usada en Lora es igual a [7]:

$$CR = \frac{4}{4+n} \quad (5)$$

Pudiendo ser n 1, 2, 3, 4. Para poder detectar y recuperar bits erróneos se añaden bits redundantes. Así en función de la tasa de codificación usada, el ancho de banda y el factor de dispersión obtendremos un régimen binario superior o inferior, una tasa de transferencia efectiva mayor o menor [7]. Para observar la relación entre CR, BW y SF haremos uso de la tabla 3.1:

Ancho de banda														
SF	125 KHz					250 KHz				500 KHz				
	Tasa de código													
		4/5	4/6	4/7	4/8	4/5	4/6	4/7	4/8	4/5	4/6	4/7	4/8	Kbps
	7	5.5	4.6	3.9	3.4	10.9	9.1	7.8	6.8	21.9	18.2	15.6	13.7	
	8	3.1	2.6	2.2	2.0	6.5	5.4	4.5	3.9	12.5	10.4	8.9	7.8	
	9	1.8	1.5	1.3	1.1	3.5	2.9	2.5	2.2	7.0	5.9	5.0	4.4	
	10	1.0	0.8	0.7	0.6	2.0	1.6	1.4	1.2	3.9	3.3	2.8	2.4	
	11	0.5	0.4	0.4	0.3	1.1	0.9	0.8	0.7	2.1	1.8	1.5	1.3	
	12	0.3	0.2	0.2	0.2	0.6	0.5	0.4	0.4	1.2	1.0	0.8	0.7	

Tabla 3.1 Ancho de banda

Haciendo uso de la siguiente ecuación podremos calcular la tasa de transferencia efectiva (R_b) en función de SF, BW y CR [7]:

$$R_b = SF \cdot \left(\frac{BW}{2^{SF}} \right) \cdot CR \quad (6)$$

El factor de dispersión SF es uno de los parámetros que determina en gran medida la comunicación LoRa, este parámetro determina la velocidad y la robustez de la comunicación. Este factor de dispersión puede ir desde su valor más bajo, 6 hasta el más alto, 12, dejando constante el ancho de banda utilizado se puede aumentar el tiempo en el aire, ajustando el factor de dispersión, pasando del valor más bajo, 6 al máximo valor, 12, se duplica el tiempo en el aire y se reduce la sensibilidad del receptor en 3 dBm [3].

En la región de Europa, para la frecuencia de 868 MHz encontramos definida la velocidad de transmisión en función del factor de dispersión y el ancho de banda utilizado en esta tabla:

Data Rate	Configuration	Bit rate (bit/segundo)
DR0	SF12/125KHz	250
DR1	SF11/125KHz	440
DR2	SF10/125KHz	980
DR3	SF9/125KHz	1760
DR4	SF8/125KHz	3125
DR5	SF7/125KHz	5470
DR6	SF6/125KHz	11000

Tabla 3.2 Factor de dispersión [3]

Podemos observar que, si utilizamos un DR de 6, con un ancho de banda de 250 KHz, podríamos transmitir hasta 11000 bit/s mientras que, si utilizamos por ejemplo un DR de 2, con un ancho de banda de 125 KHz, solamente podríamos transmitir hasta 980 bit/s, baja considerablemente la tasa de bit que se puede transmitir, pero se aumentaría el tiempo en el aire [3].

Es importante indicar la relación que existe entre el tiempo en el aire y el factor de dispersión ya que están directamente relacionados, a medida que SF aumenta, cada bit de información se extiende más en el tiempo, haciendo que el tiempo en el aire sea mayor.

Durante este trabajo y debido a que el Gateway usado lo permite, el factor de dispersión no tendrá un valor constante, se utilizarán los factores de 6 a 12, de forma que este factor se adaptará en función de las necesidades de los diferentes nodos finales.

3.2.1.1 Capacidad del canal

La capacidad de un canal con ruido aditivo blanco y gaussiano (AWGN) se determina, de acuerdo a la ley de Shannon-Hartley, mediante la siguiente expresión [41]:

$$C = BW \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (7)$$

Siendo C la capacidad del canal en bits/s, BW el ancho de banda del canal AWGN y (S/N) la relación señal a ruido (SNR) en unidades lineales (es decir W/W). Si la relación señal a ruido es suficientemente pequeña, porque el ancho de banda es muy grande como sucede en las técnicas de espectro ensanchado la ecuación 1 puede aproximarse por:

$$C \approx \frac{BW}{\ln 2} \cdot \frac{S}{N} = \frac{S}{N_0 \cdot \ln 2} = \frac{E_b \cdot R_b}{N_0 \cdot \ln 2} \quad (8)$$

Siendo N_0 la densidad espectral unilateral de ruido blanco gaussiano del canal en W/Hz, E_b la energía transmitida por bit en J/bit y R_b es el régimen binario en bits/s.

Para cualquier sistema de comunicación hemos de transmitir con un régimen binario inferior a la capacidad del canal, es decir $R_b < C$, por tanto se deduce que para tener una comunicación fiable en un canal AWGN con ancho de banda infinito se debe satisfacer al menos que:

$$\frac{E_b}{N_0} > \ln 2 \quad (9)$$

La ecuación 6 establece un límite fundamental para tener una transmisión fiable en un canal AWGN con un ancho de banda infinito, un canal AWGN con eficiencia espectral la relación señal a ruido digital (razón de la energía por bit a densidad espectral de ruido) debe ser al menos $\ln 2 \approx 0,69$ (en J/J) ó equivalentemente $-1,592$ dB [41].

En el contexto de las técnicas de espectro ensanchado, como LoRa, esta relación se puede ajustar utilizando el Spreading Factor (SF) y el Code Rate (CR). El Spreading Factor afecta la relación señal a ruido al extender la señal en un espectro más amplio, permitiendo que la señal sea más resistente al ruido y a las interferencias. Por otro lado, el Code Rate, que representa la proporción de datos útiles en comparación con la cantidad total de datos transmitidos, influye en la eficiencia del canal y la capacidad de corrección de errores.

Frecuentemente en la bibliografía en relación a las técnicas de espectro ensanchado se expresa la condición de la ecuación 2 en forma más práctica y conservadora y se prescinde del factor $\ln 2 \approx 0,69$ en el denominador estimando un valor algo inferior de la capacidad o equivalentemente.

3.2.2 Tasa de error de bit

La tasa de error de bit nos indica el porcentaje de bit erróneos que llegan al receptor en la comunicación, para calcular la BER en una comunicación podremos hacer uso de la ecuación 7 de [SILVA 2023], como en otros casos, la tasa de error de bit dependerá de la señal a ruido (SNR) de la señal y del factor de dispersión utilizado [7].

$$BER = Q\left[\left(\frac{\log_{12}(SF)}{\sqrt{2}}\right) \cdot \left[SNR \cdot \left(\frac{2^{SF}}{SF}\right)\right]\right] \quad (10)$$

En la figura 3.7 podemos observar la relación entre la tasa de error de bit y la SNR en función del factor de dispersión utilizado.

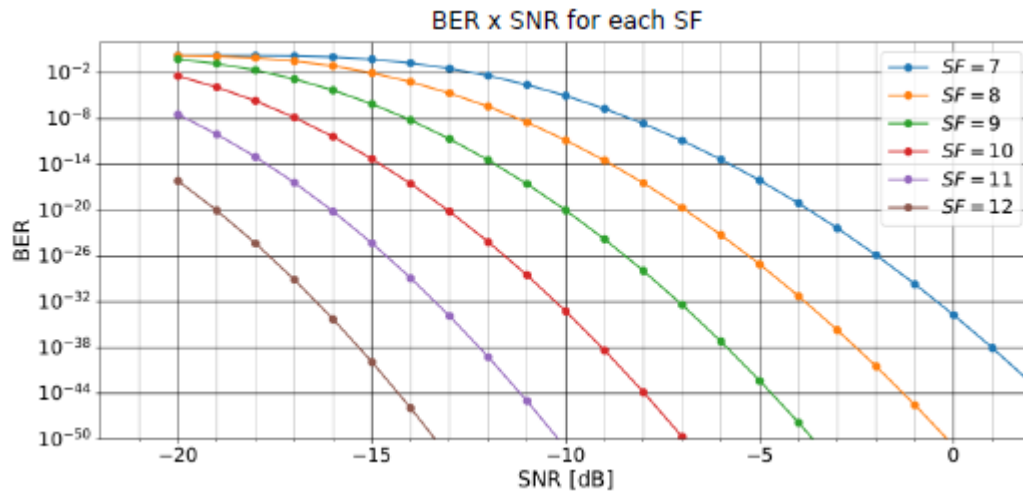


Figura 3.7 Tasa de error de bit [7]

Finalmente, otro de los parámetros importantes a tener en cuenta es el nivel de señal a ruido (SNR) y se puede calcular como:

$$\frac{S}{N} = \frac{Eb}{N0} \cdot \frac{Rb}{BW} \quad (11)$$

Siendo:

- $Eb/N0$: Relación energía por bit a densidad espectral de potencia de ruido.
- Rb : Régimen binario (bit/segundo).
- BW : Ancho de banda en Hz.

3.3 LoRaWAN

3.3.1 Introducción LoRaWAN

Una red LoRaWAN se compone de un Gateway y múltiples nodos finales, los cuales pueden ser de diversos tipos, según se detallará a continuación. El Gateway actúa como un puente entre los nodos finales y el servidor de red, gestionando la comunicación bidireccional entre estos elementos. Los nodos finales, que pueden ser sensores, actuadores u otros dispositivos IoT, se conectan al Gateway mediante enlaces de comunicación de largo alcance y baja potencia, utilizando la modulación LoRa.

LoRaWAN es un protocolo de comunicación inalámbrica [46] de largo alcance (LPWAN) diseñado para la interconexión de dispositivos de baja potencia en una red de área amplia. Este protocolo es parte del ecosistema IoT (Internet de las Cosas) y se caracteriza por su capacidad para ofrecer comunicación bidireccional segura y eficiente, adecuada para aplicaciones que requieren transmisión de datos a largas distancias con un consumo energético mínimo.

3.3.2 Estación base

La estación base en una red LoRaWAN actúa como el dispositivo central encargado de establecer y mantener la red inalámbrica, proporcionando cobertura a los diversos nodos finales que constituyen la red. Funciona como una pasarela entre estos nodos finales y los servidores de aplicaciones, los cuales gestionan todos los datos transmitidos por los nodos finales.

Este dispositivo configurable permite ajustar parámetros críticos como la potencia de transmisión y recepción, así como la inclusión de nuevos dispositivos en la red. La frecuencia de operación LoRa también puede ser configurada; en Europa, la frecuencia estándar es 868 MHz. La estación base facilita la transmisión de datos entre los nodos finales y los servidores de aplicaciones, asegurando una comunicación eficiente y segura.

Para monitorizar y mantener la estación base, se proporciona una interfaz de usuario, ya sea web o API, para la configuración y supervisión remota.

Estas características permiten que la estación base LoRaWAN configure y mantenga una red robusta y eficiente, asegurando la transmisión y gestión efectiva de los datos en aplicaciones IoT.

3.3.3 Tipos de nodos finales

- Clase A: Los nodos de clase A, son aquellos que, una vez han hecho su transmisión, esperan una confirmación por parte del Gateway, un ACK, a través de esta trama el nodo confirma que el Gateway ha recibido la trama de datos y la comunicación ha sido satisfactoria [3].
- Clase B: Los nodos de clase B, son aquellos que tienen ventanas de recepción sincronizadas, los tiempos de recepción están programados [3].
- Clase C: Los nodos de clase C, son aquellos que permanecen de forma continua en modo de recepción, dicho modo solo cambia cuando el nodo transmite su trama [3].

LoraWan se utiliza para la monitorización en ciudades inteligentes, en la agricultura, aplicaciones industriales y hogares inteligentes. En el ámbito rural donde mejor se adapta el uso de esta tecnología debido a que la cobertura LoRa puede tener un alcance de hasta 10 kilómetros o incluso superior, siempre que entre dispositivos exista visión directa. En el desarrollo de este trabajo se podrá comprobar con medidas reales cómo afectan los edificios a la cobertura LoRa, haciendo que el alcance máximo pase a ser mucho menor dependiendo de la cantidad de edificaciones y vegetación que haya entre los dispositivos.

3.3.4 Seguridad en LoRaWAN

LoRaWAN implementa un enfoque robusto de seguridad para proteger las comunicaciones en redes de Internet de las Cosas (IoT). A continuación, se detallan los principales mecanismos de seguridad utilizados en LoRaWAN:

Autenticación mutua	Cifrado	Identificadores Únicos	Protección de tramas
Se establece una autenticación mutua entre el dispositivo final y la red durante el procedimiento de unión, garantizando que solo los dispositivos autorizados pueden conectarse a la red	- Algoritmo AES: LoRaWAN utiliza el algoritmo de cifrado AES de 128 bits para asegurar la confidencialidad de los datos. - CTR (Counter Mode): Utilizado para cifrar la carga útil, proporcionando un enfoque eficaz para el cifrado de datos. - CMAC (Cipher-based Message Authentication Code): Utilizado para garantizar la integridad de los mensajes.	DevEUI: Un identificador global único para cada dispositivo, basado en EUI-64.	- Contador de Tramas: Cada mensaje incluye un contador que previene la reproducción de paquetes, asegurando que los paquetes duplicados no sean aceptados. - MIC (Message Integrity Code): Calculado con AES-CMAC, el MIC asegura la integridad del mensaje y previene la manipulación de los paquetes.

Tabla 3.3 Seguridad LoRaWAN

3.3.5 Tiempo en aire y ancho de banda

Como se ha expuesto en la sección sobre LoRa, el tiempo en aire, el ancho de banda y el factor de dispersión están interrelacionados de manera significativa. En la tabla 9 de [2], se presenta un análisis del tiempo en aire y el throughput obtenido en función del factor de dispersión utilizado. Aunque este estudio se basa en observaciones prácticas, proporciona una visión clara de la relevancia de estos tres parámetros en las comunicaciones LoRaWAN.

En la tabla inferior se recoge el análisis realizado en [2] en función del parámetro SF:

Factor de dispersión	Tiempo en aire (ms)	Throughput (bps)
SF12	1810.4	110
SF11	823.3	243
SF10	411.6	486
SF9	205.8	972
SF8	123.4	1621
SF7	61.7	3241

Tabla 3.4 Factor de dispersión, tiempo en aire y throughput

4 Materiales y métodos

En este capítulo se revisarán varios modelos de propagación que permiten calcular las pérdidas ocasionadas por diversos factores. Se discutirán los dispositivos empleados en la implementación de la red LoRa, así como el dispositivo con el que se realizarán las mediciones de cobertura y las mediciones de la calidad del agua mediante los diferentes sensores. Se hará una introducción al software Waspnote para la programación del Libelium Smart Water así como la explicación del proceso de calibración de los diferentes sensores.

4.1 Introducción

Según el método usado para calcular las pérdidas en la propagación radioeléctrica los modelos de propagación se pueden clasificar en [18]:

- Empíricos: Se basan en la realización de una serie de medidas obteniendo así las pérdidas.
- Semiempíricos: Son aquellos que se basan en el uso de métodos empíricos y además se añaden supuestos o aproximaciones para obtener resultados.
- Deterministas: Se basan en el uso de ecuaciones que cuantifican de forma exacta las pérdidas provocadas por difracciones, reflexiones, distancia, etc.
- Semideterministas: Son métodos deterministas que además incorporan técnicas estadísticas para la obtención de las pérdidas de la propagación.

Los modelos de propagación también se pueden clasificar en bidimensionales o tridimensionales en función de si se tienen en cuenta o no reflexiones de la señal[18]:

- Bidimensionales: Estos modelos se centran en el estudio de la contribución principal que llega al receptor, el resto de reflexiones no se tienen en cuenta.
- Tridimensionales: Estudian el total de contribuciones que pueden llegar al receptor incluyendo las reflexiones y el multicamino en la propagación.

4.2 Modelo de espacio libre:

En este modelo semiempírico [18] se tiene en cuenta la potencia de transmisión del transmisor, su ganancia de transmisión, la potencia de recepción del receptor, su ganancia de recepción y las pérdidas debido a la distancia entre el transmisor y receptor, no se tienen en cuenta las reflexiones ni el multicamino.

La ecuación usada para el cálculo de la potencia en recepción será la siguiente:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \quad (12)$$

Donde en lineales:

P_r : Potencia en recepción

P_t : Potencia en transmisión

G_t : Ganancia en transmisión

G_r : Ganancia en recepción

λ : Longitud de onda en metros

d : Distancia entre transmisor y receptor en metros

Este modelo es demasiado optimista a la hora del cálculo de las pérdidas de propagación pues difícilmente se encontrará un escenario de espacio libre en la realidad.

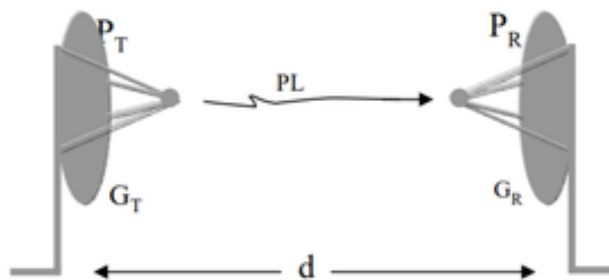


Figura 4.1 Modelo de espacio libre [19]

4.3 Modelo sobre tierra plana:

Este es un modelo en el que se considera el rayo directo de la onda más una reflexión sobre el terreno, para el cálculo de la potencia recibida se usará la siguiente ecuación [18]:

$$Pr = Pt \cdot Gt \cdot Gr \cdot \left(\frac{1}{Lb} \cdot \frac{1}{lm}\right) \quad (13)$$

Donde en lineales:

Pr: Potencia en recepción

Pt: Potencia en transmisión

Gt: Ganancia en transmisión

Gr: Ganancia en recepción

Lb: Pérdidas básicas en espacio libre

Lm: Pérdidas adicionales debido a la propagación en el medio

Este modelo es algo más certero a la hora de proporcionar las pérdidas debido a la propagación, pero sigue siendo optimista debido a que se plantea en un escenario ideal donde no hay edificios en el vano de la transmisión.

Para el cálculo de Lm (pérdidas adicionales debido a la propagación en el medio), se hará uso de la siguiente ecuación:

$$Lm = \frac{1}{Fm^2} \quad (14)$$

Donde:

- Lm : pérdidas adicionales debido a la propagación en el medio
- Fm : factor de propagación de campo dependiente del medio

Para el cálculo de Fm se deberá usar la siguiente ecuación:

$$Fm = \left| 1 + \frac{e^{-j \cdot k(\Delta R)}}{\frac{RR}{RD}} \cdot \frac{\sqrt{Gtx(\theta_{TX,R}) \cdot Gr(\theta_{RX,R})}}{\sqrt{Gtx(\theta_{TX,D}) \cdot Gr(\theta_{RX,D})}} \cdot |\Gamma| \cdot e^{j\angle\Gamma} \right| \quad (15)$$

En la mayoría de casos, debido a que la separación entre antenas es suficientemente grande, esto es $RR/RD \approx 1$ el cálculo de Fm se puede simplificar como:

$$Fm \approx |1 + e^{-j \cdot k \cdot (\Delta R)} \cdot \Gamma| \quad (16)$$

$$\Delta R = RR - RD \quad (17)$$

Donde:

- k : número de onda
- RR : longitud del rayo reflejado
- RD : longitud del rayo directo
- Γ : coeficiente de reflexión que depende de las características del suelo

Para el cálculo de RR y RD se deberá usar el teorema de Pitágoras, con la ayuda de la figura 4.2, pues es un problema de geometría, del teorema de Pitágoras se derivan las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$RR = \sqrt{d^2 + (htx + hrx)^2}$$

$$RD = \sqrt{d^2 + (htx - hrx)^2} \quad (18)$$

Finalmente, para el cálculo del coeficiente de reflexión en polarización vertical se deberá usar la siguiente ecuación:

$$\Gamma_v = \frac{\epsilon_s \cdot \sin \Psi - \sqrt{\epsilon_s - \cos^2 \Psi}}{\epsilon_s \cdot \sin \Psi + \sqrt{\epsilon_s - \cos^2 \Psi}} \quad (19)$$

Donde:

- ϵ_s : permitividad relativa efectiva
- Ψ : ángulo entre el suelo y el rayo reflejado

Para el cálculo de la permitividad relativa efectiva se podrá hacer uso de la siguiente ecuación:

$$\epsilon_s = \epsilon_r - j \cdot 60 \cdot \lambda \cdot \sigma \quad (20)$$

Donde ϵ_r y σ dependen del tipo de terreno y frecuencia de trabajo. Solamente se calculará el coeficiente de reflexión para polarización vertical debido a que en la comunicación LoRa es este tipo de polarización la que se usa, en el caso de que se usase otra habría que calcular el coeficiente de reflexión para polarización horizontal.

Teniendo en cuenta un coeficiente de reflexión de -1 (Γ) y sabiendo que ΔR se puede aproximar como:

$$\Delta R = \frac{2 \cdot htx \cdot hrx}{d} \quad (21)$$

Siendo:

- htx : altura de la antena transmisora en metros
- hrx : altura de la antena receptora en metros
- d : distancia entre antenas en kilómetros

La potencia en recepción haciendo uso del modelo de espacio libre se puede aproximar mediante la siguiente ecuación:

$$Pr = Pt \cdot Gt \cdot Gr \cdot \left(\frac{htx \cdot hrx}{d^2} \right)^2 \quad (22)$$

Siendo:

- Pr: potencia en recepción en vatios
- Pt: potencia transmitida en vatios
- Gt: ganancia en la antena transmisora en vatios
- Gr: ganancia en la antena receptora en vatios
- htx: altura de la antena transmisora en metros
- hrx: altura de la antena receptora en metros
- d: distancia entre antenas en metros

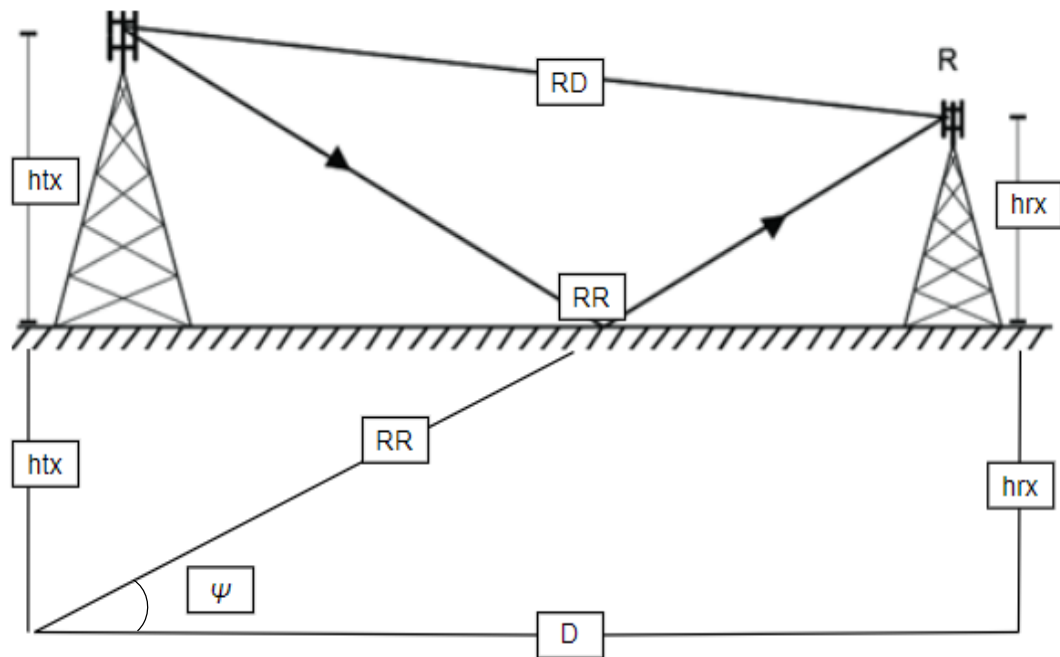


Figura 4.2 Modelo de tierra plana [20]

4.4 Reflexión en Tierra esférica

Al igual que en el modelo de Tierra Plana, la atenuación depende de la interferencia entre el rayo directo y el rayo reflejado, para calcular la atenuación debida a la reflexión en Tierra esférica se deberá utilizar la ecuación 13 y restar la atenuación calculada mediante la ecuación 16, la única diferencia entre el cálculo para el modelo de Tierra Plana y para la reflexión en Tierra esférica es el método de cálculo de las alturas efectivas de las antenas transmisora y receptora, para ello será necesario calcular d_1 y d_2 , indicados en la siguiente figura:

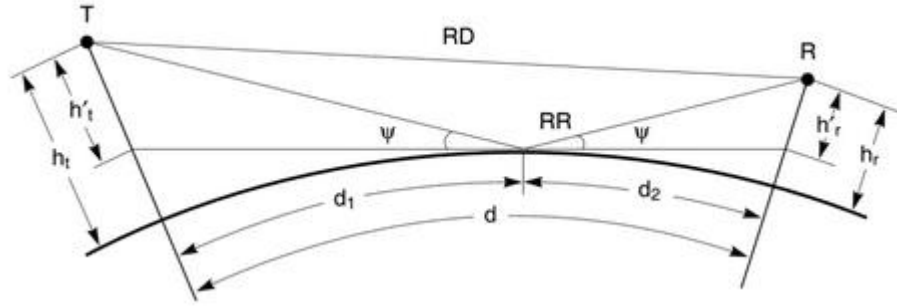


Figura 4.3 Modelo de tierra plana [48]

Para calcular h_t' y h_r' (altura efectiva de antena transmisora y antena receptora) se usarán las siguientes ecuaciones:

$$h_t' = h_t - \frac{d_1^2}{2 \cdot ReT} \quad (23)$$

$$h_r' = h_r - \frac{d_2^2}{2 \cdot ReT} \quad (24)$$

$$d = d_1 + d_2 \quad (25)$$

Para el cálculo de d_1 se seguirán las siguientes ecuaciones:

$$d_1 = \frac{d}{2} + \rho \cdot \cos\left(\frac{\pi + \phi}{3}\right) \quad (26)$$

$$\rho = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[6.37 \cdot k \cdot (h_t + h_r) + \left(\frac{d}{2}\right)^2 \right]^{\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (27)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left[\frac{12.74 \cdot k \cdot (h_t - h_r) \cdot d}{\rho^3} \right] \quad (28)$$

En las ecuaciones anteriores se ha supuesto que $h_t > h_r$ si no fuera así, es decir, $h_r > h_t$, las ecuaciones serían:

$$d_2 = \frac{d}{2} + \rho \cdot \cos\left(\frac{\pi + \phi}{3}\right) \quad (29)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left[\frac{12.74 \cdot k \cdot (h_r - h_t) \cdot d}{\rho^3} \right] \quad (30)$$

La ecuación 27 permanecería igual.

4.5 Cálculo de pérdidas adicionales debido a obstáculo tipo arista de cuchillo

En el caso de que exista una arista en el vano de la transmisión [47] se deberá incluir una atenuación adicional, J , para ello habrá que calcular el valor de v y estudiar el valor de la atenuación J . Para el cálculo de v se utilizará la siguiente ecuación:

$$v = \sqrt{2} \cdot \frac{h_p}{r_1} \quad (31)$$

siendo h_p la altura de la cima del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto y r_1 el radio de la primera zona de fresnel.

Podemos calcular r_1 :

$$r_1 = \sqrt{\lambda \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} \quad (32)$$

En la figura 4.3 se indica a qué se hace referencia con h_p , d_1 y d_2 .

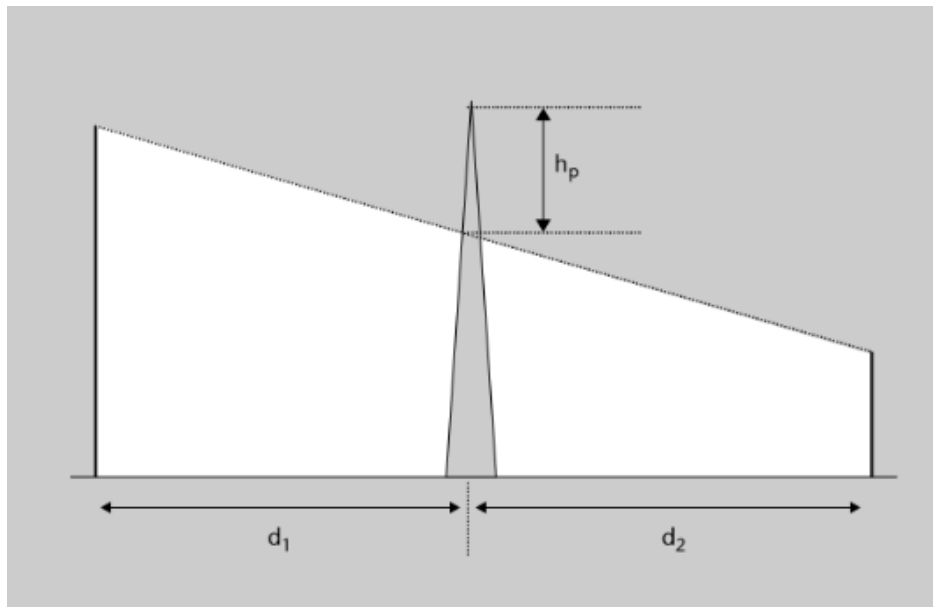


Figura 4.4 Tierra plana con obstáculo

Una vez calculado v podemos calcular J en función de su valor como sigue:

$$J(v) = -20 \cdot \log\left(\frac{\sqrt{(1-C(v)-S(v))^2 + (C(v)-S(v))^2}}{2}\right) \quad (33)$$

Siendo $C(v)$ y $S(v)$ las partes real e imaginaria respectivamente de la integral de Fresnel compleja, pudiendo calcularse con las siguientes ecuaciones: [47]

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi \cdot s^2}{2}\right) ds \quad (34)$$

$$S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi \cdot s^2}{2}\right) ds \quad (35)$$

Haciendo uso de la función `Integral_Fresnel_Compleja` de la Toolbox de Matlab implelementada se puede representar la variación de la atenuación debido a una arista de filo de cuchillo en función de v :

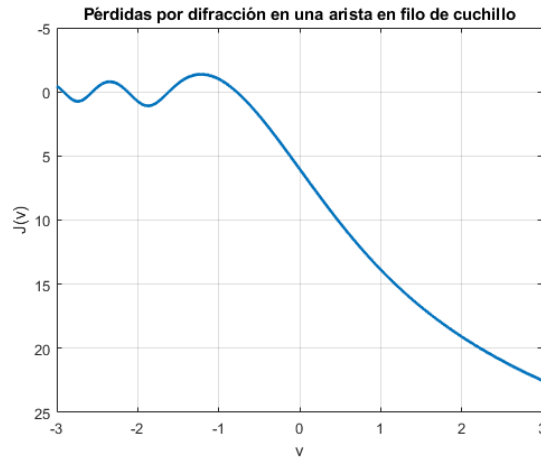


Figura 4.5 Pérdidas por difracción en una arista en filo de cuchillo

Este modelo se puede usar en el caso de que solo exista un obstáculo en el vano de la transmisión, si hay más de uno no se debería usar porque los resultados obtenidos distarían mucho de la realidad [18] y se podrían utilizar otros métodos listados en la Recomendación P526-15 [47].

4.6 Modelo de Lee:

El método de Lee [18] se basa en la fórmula para el modelo de Tierra Plana y mediciones experimentales en diferentes ámbitos, proporcionando la potencia recibida en dBm para dos tipos de entorno, urbano y suburbano, para el entorno urbano se tienen 3 expresiones.

Para medios suburbanos:

$$\text{Pr}(dBm) = -53.9 - 38.4 \cdot \log(D) - n \cdot \log\left(\frac{f}{900}\right) + w \quad (36)$$

Para medios urbanos (Filadelfia):

$$\text{Pr}(dBm) = -62.5 - 36.8 \cdot \log(D) - n \cdot \log\left(\frac{f}{900}\right) + w \quad (37)$$

Para medios urbanos (Newark):

$$\text{Pr}(dBm) = -55.2 - 43.1 \cdot \log(D) - n \cdot \log\left(\frac{f}{900}\right) + w \quad (38)$$

Para medios urbanos (Tokyo):

$$\text{Pr}(dBm) = -77.8 - 30.5 \cdot \log(D) - n \cdot \log\left(\frac{f}{900}\right) + w \quad (39)$$

$n = 2$ para $f < 450\text{MHz}$ y zona suburbana

$n = 1$ para $f > 450\text{MHz}$ y zona urbana

Para el cálculo de w se utilizará la siguiente ecuación:

$$w = 10 \cdot \log(w1 \cdot w2 \cdot w3 \cdot w4 \cdot w5) \quad (40)$$

Donde:

$$w1: \left(\frac{ht}{30.5}\right)^2$$

$$w2: \left(\frac{hr}{3}\right)^n \quad (n=2 \text{ si } hr > 10 \text{ m}) \quad (n=1 \text{ si } hr < 3 \text{ m})$$

$$w3: \frac{Pt}{10}$$

$$w4: \frac{Gt(\text{lineales})}{4}$$

$$w5: \frac{Gr(\text{lineales})}{1}$$

Donde:

Pr: Potencia recibida.

D: Distancia entre el transmisor y receptor, en kilómetros.

f: Frecuencia de operación en MHz.

W: Factor de corrección.

4.7 Modelo Cost 231

El modelo Cost 231 se basa en los modelos japoneses de Walfish e Ikegami [18]. Las limitaciones existentes en el modelo Cost 231:

- La altura de la estación base debe estar comprendida entre 4 y 50 metros.
- La altura del receptor debe estar comprendida entre 1 y 3 metros.
- La distancia entre la estación base y el receptor debe estar comprendida entre 0.02 y 5 kilómetros.
- La frecuencia debe estar comprendida entre 800 y 2000 MHz.

Otros parámetros usados en las ecuaciones de este modelo:

- H_r : altura media de los edificios.
- W : anchura de la calle donde se encuentra el receptor.
- Φ : ángulo entre el rayo y el eje de la calle.
- b : anchura entre edificios.

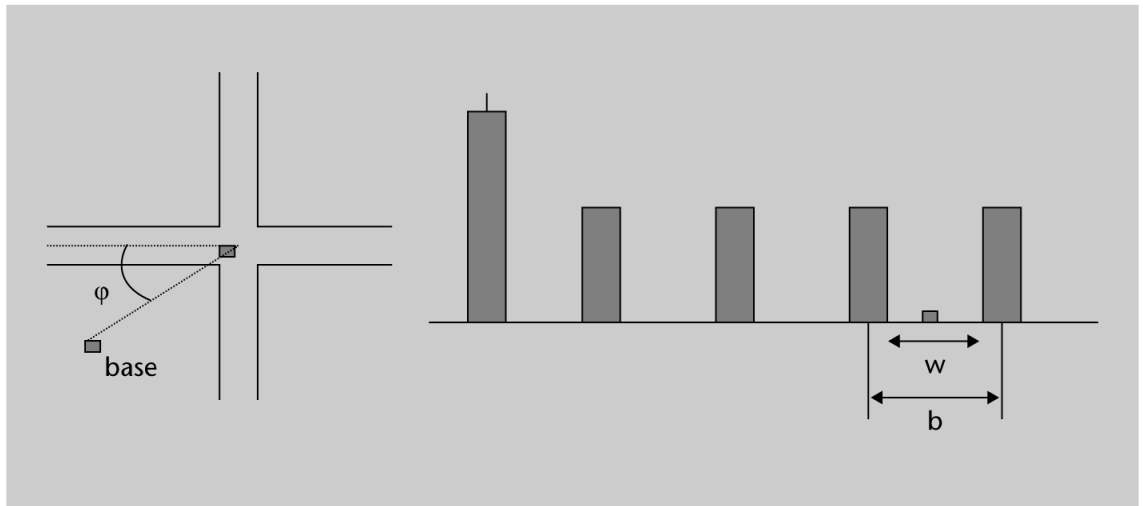


Figura 4.6 Modelo Cost 231

En la figura 4.6, se pueden observar a qué se hace referencia con los parámetros indicados.

En el caso de que algunos de los parámetros no se puedan conocer, se podrán usar las siguientes aproximaciones:

- b: podrá usarse un rango entre 20 y 50 metros.
- w: b/2.
- Φ : 90 grados.
- 3 metros de altura por piso.

Las ecuaciones del modelo son las siguientes:

$$L(\text{atenuación total}) = Lbf + Lrts + Lmsd \quad (41)$$

Donde Lbf es la atenuación debido a la distancia, Lrts es la atenuación debida a las difracciones cerca del receptor y Lmsd es la atenuación debida a las difracciones que se producen en las proximidades del receptor.

En las ecuaciones, hb y hr estará en metros, la distancia (d) en kilómetros y la frecuencia (f) en MHz.

- Δhb : Se trata de la base con respecto a la altura media de los edificios limítrofes (hb-hr), puede tomar valores negativos:
- Δhr : Se trata de la altura media de los edificios sobre la altura de la antena móvil, se calcula como (ht-hm)

$$Lbf = 32.45 + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(D)$$

$$Lrts = -16.9 - 10 \cdot \log(w) + 10 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(\Delta hr) + Lori$$

$$Lori = -10 + 0.3571 \cdot \phi \quad 0^\circ < \phi < 35^\circ$$

$$= 2.5 + 0.075 \cdot (\phi - 35^\circ) \quad 35^\circ < \phi < 55^\circ$$

$$= 4 - 0.114 \cdot (\phi - 55^\circ) \quad 55^\circ < \phi < 90^\circ$$

Si $Lrts < 0$, $Lrts = 0$, no podrá tomar valores negativos.

$$Lmsd = Lbsh + Ka + Kd \cdot \log(d) + Kf \cdot \log(f) - 9 \cdot \log(b)$$

$Lbsh = -18 \cdot \log(1 + \Delta hb)$ si $\Delta hb < 0$, $Lbsh = 0$, no tomará valores negativos.

$$Ka = 54 \text{ si } \Delta hb > 0$$

$$= 54 - 0.8 \cdot \Delta hb \text{ si } \Delta hb < 0 \text{ y } d > 0.5$$

$$= 54 - \frac{0.8 \cdot \Delta hb \cdot D}{0.5} \text{ si } \Delta hb < 0 \text{ y } d < 0.5$$

$$Kd = 18 \Delta hb > 0$$

$$= 18 - 15 \cdot \left(\frac{\Delta hb}{hr} \right) \Delta hb < 0$$

$$Kf = -4 + 0.7 \cdot \left(\frac{f}{925} - 1\right) \text{ en ciudades medianas}$$

$$= -4 + 1.5 \cdot \left(\frac{f}{925} - 1\right) \text{ en ciudades grandes}$$

4.8 Cálculo de pérdidas adicionales por difracción por tierra esférica

Para calcular este tipo de pérdidas [18] [47], cuando no existe visión directa entre las antenas debido a la curvatura de la Tierra, es decir, la distancia entre antenas es superior al horizonte radioeléctrico, es necesario determinar si las antenas están lo suficientemente distanciadas como para que la curvatura de la Tierra impida la línea de vista directa entre ellas. Para ello, se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$d_{los} = \sqrt{2 \cdot Re,T \cdot h_{tx}} + \sqrt{2 \cdot Re,T \cdot h_{rx}} \quad (42)$$

Siendo:

- d_{los} : distancia máxima de visión directa en metros
- Re,T : radio efectivo de la tierra en metros
- h_{tx} : altura de la antena transmisora en metros
- h_{rx} : altura de la antena receptora en metros

Para calcular Re,T se tomará una atmósfera refractiva estándar con un $k = 4/3$, por tanto Re,t se calculará como:

$$Re,T = k \cdot 6370 \text{ kilómetros} \quad (43)$$

En el caso de que d_{los} sea mayor que la distancia entre las antenas, se podrá aproximar que existe visión directa entre ellas por lo que no habría que tener en cuenta las pérdidas por tierra esférica.

Cálculo de las pérdidas por difracción esférica:

En primer lugar, deberemos de calcular β , es un parámetro que tiene en cuenta la naturaleza del suelo y la polarización, en polarización horizontal se suele aproximar $\beta = 1$ pero en polarización vertical se aproxima como:

$$\beta = \frac{1+1.6 \cdot K^2+0.67 \cdot K^4}{1+4.5 \cdot K^2+1.53 \cdot K^4} \quad (44)$$

Obteniendo K en función de la polarización, si es horizontal $K = K_H$ y si es vertical $K = K_V$:

$$K_H = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot ReT}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot [(eps - 1)^2 + (60 \cdot \lambda \cdot \sigma)^2]^{-\left(\frac{1}{4}\right)} \quad (45)$$

$$K_V = K_H \cdot [eps^2 + (60 \cdot \lambda \cdot \sigma)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (46)$$

Donde:

- f es la frecuencia en MHz
- ReT: radio equivalente de la Tierra
- σ es la conductividad del terreno en S/m
- eps: permitividad relativa efectiva

La función F que determina el factor de la difracción debida a la distancia se puede estimar a partir de la longitud normalizada del enlace mediante la siguiente expresión:

$$F(X) = 11 + \log_{10} X - 17.6 \cdot X \text{ si } X \geq 1.6$$

$$F(X) = -20 \cdot \log_{10} X - 5.6488 \cdot X^{1.425} \text{ si } X < 1.6$$

La función G que determina la ganancia debida a la altura de las antenas se puede determinar a partir de la altura normalizada de la antena mediante:

$$G(Y) = 17.6 \cdot (B - 1.1)^{\frac{1}{2}} - 5 \cdot \log_{10}(B - 1.1) - 8 \text{ para } B > 2$$

$$G(Y) = 20 \cdot \log_{10}(B + 0.1 \cdot B^3) \text{ para } B \leq 2$$

$$\text{Si } G(Y) < 2 + 20 \cdot \log_{10} K \text{ entonces } G(Y) = 2 + 20 \cdot \log_{10} K$$

Siendo $B = \beta \cdot Y$

$$X = \beta \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda \cdot ReT^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot d$$

$$Y = 2 \cdot \beta \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda^2 \cdot ReT} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot d$$

Obteniendo las pérdidas de potencia debido a la curvatura de la Tierra:

$$L = -F(X) + G(Y1) + G(Y2) \quad (47)$$

Para cualquier distancia y frecuencias superiores a 10 MHz, se deberán calcular las pérdidas mediante el siguiente método:

$$d_{los} = \sqrt{2 \cdot Re, T \cdot htx} + \sqrt{2 \cdot Re, T \cdot hrx} \quad (48)$$

$$h = \frac{\left(htx - \frac{d_1^2}{2 \cdot ReT}\right) \cdot d_2 + \left(hrx - \frac{d_2^2}{2 \cdot ReT}\right) d_1}{d} \quad (49)$$

$$d_1 = \frac{d}{2} \cdot (1 + b) \quad (50)$$

$$d_2 = d - d_1 \quad (51)$$

$$b = 2 \cdot \sqrt{\frac{m+1}{3 \cdot m}} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \cdot \arccos\left(\frac{3 \cdot c}{2} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot m}{(m+1)^3}}\right)\right) \quad (52)$$

$$c = \frac{htx - hrx}{htx + hrx} \quad (53)$$

$$m = \frac{d^2}{4 \cdot ReT \cdot (htx + hrx)} \quad (54)$$

Si $h > h_{req}$, las pérdidas por difracción son cero, podemos calcular h_{req} como:

$$h_{req} = 0.552 \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2 \cdot \lambda}{d}} \quad (55)$$

Si $h < h_{req}$ se sigue el cálculo, calculando el ReT' de la siguiente manera:

$$ReT' = 0.5 \cdot \left(\frac{d}{\sqrt{htx} + \sqrt{hrx}}\right)^2 \quad (56)$$

Una vez obtenido ReT' se calculan las pérdidas usando las ecuaciones (44, 45, 46 y 47) y al resultado se le denominará Ah , si Ah es negativo las pérdidas serán consideradas 0 Db, si tiene otro valor, se calculan las pérdidas finalmente como:

$$A \text{ (dB)} = \left[1 - \frac{h}{h_{req}}\right] \cdot Ah \quad (57)$$

4.9 Estación base

La estación base que se utilizará en este trabajo será una Multitech Conduit IP67 serie 200 [15]. Se trata de una estación diseñada específicamente para su uso en el exterior, para la creación de redes Lora públicas o privadas. Esta estación es altamente escalable, soporta miles de nodos finales con certificación LoraWAN.

Entre las ventajas que tiene el uso de esta estación base encontramos:

- Amplia cobertura lora (hasta 10 kilómetros).
- Antena externa, mejorando así el alcance.
- Fácil acceso a los puertos del dispositivo desde la parte inferior.
- Certificado para bandas norteamericanas de 915 MHz y europeas de 868 MHz.

El dispositivo descrito es el siguiente:



Figura 4.7 Estación base [16]

Especificaciones técnicas:

Este dispositivo tiene únicamente un slot para conectar antena Lora, dicha antena deberá tener un conector tipo N-macho. A este dispositivo se le podrán conectar antenas de diferente ganancia o directividad, en este trabajo se utilizará una antena omnidireccional con una ganancia de 3 dBi, en el caso en el que sea necesaria una antena direccional o de mayor ganancia siempre que haya adaptación de impedancias entre la estación base y la antena, esta debe ser de 50 ohmios, se podrá utilizar cambiando los parámetros de radiación en la interfaz web de la estación base [15].

En cuanto a la potencia de transmisión de la estación base encontramos que el mínimo valor es de 14 dBm y el máximo de 27 dBm, teniendo en cuenta las limitaciones de PRA en España (25 nW) indicadas en el cuadro nacional de atribución de frecuencias (CNAF) el valor de potencia de transmisión y ganancia de antena habría que ajustarlo para no exceder el valor máximo permitido.

Módulo LoRa				
Banda de frecuencia	Potencia de salida	Rango de frecuencia en recepción	Rango de frecuencia en transmisión	Sensibilidad
868 MHz	14-27 dBm	863-873 MHz	863-873 MHz	-124.8 -139.9 dBm

Tabla 4.2 Especificaciones módulo LoRa

Observando la publicación del Boletín oficial del Estado del día 21 de Julio de 2020 [17] en la que se aprueba el CNAF en España (cuadro nacional de atribución de frecuencias), la potencia radiada aparente máxima es de 25 mw, 13.97 dBm, por tanto, habría que ajustar nuestra estación base a esa limitación. Para calcular la potencia radiada aparente se usará la siguiente ecuación:

$$PRA = P_t \cdot \left(\frac{G_t}{G_d}\right) \quad (56)$$

Donde en lineales:

PRA: Potencia radiada aparente en vatios

Pt: Potencia de transmisión en vatios

Gt: Ganancia de transmisión en vatios

Gd: 1.64 (valor aproximado de la ganancia del dipolo $\lambda/2$)

En nuestro caso se usará una potencia de transmisión de 6 dBm y una ganancia de 3 dBi, que al restarle 2.15, obtendremos la ganancia en dBd, ganancia en referencia al dipolo isotrópico, tendremos una potencia radiada aparente de 5.30 dBm, por debajo de la norma publicada en el CNAF [17]:

Settings			
Max Tx Power (dBm)	Rx 1 DR Offset	ADR Step (cB)	Min Datarate
6	0	30	0 - SF12BW125
Antenna Gain (dBi)	Rx 2 Datarate	ACK Timeout	Max Datarate
3	2 - SF10BW125	5000	5 - SF7BW125
☐ Enable Duty-Cycle Limit	Duty-Cycle Period	Duty-Cycle Ratio	
	60		

Figura 4.8 Potencia de transmisión configurada

4.10 Libelium Smart Water

El dispositivo que se utilizará para la medición de la calidad del agua será el Libelium Smart Water Plug & Sense, se trata de un dispositivo en el que se centralizan los diferentes sensores que medirán los parámetros del agua, dicho dispositivo será el encargado de establecer la comunicación con la estación base [21].

El Libelium Smart Water Plug & Sense es una versión encapsulada de Waspote, su configuración es sencilla y se puede realizar de una forma rápida.

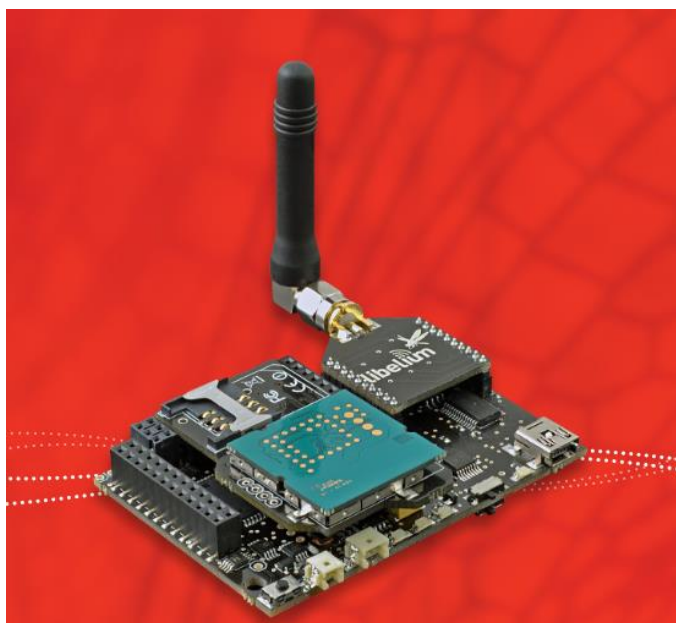


Figura 4.9 Waspote [21]

Las especificaciones técnicas de la placa Wasmote que incorpora el Libelium Smart Water Plug & Sense son las siguientes [21]:

Datos generales	
Microcontrolador	ATmega 1281
Frecuencia microcontrolador	14.7456 MHz
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB (1 kB reserved)
Flash 128 kB	128 kB
Tarjeta SD	2 GB
Peso	20 g
Dimensiones	73.5 x 51 x 13 mm
Rango de Temperatura	From -10 to 65 °C
Reloj	RTC (32 kHz)
Consumo de potencia	
Encendido	15 mA
Sueño	55 µA
Sueño profundo	55 µA
Hibernación	1 µA
Salidas/entradas	
Entradas analógicas	7
Entradas/salidas digitales	8
UARTs	2
I2C	1
1 SPI	1
1 USB	1
Datos eléctricos	
Voltaje de Batería	3.3-4.2 V (lithium-ion)
Carga USB	5 V y 100 mA
Carga panel solar	6-12 y 280 mA

Tabla 4.3 Especificaciones técnicas

4.11 Software waspmote:

Para la programación del Libelium Smart Water será necesario el software waspmote IDE, se puede descargar desde la página de Libelium y puede instalarse en sistema operativo Windows, MacOS y Linux. El lenguaje de programación utilizado es C/C++.

Una vez instalado waspmote se comprueban las librerías incluidas y se puede hacer un repaso de los ejemplos para la programación de diversos sensores que se incluyen en el propio software. El entorno de trabajo es el de la figura 4.8:

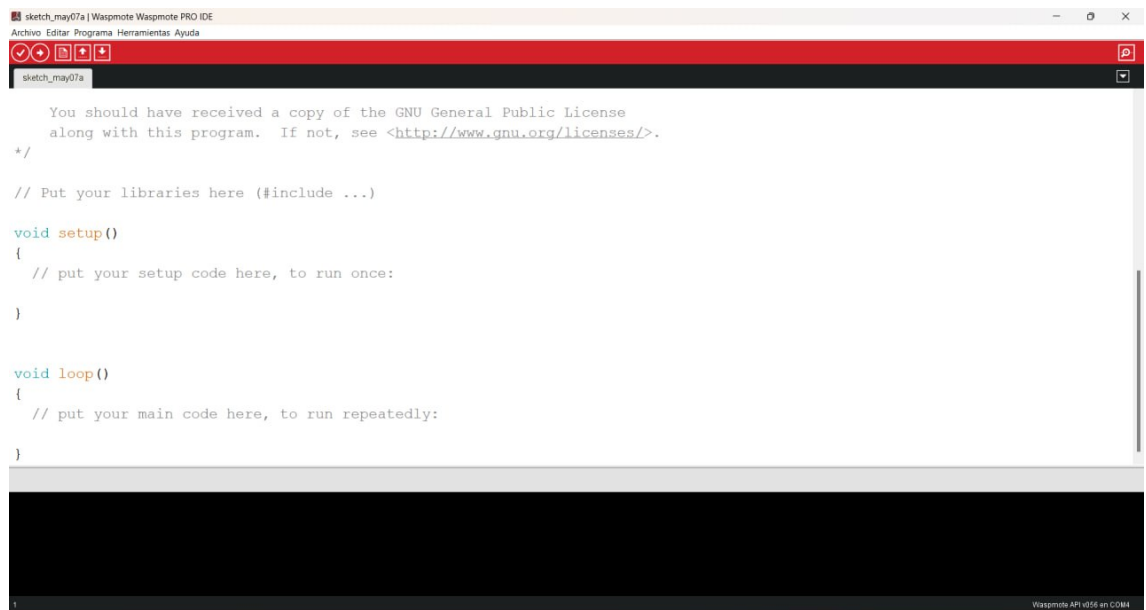


Figura 4.10 Software Waspnote

El código a desarrollar se divide principalmente en 2 partes, la primera (void setup) solo se ejecutará una vez al pulsar el botón de encendido del Libelium Smart Water y la segunda (void loop) que se ejecutará de forma infinita con el delay entre ejecuciones que se elija.

Las librerías que debemos incluir fuera de estas dos partes son:

- WaspSensorSW.h
- WaspLoRaWAN.h
- WaspFrame.h

Con estas tres librerías podemos empezar con el proceso de calibración de cada uno de los 3 sensores, la funcionalidad de cada librería viene especificado en el anexo 10.11.

4.12 Sensores de medición:

4.12.1 Sensor de PH:

El PH es una medida que nos indica acerca de la acidez o alcalinidad del agua, se mide en una escala logarítmica entre 0 y 14 y se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua.

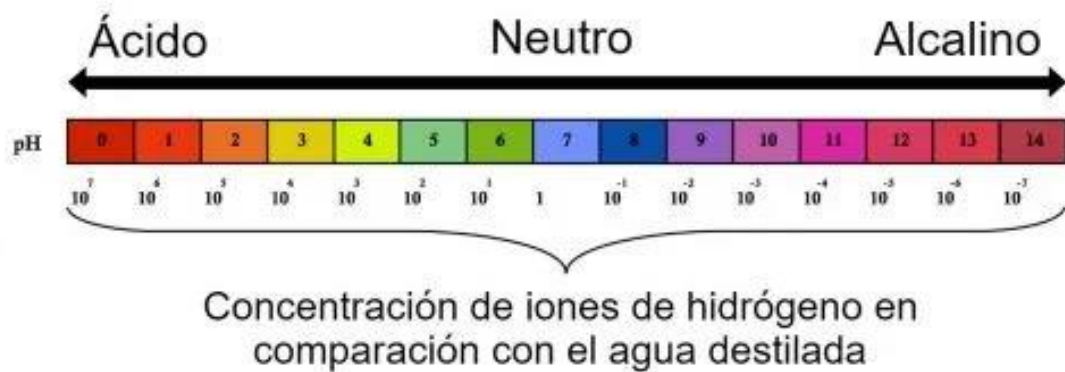


Figura 4.11 Referencia PH [22]

Para su medida se empleará el sensor comercializado por Libelium, un sensor compuesto por una serie de electrodos que proporcionan una tensión en función del PH de la solución que se está midiendo, a modo de referencia, un PH neutro nos aportará una tensión de 2.048 voltios, para que la medida sea lo más exacta posible es necesaria la calibración del sensor, para ello se necesitará un kit de calibración compuesto por 3 soluciones, una con PH neutro, otra con PH ácido y otra con PH alcalino, en nuestro caso se usará PH igual a 7, PH igual a 4 y PH igual a 10.

Aparte del sensor de PH será necesario un sensor de temperatura, para compensar los cambios que se producen en la misma y ajustar la medida en base a esos cambios [23]:

El sensor de PH será el de la figura 4.12:



Figura 4.12 Sensor de PH

Características sensor de PH [23]:

- Composición del sensor: Combinación de electrodos.
- Rango de medición: PH 0 a PH 14.
- Longitud del cable: 50 cm.
- Temperatura de trabajo: 0° Centígrados a 80° centígrados.
- Tiempo de respuesta: inferior a 1 minuto.
- Error en la medida: 15 mV.

El sensor se deberá conectar al socket A del Libelium Plug & Sense, en la figura 4.13 se indica cuál es el socket A:

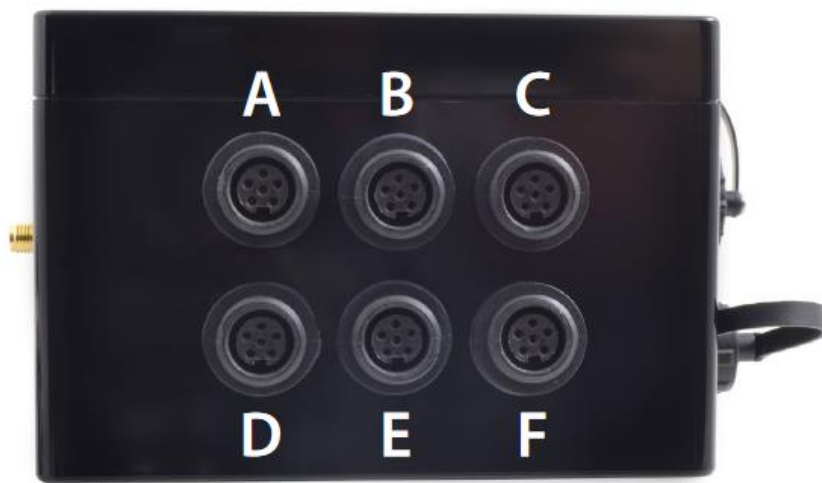


Figura 4.13 Sockets Libelium [24]

Una vez conectado al socket el dispositivo comienza a leer los valores que mide el sensor, para poder realizar la calibración será necesario el uso del software waspmote.

Cada socket está específicamente diseñado para un tipo de sensor específico, a modo de resumen los sockets a los que se deberán de conectar los diferentes sensores son [24]:

Socket	Sensor
A	Sensor de PH
B	Oxígeno disuelto
C	Conductividad
E	Reducción-Oxidación
F	Temperatura

Tabla 4.4 Sockets Libelium

Calibración del sensor:

Haciendo uso de la ayuda que proporciona Libelium, utilizaremos el código del Anexo 6.1 para calibrar y comprobar el sensor de PH [23]:

Una vez cargado el código en el software waspmote y observando los puntos de calibración que se necesitan, PH 4, PH 7 y PH 10, se seguirán los siguientes pasos:

- Se apreciará en el monitor serie que el sensor proporciona una medida distinta de 0, ejemplo de salida monitor serie:

```
H#
pH value: 2.2510616779volts | temperature: 20.3847656250degrees |
pH Estimated: 3.8090739250
pH value: 2.2498335838volts | temperature: 20.4285888671degrees |
pH Estimated: 3.8315755844
pH value: 2.2496614456volts | temperature: 20.4486083984degrees |
pH Estimated: 3.8348851203
pH value: 2.2493996620volts | temperature: 20.4590148925degrees |
pH Estimated: 3.8396921157
```

- Una vez se observa que el sensor nos arroja un valor de voltaje distinto de 0 se procederá a sumergirlo en la solución con PH 4, esperaremos a que el valor de voltaje deje de oscilar y anotaremos el valor medido, una vez hecho esto se limpiará el sensor con agua destilada y se hará el mismo procedimiento para las soluciones con PH 7 y PH 10.
- Una vez anotados los valores reales medidos por el sensor se introducirán en el código proporcionado por Libelium, en el apartado Calibration Values, una vez compilado y enviado al Libelium Smart Water, se podrá comprobar que el sensor está correctamente calibrado sumergiéndolo en cualquiera de las 3 soluciones de las que se dispone, a modo de ejemplo, si se sumerge en la solución PH 4, en el monitor serie debe apreciarse un valor de PH muy cercano a 4, si el valor dista mucho de 4 deberá realizarse una nueva calibración puesto que no se habría realizado correctamente.

Finalmente, una vez comprobado que el sensor mide correctamente el valor de la solución se podría pasar a la calibración de otro sensor del Libelium Smart Water.

4.12.2 Sensor ORP

El potencial REDOX del agua mide la energía química de oxidación-reducción del líquido, mediante un electrodo, al igual que ocurre con el sensor de PH, el sensor de ORP nos devolverá un valor de tensión, en función de la tensión que devuelve dicho valor podremos interpretar el nivel de potencial de oxidación del fluido [25].

Para saber cuáles son valores adecuados o no, haremos uso de la siguiente indicación:

POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE OXIDACIÓN

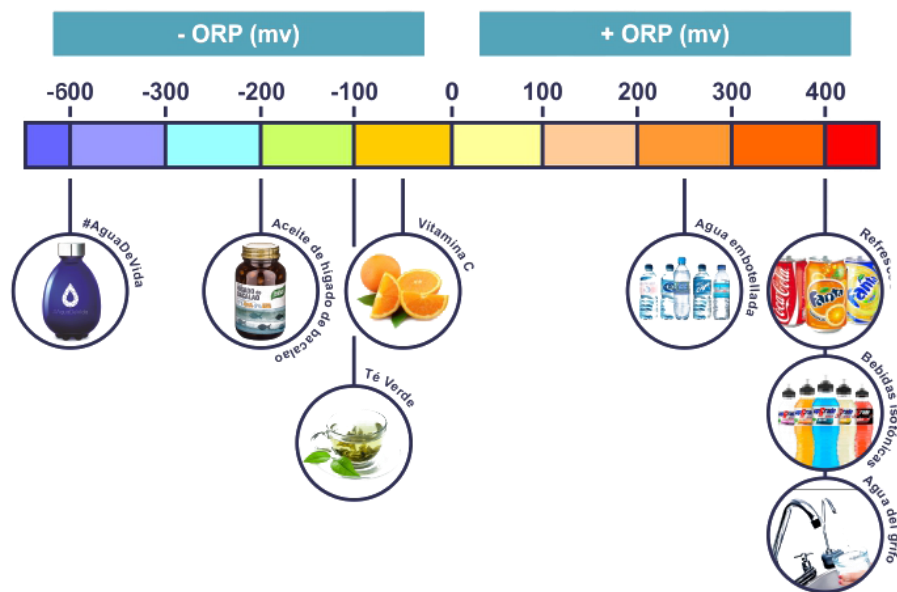


Figura 4.14 Referencias ORP [26]

Como se puede apreciar, para el agua potable se establece que el valor de ORP debe situarse en 250 milivoltios y para el agua de grifo podría establecerse en 400 milivoltios.

El sensor de ORP utilizado será el de la figura 4.15:



Figura 4.15 Sensor ORP [25]

Las características técnicas del sensor ORP serán las siguientes:

- Composición del sensor: Combinación de electrodos.
- Rango de medición: -1999 milivoltios a 1999 milivoltios.
- Longitud del cable: 50 cm.
- Temperatura de trabajo: 0° Centígrados a 50° centígrados.
- Error en la medida: 1 mV.

Calibración del sensor:

Para la calibración del sensor de ORP se sigue un proceso similar al sensor de PH, en primer lugar, tendremos que conectar el sensor ORP al socket E y utilizando el código proporcionado por Libelium para este proceso presente en el anexo 6.2, procederemos a sumergir el sensor ORP en la solución de 225 milivoltios, esperando un tiempo adecuado a que el valor de medida se estabilice, anotaremos el valor de la medida aportada por el sensor, éste valor se usará para calcular el offset entre la medida y el valor real, una vez hecho esto se introducirá en el código en el apartado `#define calibration_offset X.X`, una vez compilado y cargado en el Libelium Smart Water Plug & Sense, podremos comprobar si al sumergir de nuevo el sensor en la solución con 225 milivoltios de ORP el valor obtenido en el monitor serie es 225 o muy similar, si es muy distinto habría que recalibrar el sensor de nuevo, limpiándolo con agua destilada y siguiendo el procedimiento anterior [25].

Finalmente, una vez comprobado que el sensor mide correctamente el valor de la solución se podría pasar a la calibración de otro sensor del Libelium Smart Water.

4.12.3 Sensor de Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto del agua es la medida de la cantidad de oxígeno que se encuentra en disolución en un fluido, dicho oxígeno es fundamental para la vida de peces, plantas y algas, por tanto, es un claro indicador de la cantidad de vida que puede haber en un determinado fluido (27).

Los valores de referencia de Oxígeno disuelto en agua en función de la temperatura será los indicados en la tabla 4.5 [28]

Temperatura (°C)	OD (mg/l)	Temperatura (°C)	OD (mg/l)
0	14.6	16	9.9
1	14.2	17	9.7
2	13.8	18	9.6
3	13.5	19	9.3
4	13.1	20	9.1
5	12.8	21	8.9
6	12.5	22	8.7

7	12.1	23	8.6
8	11.8	24	8.4
9	11.6	25	8.3
10	11.3	26	8.1
11	11.0	27	8.0
12	10.8	28	7.8
13	10.5	29	7.7
14	10.3	30	7.6
15	10.1	31	7.5

Tabla 4.5 Referencias oxígeno disuelto

El sensor de oxígeno disuelto será el comercializado por Libelium:



Figura 4.16 Sensor de Oxígeno disuelto [27]

Las características técnicas del sensor de Oxígeno disuelto serán las siguientes [27]:

- Composición del sensor: Célula galvánica.
- Rango de medición: 0 a 20 mg/L
- Longitud del cable: 50 cm.
- Temperatura de trabajo: Máximo 50 grados.
- Salida de saturación: 33 mV +/- 9 mV.
- Error en la medida: 1 mV.
- Tiempo de respuesta: Después de equilibrio, 2 minutos.
- Presión: 7.5 bares

Calibración del sensor:

Para la calibración del sensor de Oxígeno disuelto en primer lugar deberemos conectarlo al socket B, una vez hecho esto haciendo uso del código proporcionado por Libelium presente en el anexo 6.3 sumergiremos el sensor en la solución con ausencia de

oxígeno, este sensor se calibrará usando el 0% de oxígeno (solución) y el 100% de oxígeno, sensor en el aire [27].

Una vez sumergido en la solución con 0% de oxígeno y estabilizada la medida debemos anotar el valor obtenido en el monitor serie, posteriormente se dejará el sensor al aire y anotaremos la medida obtenida en el monitor serie con 100% de oxígeno, introduciremos los valores anotados en el apartado `#define air_calibration 2.65` y `#define zero_calibration`.

Una vez compilado el código y enviado al Libelium Smart Water Plug & Sense se probará si las medidas que se obtienen son cercanas al 100% en el caso en el que el sensor se encuentra al aire libre y cercana al 0% en el caso en el que el sensor se encuentra sumergido en la solución con 0% oxígeno.

4.12.4 Sensor de conductividad

A través de la conductividad de un fluido medimos la capacidad que tiene el mismo para conducir una corriente eléctrica a través de iones disueltos, el sensor de conductividad de Libelium es un sensor que tiene 2 celdas cuya resistencia varía en función de la conductividad del fluido en el que se encuentra sumergido. La conductividad se medirá en Siemens/centímetro, el sensor será el siguiente:



Figura 4.17 Sensor de conductividad [29]

Los valores de referencia de conductividad de un fluido serán los siguientes:

Conductividad a 25°C	
Agua ultra-pura	0.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Agua potable	5 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Solución de suelo	0.5-2.5 mS/cm
Agua de mar	53.0 mS/cm
5 % NaOH	223.0 mS/cm

Tabla 4.6 Referencias conductividad

Observando que la conductividad apropiada para el agua potable es de 100 micro siemens por centímetro.

Las características técnicas del sensor de conductividad de Libelium son [29]:

- Tipo de sensor: 2 electrodos
- Material de cada electrodo: Platino
- Conductividad de la célula: $1 \pm 0.2 \text{ cm}^{-1}$
- Longitud de cable: 50 cm

Calibración del sensor:

Para la calibración del sensor de Conductividad en primer lugar deberemos conectarlo al socket C, una vez hecho esto haciendo uso del código proporcionado por Libelium sumergiremos el sensor en la solución con una conductividad de 10500 micro siemens por centímetro, esperaremos a que la lectura obtenida por el sensor se estabilice y anotaremos ese valor, posteriormente sumergimos el sensor en agua destilada para limpiarlo y seguidamente sumergiremos el sensor en la solución de 4000 micro siemens por centímetro, esperaremos que la medida se estabilice y anotaremos el valor obtenido, como en los procesos anteriores introduciremos en el código los valores anotados en los apartados `#define point1_cal 197.00` y `#define point2_cal 150.00`.

El código usado será el presente en el anexo 6.4 [29]:

Una vez realizado el procedimiento, se compilará el código y se enviará al Libelium Smart Water Plug & Sense.

A modo de comprobación se podrá sumergir el sensor de nuevo en la solución deseada y observar si el valor arrojado es similar al de la solución o no, si no lo es la calibración no se habría realizado de forma correcta y habría que repetir la misma.

4.12.5 Sensor de Temperatura

El sensor de temperatura de Libelium no necesita calibración, aparte de medir la temperatura del agua, sirve para realizar una compensación a la hora de medir el PH como ya se ha indicado, el sensor de temperatura será el siguiente:



Figura 4.18 Sensor de Temperatura [31]

El sensor de temperatura se conectará al socket F, para comprobar que su funcionamiento es correcto podremos lanzar el código proporcionado por Libelium y observar si la temperatura indicada en grados centígrados es apropiada.

Las especificaciones técnicas del sensor de temperatura son las siguientes [29]:

- Rango de medida: 0 a 100 grados centígrados.
- Precisión: DIN EN 60751.
- Resistencia a 0 grados centígrados: 1000 ohmios.
- Diámetro: 6 mm.
- Longitud de cable: 50 cm.

El código será el presente en el anexo 6.5 [29].

Una vez observado el monitor serie y siendo los valores de temperatura razonables podemos validar el sensor de temperatura.

4.12.6 Sensor de turbidez:

El sensor de turbidez de agua no se puede utilizar de forma simultánea con el sensor de temperatura, a diferencia de los sensores anteriores, este sensor no se conecta a un socket de los 6 que incorpora el dispositivo, se conecta en los puertos indicados en la figura 4.18:

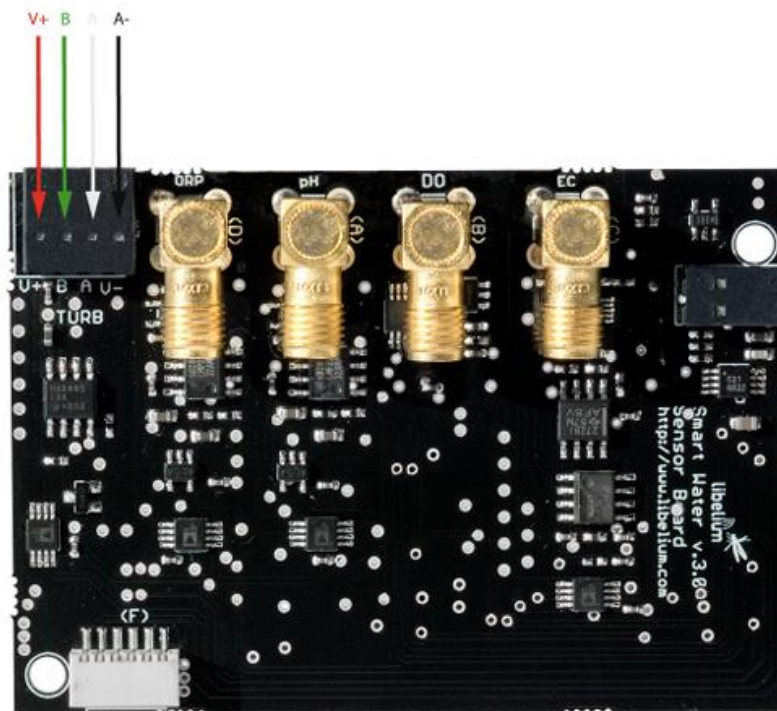


Figura 4.19 Placa Waspmote [4]

Este sensor viene calibrado de fábrica por tanto no es necesaria su calibración, como se indica en la web de Libelium el sensor se debe colocar siguiendo la indicación de la figura 4.19:

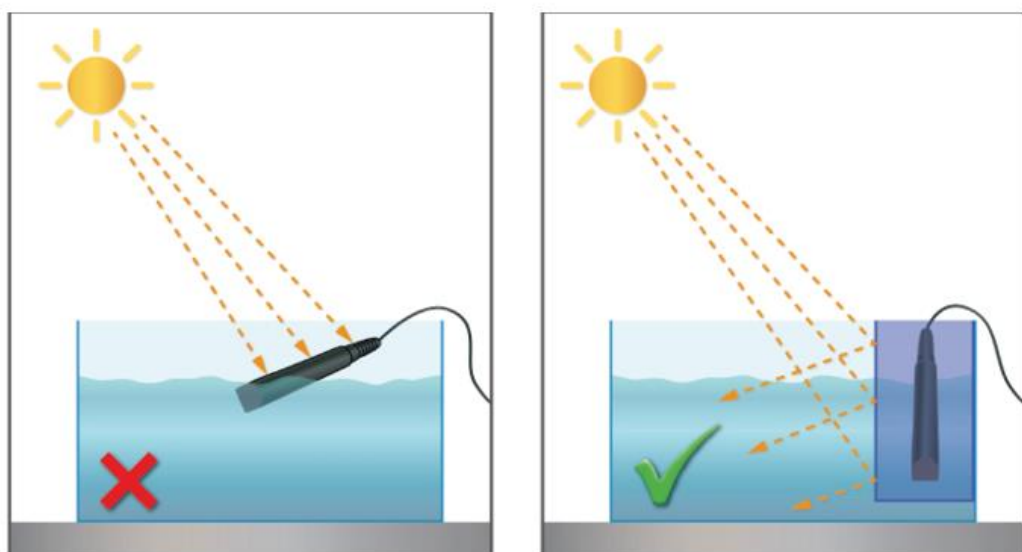


Figura 4.20 Posición sensor de turbidez [4]

Sumergido completamente para evitar que la radiación solar haga que la medida de turbidez no sea la más exacta.

Las especificaciones técnicas del sensor de turbidez son las siguientes [32]:

- Tipo de sensor: sensor IR óptico.
- Rango de medida: 0-4000 NTU.
- Precisión: 5%
- Robustez y grado de protección: IP68.
- Consumo de potencia: 820 micro amperios.
- Fuente de alimentación: 5 voltios.
- Rango de temperatura de trabajo: -10 a 60 grados centígrados.
- Material del sensor: PVC.
- Longitud del cable: 30 cm.

Para observar que el sensor mide correctamente se hará uso del código proporcionado por Libelium presente en el anexo 6.6 [32].

Una vez observado que el valor obtenido se encuentra entre 255 y 309 NTU podremos dar por correcta la medición y validar el sensor.

4.13 Medidor LoraWAN

Para realizar mediciones de cobertura previa instalación del Libelium Smart Water Plug & Sense y comprobar que la cobertura que llega desde la estación base hasta el punto de medida de la calidad del agua es suficiente se utilizará el medidor “Adeunis testeador de campo LoraWAN”, el dispositivo es el de la figura 4.21:



Figura 4.21 Medidor Lora [33]

Este dispositivo nos permite conocer de forma instantánea el nivel de señal en dBm en un punto determinado, sus especificaciones son [33]:

- Geolocalización en cada medida
- Visualización de datos: Uplink/Downlink, canal en frecuencia, RSSI, GPS.
- Temperatura de la medición.
- Incorpora una batería para ser utilizado de forma inalámbrica.
- Temperatura de funcionamiento: -20 a 75 grados centígrados.
- Potencia radiada seleccionable.
- Sensibilidad: -140 dBm.

Haciendo uso de este medidor podremos comparar los resultados de las simulaciones frente a un escenario real.

4.14 Plan de pruebas

4.14.1 Objetivo

A lo largo del plan de pruebas se hará un repaso de las diferentes comprobaciones que se han realizado para la validación del funcionamiento de los diferentes dispositivos utilizados en la red LoRaWAN instalada.

Descripción	Resultado	Materiales
Comprobación de la conexión LoRa del dispositivo Libelium con la estación base	Una vez se ha añadido el dispositivo Libelium a través de su devEUI, appEUI y appKEY siguiendo el procedimiento del Anexo 6.12 se verificará que el dispositivo comienza a enviar datos a la estación base entrando en la sección paquetes de la estación base y filtrando por el devEUI del Libelium Smart Water	Estación base y Libelium Smart Water
Comprobación de cobertura en el punto donde se medirá la calidad del agua	Una vez se ha añadido el dispositivo medidor LoRaWAN en la estación base siguiendo el procedimiento del Anexo 6.12, se tomarán diferentes medidas dejando un tiempo entre medidas de 10 minutos, con esto se comprueba que existe	Estación base y medidor LoRaWAN

	cobertura en el punto requerido	
Comprobación de lectura de valores de sensores Libelium Smart Water	Una vez se han calibrado los sensores siguiendo el procedimiento para cada uno de ellos indicado en el Capítulo 4, se sumergirá sensor a sensor en un recipiente con agua, y haciendo uso del monitor serie del software Waspote podremos comprobar si se arrojan medidas coherentes de cada uno de los sensores	Libelium Smart Water, ordenador, cable USB y software Waspote

Tabla 4.7 Pruebas realizadas

5 Capítulo 5: Resultados y conclusiones

Para los cálculos teóricos, se emplearán dos enfoques: en primer lugar, se utilizará la Toolbox implementada y en segundo lugar se utilizarán los softwares de simulación disponibles Xirio online y Radio Mobile.

A lo largo de este capítulo se analizarán 20 enlaces en el municipio de Motril, Granada, de los cuales se ha realizado medición de cobertura in situ en 13, de ellos 12 se pueden considerar medio urbano y el enlace 13 se podría considerar suburbano debido a la baja edificación en sus proximidades. A partir de estos datos, se llevarán a cabo diversas comparaciones entre los resultados empíricos y los cálculos teóricos, con el objetivo de identificar el modelo o software más adecuado para la planificación de cobertura. Los puntos de medición de cobertura se ilustran en la figura inferior:

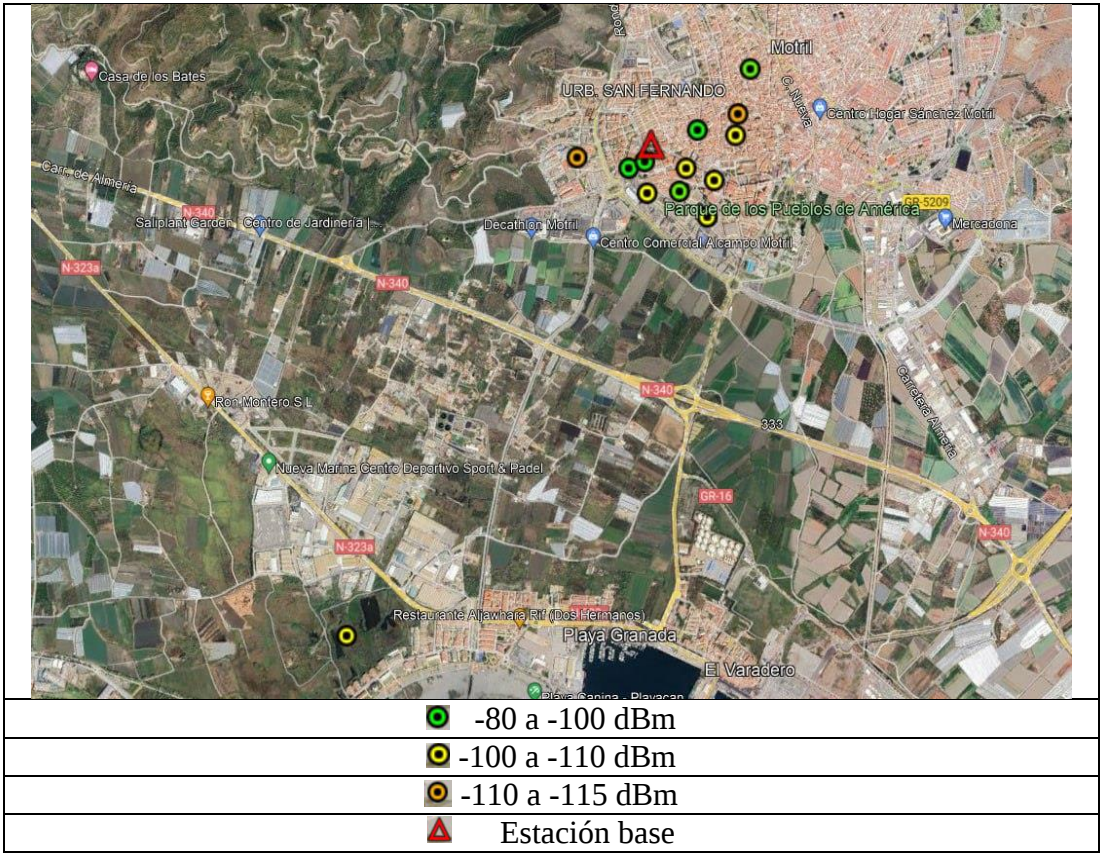


Figura 5.1 Ubicaciones medidas reales

5.1 Cálculos teóricos

En este capítulo se realizará el cálculo del nivel de potencia recibido en el receptor empleando los siguientes modelos de propagación: Espacio Libre, COST 231, Tierra Plana, Reflexión en Tierra Esférica y el modelo de Lee.

Para llevar a cabo estos cálculos teóricos, se analizarán 13 enlaces con cobertura medida experimentalmente y 7 enlaces adicionales a distintas distancias, en los cuales no se cuenta con mediciones reales de cobertura, con el objetivo de determinar el alcance teórico del sistema en estudio.

5.1.1 Espacio Libre

Para el cálculo se utilizará la función `Ate_espacio_libre` de la Toolbox implementada, teniendo en cuenta de que la PIRE es de 9 dBm y la ganancia en la antena receptora es de 2 dBi. Como ya se ha indicado, los cálculos se harán en 20 enlaces, siempre considerando la misma PIRE y cambiando la distancia entre transmisor y receptor.

Enlace	Distancia (m)	Atenuación en dB	Potencia en dBm	Medida real en dBm	Valor campo eléctrico en recepción modelo de Espacio libre en dB μ V/m
Enlace 1	72	68.35	-57.36	-80	106.62
Enlace 2	95	70.76	-59.77	-99	104.22
Enlace 3	98	71.03	-60.04	-101	103.95
Enlace 4	100	71.21	-60.21	-97	103.77
Enlace 5	102	71.38	-60.38	-104	103.60
Enlace 6	105	71.63	-60.64	-99	103.35
Enlace 7	110	72.04	-61.04	-106	102.94
Enlace 8	360	82.33	-71.34	-107	92.65
Enlace 9	420	83.67	-72.68	-105	91.31
Enlace 10	490	85.01	-74.02	-108	89.97
Enlace 11	510	85.36	-74.36	-110	89.62
Enlace 12	550	86.01	-75.02	-113	88.96
Enlace 13	700	88.11	-77.11	No disponible	86.87
Enlace 14	800	89.27	-78.27	No disponible	85.71
Enlace 15	900	90.29	-79.30	No disponible	84.69
Enlace 16	1000	91.21	-80.21	No disponible	83.77
Enlace 17	1200	92.79	-81.80	No disponible	82.19
Enlace 18	1900	96.78	-85.79	No disponible	78.20
Enlace 19	2610	99.54	-88.54	-106	75.44
Enlace 20	3000	100.75	-89.75	No disponible	74.23

Tabla 5.1 Resultados modelo Espacio libre

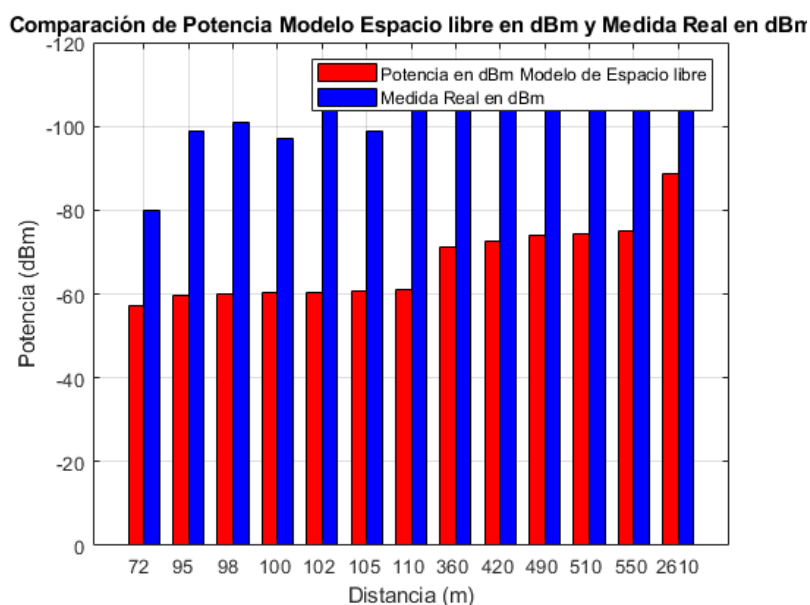


Figura 5.2 Comparación resultados modelo Espacio Libre y medidas reales

Al analizar los datos presentados en la tabla y en la figura correspondiente, se evidencia que el modelo de propagación en espacio libre presenta limitaciones significativas para la planificación de cobertura. Esta discrepancia entre los valores teóricos y las mediciones realizadas en condiciones reales es notable. En la figura, se observa que, a medida que la distancia aumenta, la potencia recibida disminuye, lo cual es consistente con las expectativas teóricas. Sin embargo, las mediciones reales no exhiben la misma linealidad que el modelo de espacio libre.

Este fenómeno se atribuye a la presencia de diversos obstáculos, tales como edificaciones y elementos naturales, que afectan la propagación de la señal. El modelo de espacio libre asume condiciones de línea de vista sin considerar la atenuación provocada por estos obstáculos. Por lo tanto, su aplicación en la planificación de cobertura resulta inapropiada en entornos donde no se garantiza una visibilidad directa completa, lo que limita su efectividad para predecir el comportamiento real de la señal en entornos urbanos o naturales.

5.1.2 Modelo Cost 231

Para realizar los cálculos con el modelo Cost 231, utilizaremos la función `Ate_Cost231` de la Toolbox de Matlab implementada, la PIRE será de 9 dBm, la altura de la antena transmisora será de 12 metros y la altura de la antena receptora será de 1.5 metros, la anchura de la calle será de 7 metros, la separación entre edificios será de 2 metros, la diferencia entre la altura de la estación base y los edificios limítrofes será de 0.35 metros, la diferencia entre la altura de la estación móvil y los edificios limítrofes en metros será de -10 metros, la ciudad será grande y el ángulo entre el rayo y el eje de la calle será de 90 grados.

Enlace	Distancia (m)	Atenuación en dB	Potencia en dBm	Medida real en dBm	Valor campo eléctrico en recepción modelo COST231 en dB μ V/m
Enlace 1	72	52.93	-41.93	-80	122.05
Enlace 2	95	57.51	-46.51	-99	117.48
Enlace 3	98	58.02	-47.02	-101	116.96
Enlace 4	100	58.35	-47.35	-97	116.63
Enlace 5	102	58.68	-47.68	-104	116.30
Enlace 6	105	59.16	-48.16	-99	115.82
Enlace 7	110	59.93	-48.93	-106	115.06
Enlace 8	360	79.49	-68.49	-107	95.49
Enlace 9	420	82.04	-71.04	-105	92.95
Enlace 10	490	84.58	-73.58	-108	90.40
Enlace 11	510	85.24	-74.24	-110	89.74
Enlace 12	550	86.49	-75.49	-113	88.50
Enlace 13	700	112.19	-79.47	No disponible	84.52
Enlace 14	800	90.47	-81.67	No disponible	82.31
Enlace 15	900	92.67	-83.62	No disponible	80.37
Enlace 16	1000	94.62	-85.35	No disponible	78.63
Enlace 17	1200	96.35	-88.36	No disponible	75.62
Enlace 18	1900	99.36	-95.95	No disponible	68.04
Enlace 19	2610	106.95	-101.19	-106	62.80
Enlace 20	3000	114.48	-103.48	No disponible	60.50

Tabla 5.2 Resultados modelo COST231

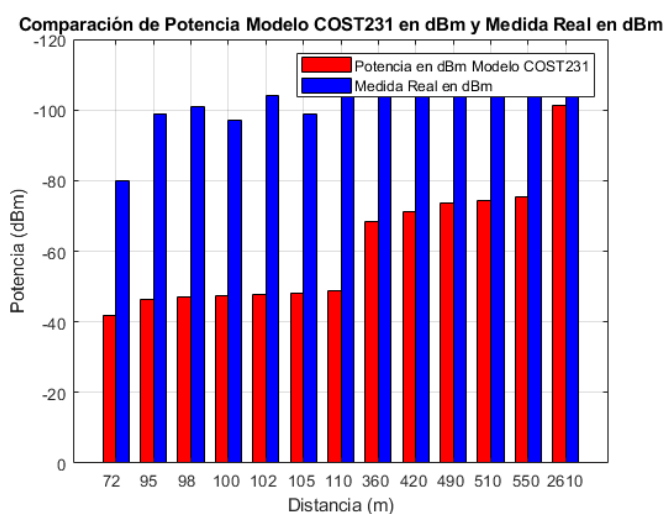


Figura 5.3 Comparación resultados modelo COST231 y medidas reales

Al examinar la tabla y la figura correspondientes, se constata que el modelo de propagación COST231 presenta limitaciones significativas en su aplicabilidad para la planificación de cobertura. Se evidencia una discrepancia notable entre los valores teóricos calculados y los valores empíricos obtenidos en condiciones reales. Sin embargo, es relevante destacar que, en la medición 13, la diferencia registrada es de tan solo 4.8 dB, lo que sugiere que, a medida que aumenta la distancia de propagación, el modelo COST231 tiende a un comportamiento más acorde con las condiciones de planificación de cobertura.

Este fenómeno puede atribuirse a un menor grado de urbanización en esa dirección específica, lo que implica que el modelo podría ser más efectivo en escenarios donde la densidad de edificaciones y la presencia de obstáculos naturales son reducidas. En consecuencia, se sugiere que el modelo COST231 podría ser apropiado para entornos con características de propagación más despejadas, donde la línea de vista (LOS) se encuentra menos comprometida.

5.1.3 Modelo Tierra Plana

Para la realización de los cálculos con este modelo utilizaremos la función Ate_Tierra_plana, respecto a altura de antenas y potencia transmitida se usará la misma que para el Modelo Cost 231. Para determinar la potencia recibida utilizando el modelo de Tierra plana, es necesario considerar las pérdidas debidas a la reflexión en el terreno. Basándonos en las condiciones eléctricas del suelo, con una permitividad relativa de 30 y una conductividad de 10^{-2} S/m, podemos calcular el coeficiente de reflexión para este terreno y las pérdidas asociadas a dicha reflexión utilizando la toolbox desarrollada para este propósito, obteniendo los siguientes resultados para los 20 enlaces en estudio:

Enlace	Distancia (m)	Atenuación en dB	Potencia en dBm	Medida real en dBm	Valor campo eléctrico en recepción modelo Tierra plana en dBμV/m
Enlace 1	72	12.30	-69.66	-80	94.33
Enlace 2	95	12.30	-72.07	-99	91.92
Enlace 3	98	12.30	-72.34	-101	91.65
Enlace 4	100	12.30	-72.51	-97	91.47
Enlace 5	102	12.30	-72.68	-104	91.30
Enlace 6	105	12.30	-72.93	-99	91.05
Enlace 7	110	12.30	-73.34	-106	90.64
Enlace 8	360	12.30	-83.64	-107	80.35
Enlace 9	420	12.30	-84.98	-105	79.01
Enlace 10	490	12.30	-86.31	-108	77.67
Enlace 11	510	12.30	-86.66	-110	77.32

Enlace 12	550	12.30	-87.32	-113	76.67
Enlace 13	700	12.30	-89.41	No disponible	74.57
Enlace 14	800	12.30	-90.57	No disponible	73.41
Enlace 15	900	12.30	-91.60	No disponible	72.39
Enlace 16	1000	12.30	-92.51	No disponible	71.47
Enlace 17	1200	12.30	-94.09	No disponible	69.89
Enlace 18	1900	12.30	-98.09	No disponible	65.90
Enlace 19	2610	12.30	-100.84	-106	63.14
Enlace 20	3000	12.30	-102.05	No disponible	61.93

Tabla 5.3 Resultados modelo de Tierra plana

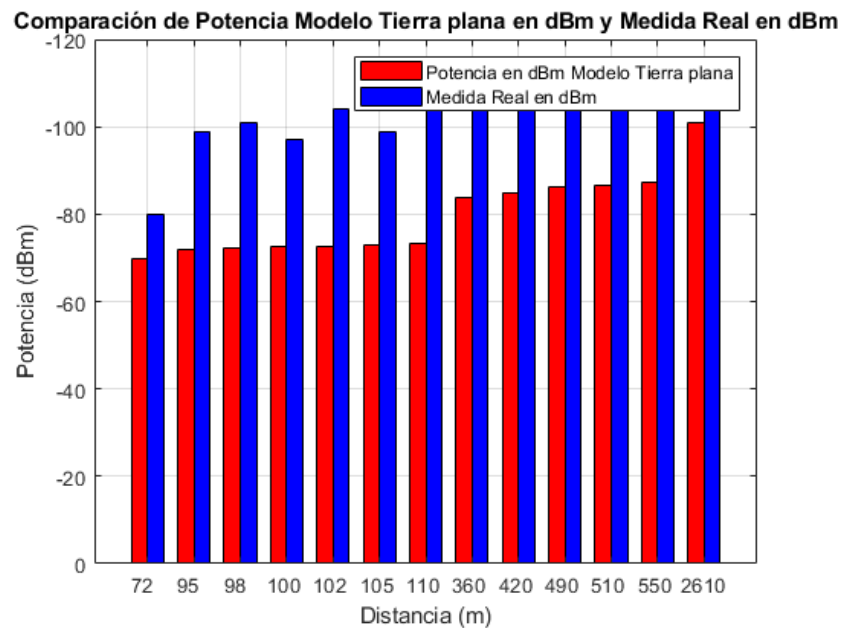


Figura 5.4 Comparación resultados Tierra plana y medidas reales

Al analizar la tabla y la figura correspondientes, se establece que el modelo de propagación de Tierra Plana presenta limitaciones sustanciales para la planificación de cobertura. La atenuación calculada es altamente sensible al tipo de terreno en el que se produce la reflexión, considerando únicamente una reflexión, lo cual es poco realista en escenarios prácticos. Esta limitación implica que la atenuación se mantiene casi constante, derivada de la reflexión, independientemente de las variaciones en la distancia de propagación. Así, las pérdidas en la propagación son predominantemente atribuibles a las pérdidas en espacio libre, que dependen fuertemente de la distancia. En consecuencia, este modelo no es adecuado para aplicaciones donde la planificación de cobertura demanda consideraciones más dinámicas y representativas del entorno real.

5.1.4 Reflexión en Tierra esférica

Para los cálculos en este caso se usará la función `Ate_Reflexion_esferica` de la Toolbox implementada, en cuanto a los parámetros utilizados, en cuanto a distancias se

consideran las de los 20 enlaces en estudio, la altura de la antena transmisora y receptora 12 y 1.5 metros respectivamente, en cuanto a las características eléctricas del suelo se ha utilizado una permitividad eléctrica relativa de 30 y una conductividad de 10^{-2} S/m, obteniendo los siguientes resultados:

Enlace	Distancia (m)	Atenuación en dB	Potencia en dBm	Medida real en dBm	Valor campo eléctrico en recepción reflexión Tierra esférica en dB μ V/m
Enlace 1	72	14.19	-71.55	-80	92.43
Enlace 2	95	14.17	-73.94	-99	90.04
Enlace 3	98	14.17	-74.21	-101	89.77
Enlace 4	100	14.17	-74.38	-97	89.60
Enlace 5	102	14.17	-74.55	-104	89.43
Enlace 6	105	14.17	-74.81	-99	89.18
Enlace 7	110	14.17	-75.21	-106	88.78
Enlace 8	360	14.16	-85.50	-107	78.48
Enlace 9	420	14.16	-86.84	-105	77.15
Enlace 10	490	14.16	-88.18	-108	75.81
Enlace 11	510	14.16	-88.52	-110	75.46
Enlace 12	550	14.16	-89.18	-113	74.80
Enlace 13	700	14.16	-91.27	No disponible	72.71
Enlace 14	800	14.16	-92.43	No disponible	71.55
Enlace 15	900	14.16	-93.46	No disponible	70.53
Enlace 16	1000	14.16	-94.37	No disponible	69.61
Enlace 17	1200	14.16	-95.96	No disponible	68.03
Enlace 18	1900	14.16	-99.95	No disponible	64.04
Enlace 19	2610	14.16	-102.71	-106	61.28
Enlace 20	3000	14.16	-103.92	No disponible	60.07

Tabla 5.4 Resultados reflexión en Tierra esférica

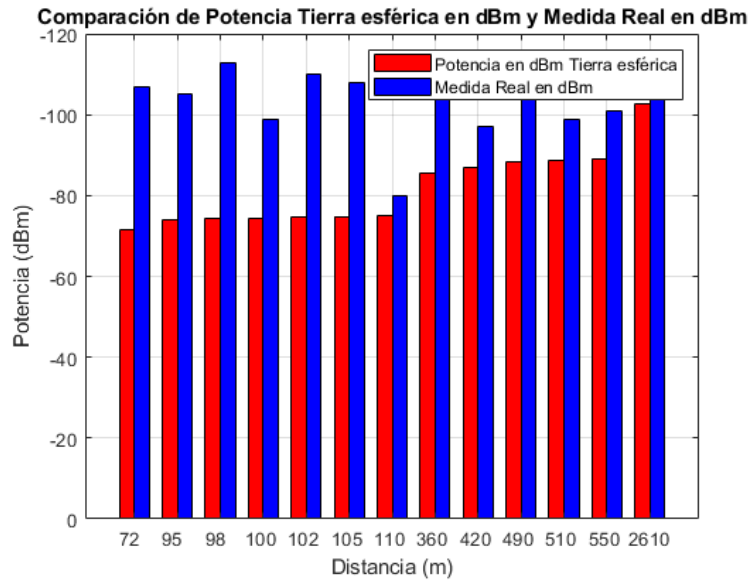


Figura 5.5 Comparación resultados Tierra esférica y medidas reales

Al analizar la figura y la tabla anteriores, se evidencia que este modelo de propagación exhibe una dependencia crítica del tipo de terreno sobre el cual se produce la reflexión. Además, el modelo considera únicamente una única reflexión, lo que representa un escenario poco realista en condiciones de propagación del mundo real. Por lo tanto, se concluye que este modelo no es adecuado para la planificación de cobertura, ya que no incorpora las complejidades del entorno de propagación que influyen en la atenuación de la señal. Estas complejidades incluyen las múltiples reflexiones en el terreno y la falta de línea de visión directa entre antenas, debido a obstrucciones causadas por edificaciones o elementos naturales. Esta limitación impide realizar una planificación radioeléctrica precisa y efectiva.

5.1.5 Modelo de Lee

Para la realización de los cálculos con este modelo utilizaremos la función `Potencia_Lee`, respecto a altura de antenas serán 12 metros para la antena transmisora y 1.5 para la antena receptora, se calculará para los 3 escenarios posibles, urbano tipo Filadelfia, urbano tipo Newark y urbano tipo Tokio, respecto al valor del campo eléctrico se calculará únicamente para la ciudad tipo Tokio debido a que es el tipo de ciudad que dista menos de la realidad aunque, la potencia transmitida se usará la misma que para los modelos anteriores. Obteniendo el siguiente resultado:

Enlace	Distancia (m)	Potencia ciudad tipo Filadelfia en dBm	Potencia ciudad tipo Newark en dBm	Potencia ciudad tipo Tokio en dBm	Medida real en dBm	Valor campo eléctrico en recepción Modelo de Lee en dBμV/m
Enlace 1	72	-34.58	-20.08	-57.08	-80	106.91
Enlace 2	95	-39.01	-25.27	-60.75	-99	103.23
Enlace 3	98	-39.50	-25.85	-61.16	-101	102.82
Enlace 4	100	-39.83	-26.23	-61.43	-97	102.56
Enlace 5	102	-40.14	-26.60	-61.69	-104	102.29
Enlace 6	105	-40.61	-27.14	-62.07	-99	101.91
Enlace 7	110	-41.35	-28.01	-62.69	-106	101.29
Enlace 8	360	-60.30	-50.20	-78.40	-107	85.59
Enlace 9	420	-62.76	-53.09	-80.44	-105	83.55
Enlace 10	490	-65.23	-55.98	-82.48	-108	81.50
Enlace 11	510	-65.87	-56.72	-83.01	-110	80.97
Enlace 12	550	-67.07	-58.14	-84.01	-113	79.97
Enlace 13	700	-70.93	-62.65	-87.20	No disponible	76.78
Enlace 14	800	-73.06	-65.15	-88.97	No disponible	75.01
Enlace 15	900	-74.94	-67.36	-90.53	No disponible	73.45
Enlace 16	1000	-76.63	-69.33	-91.93	No disponible	72.06
Enlace 17	1200	-79.54	-72.74	-94.34	No disponible	69.64
Enlace 18	1900	-86.89	-81.34	-100.43	No disponible	63.55
Enlace 19	2610	-91.96	-87.29	-104.64	-106	59.35
Enlace 20	3000	-94.19	-89.89	-106.48	No disponible	57.50

Tabla 5.5 Resultados modelo de Lee

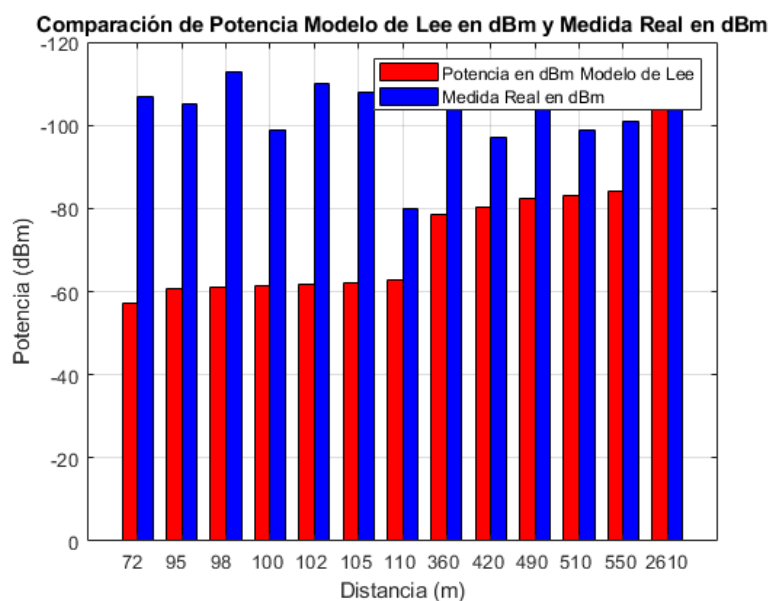


Figura 5.6 Comparación resultados Modelo de Lee y medidas reales

Al analizar los resultados obtenidos en la tabla anterior y figura en la que solo se compara con los resultados para la ciudad tipo Tokio, se puede concluir que, utilizando el modelo de Lee, la ciudad que presenta una mayor concordancia con los valores empíricos es el entorno urbano tipo Tokio. Aunque en la mayoría de los casos se observa una considerable discrepancia entre los resultados teóricos y los medidos, para el enlace 13, la aproximación del valor teórico al valor real es notablemente más precisa. Este comportamiento sugiere que, similar a lo observado con el modelo COST231, a medida que la distancia entre transmisor y receptor se incrementa, el modelo de Lee demuestra una mayor adecuación para la planificación de cobertura. En particular, este modelo ofrece una mejor aproximación que el COST231 en escenarios de mayor distancia, optimizando la estimación de pérdidas y mejorando la precisión en entornos más extensos.

5.1.6 Comparación atenuación modelo COST 231 y Modelo de Espacio libre

Para esta comparación se utilizará una distancia desde los 200 metros a los 10000 metros, haciendo uso de la Toolbox de Matlab encontramos:

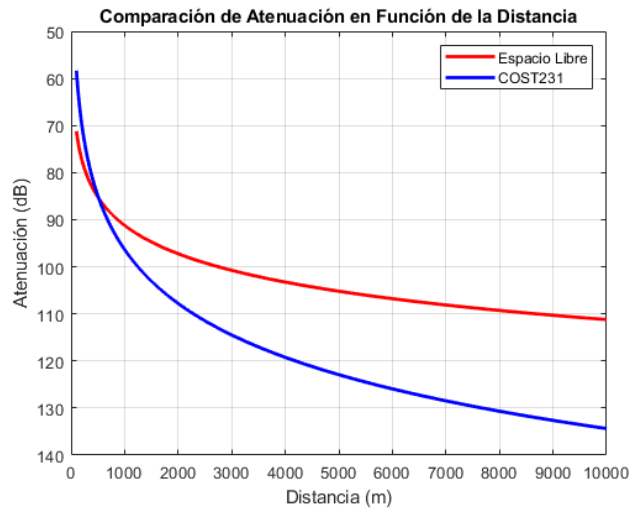


Figura 5.7 Comparación de atenuación en función de la distancia

Al analizar la figura anterior, se puede observar que a una distancia de 516 metros, ambos modelos de atenuación producen resultados equivalentes, alcanzando un valor de 85.45 dB. A medida que la distancia aumenta, se evidencia que el modelo de Espacio Libre presenta menores niveles de atenuación en comparación con el modelo COST231. Esta tendencia es coherente con la teoría subyacente, dado que el modelo de Espacio Libre considera únicamente las pérdidas fundamentales asociadas a la propagación de la señal en un entorno ideal, sin tener en cuenta factores adicionales que podrían influir en la atenuación, como la interferencia, el desvanecimiento o la presencia de obstáculos en el trayecto de la señal.

5.2 Simulaciones de cobertura

En este capítulo se realizarán diferentes simulaciones de cobertura en la localidad de Motril, Granada, en este lugar se encuentra ya desplegada la red LoraWAN, estando la estación base a 12 metros de altura y habiendo tomado las medidas a una altura de 1.5 metros.

5.2.1 Simulación con Radio Mobile

Para la simulación con Radio Mobile, se utilizará una potencia de transmisión de 6 dBm, una ganancia de transmisión de 3 dBi y una ganancia de recepción de 2 dBi, respecto al umbral de recepción se utilizará el fijado por defecto, -117 dBm, por debajo de esta potencia no tendremos información de cobertura, respecto a la altura de la antena transmisora ésta será de 12 metros y la antena receptora tendrá una altura de 1.5 metros.

Los resultados obtenidos con esta simulación son los de la figura 5.8:

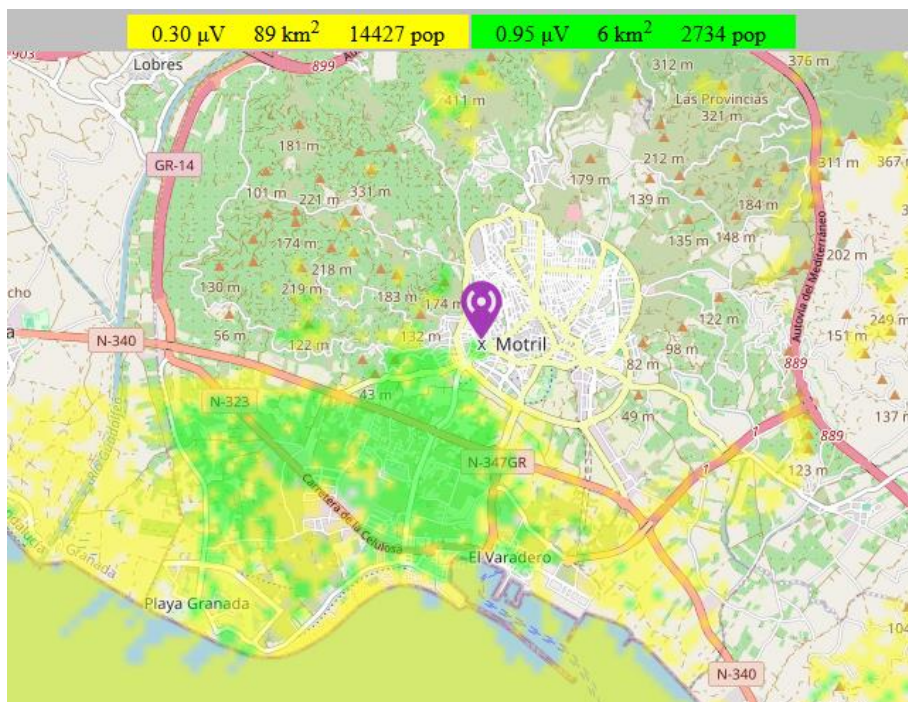


Figura 5.8 Simulación con Radio Mobile

Teniendo en cuenta que en color verde se corresponde a un nivel de señal de 0.95 micro voltios, haciendo la conversión a dBm obtenemos una señal de -106.03 dBm, es dentro del área en verde donde se medirá la calidad del agua con el dispositivo Libelium, mientras que la zona en amarillo corresponde con un nivel de señal de 0.30 micro voltios, de -107.43 dBm aproximadamente.

Es importante señalar que, en la región norte, el software de simulación indica la ausencia de cobertura. Solo se detecta señal en un área adyacente a la estación base en la cara norte. Esta situación limita la posibilidad de comparar los resultados con otros enlaces en análisis, ya que estos se sitúan en zonas donde el software especifica que no hay cobertura disponible.

5.2.2 Simulación con Xirio online

Para la simulación con Xirio online se utilizará una potencia transmitida de 6 dBm, una ganancia en transmisión de 3 dBi y una ganancia en recepción de 2 dBi.

Los resultados obtenidos con este simulador usando el modelo de Espacio libre son los de la siguiente figura:



Figura 5.9 Simulación modelo de Espacio Libre

Haciendo uso de la herramienta medir cobertura en un punto de Xirio, obtenemos los siguientes resultados para los 13 enlaces en los que se puede comparar la cobertura real con la cobertura teórica:

Enlace	Distancia (m)	Potencia Xirio online dBm	Medida real en dBm	Valor campo eléctrico en recepción con modelo de Espacio libre en dB μ V/m
Enlace 1	72	-69.70	-107	94.28
Enlace 2	95	-69.70	-105	94.28
Enlace 3	98	-69.70	-113	94.28
Enlace 4	100	-69.70	-99	94.28
Enlace 5	102	-69.70	-110	94.28
Enlace 6	105	-69.70	-108	94.28
Enlace 7	110	-69.05	-80	94.92
Enlace 8	360	-56.40	-106	107.56
Enlace 9	420	-56.40	-97	107.56
Enlace 10	490	-69.70	-104	94.28
Enlace 11	510	-70.40	-99	93.58
Enlace 12	550	-70.40	-101	93.58
Enlace 13	2610	-88.90	-106	75.12

Tabla 5.6 Resultados simulación modelo de Espacio libre

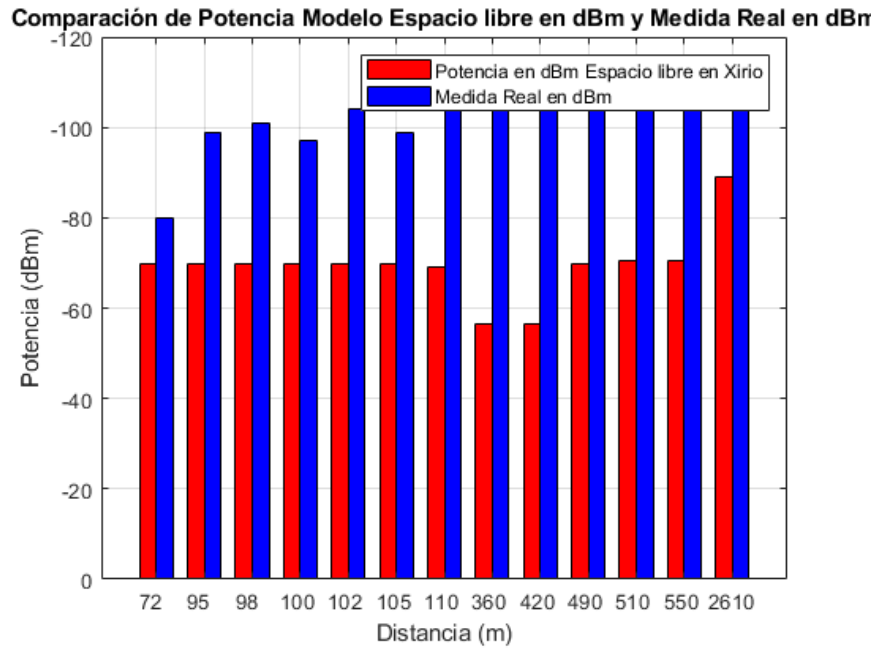


Figura 5.10 Comparación modelo Espacio libre en Xirio y medidas reales

Los resultados presentados en la tabla anterior y en la figura evidencian una discrepancia significativa con respecto a la cobertura real observada. Esta situación se atribuye principalmente al modelo de propagación empleado en la simulación, concretamente el modelo de Espacio Libre. Como consecuencia, la utilización de Xirio Online en conjunto con este modelo no permite realizar una predicción precisa de la cobertura.

Es importante señalar la problemática identificada: Xirio Online debería generar una cobertura equivalente a la calculada previamente con la Toolbox desarrollada, utilizando el mismo modelo de Espacio Libre. Sin embargo, esto no se cumple debido a que, en los casos donde Xirio Online determina la ausencia de línea de vista (LoS) entre la estación base y el receptor, se recurre a una ecuación de la recomendación P.525-2, lo que resulta en la exclusión del modelo de espacio libre. Esta discrepancia en el enfoque provoca diferencias en los resultados, lo que a su vez impide la comparación directa entre los resultados obtenidos con la Toolbox y los generados por Xirio Online.

No obstante, para el enlace 13, se identifica que existe línea de vista, lo que reduce la discrepancia entre los resultados de la Toolbox y de Xirio a menos de 1 dB. Esto sugiere que, a pesar de la divergencia notable respecto a las medidas reales, los cálculos realizados bajo esta condición muestran resultados más coherentes entre sí.

Los resultados obtenidos con Xirio Online usando el modelo COST231 son los de la siguiente figura:

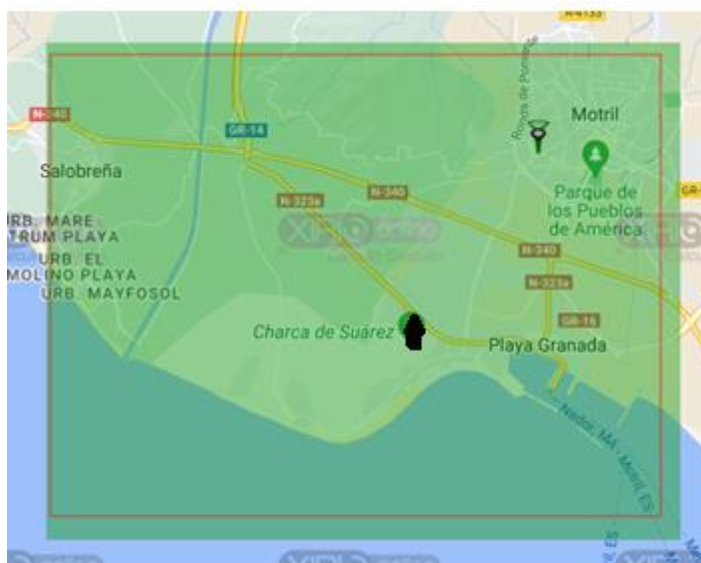


Figura 5.11 Simulación modelo Cost 231

Haciendo uso de la herramienta medir cobertura en un punto de Xirio, obtenemos los siguientes resultados para los 13 enlaces en los que se puede comparar la cobertura real con la cobertura teórica:

Enlace	Distancia (m)	Potencia Xirio online dBm	Medida real en dBm	Valor campo eléctrico en recepción modelo COST231 en dBμV/m
Enlace 1	72	-85.1	-107	78.88
Enlace 2	95	-85.60	-105	78.40
Enlace 3	98	-87.30	-113	76.64
Enlace 4	100	-77.30	-99	86.68
Enlace 5	102	-85.60	-110	78.40
Enlace 6	105	-85.60	-108	78.40
Enlace 7	110	-80.70	-80	83.34
Enlace 8	360	-77.30	-106	86.68
Enlace 9	420	-77.30	-97	86.68
Enlace 10	490	-77.30	-104	86.68
Enlace 11	510	-76.40	-99	87.56
Enlace 12	550	-76.40	-101	87.56
Enlace 13	2610	-101.30	-106	62.92

Tabla 5.6 Resultados simulación modelo COST231

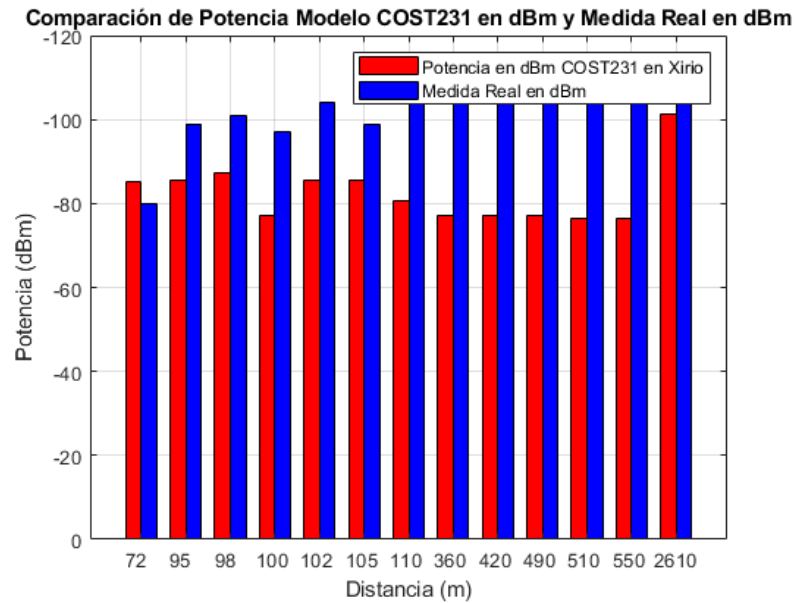


Figura 5.11 Comparación modelo COST231 en Xirio y medidas reales

Como se evidencia en la tabla anterior y en la figura, Xirio Online presenta una precisión insuficiente en la planificación de la cobertura al utilizar el modelo COST231. Esta inexactitud puede ser atribuida a la resolución baja de los cálculos, ya que esta versión se basa en cartografía de menor detalle, lo que ocasiona la omisión de obstrucciones reales, como edificaciones y vegetación.

Para facilitar una comparación válida entre los resultados obtenidos con el modelo COST231 y la Toolbox desarrollada, sería necesario realizar los cálculos en alta resolución, utilizando la versión de pago. Sin embargo, al igual que ocurre con el modelo de Espacio Libre, se observa que los resultados convergen en situaciones donde existe línea de vista (LoS). En tales casos, la cartografía empleada tiene un impacto marginal, y la discrepancia entre los resultados es de apenas 2 dB.

Por lo tanto, la herramienta Xirio Online, al aplicar el modelo COST231, resulta inadecuada para la planificación radioeléctrica en contextos donde se presentan problemas de línea de vista. Sin embargo, cuando se dispone de LoS, los datos proporcionados son relativamente más precisos, aunque todavía carecen de un nivel de exactitud elevado.

5.3 Conclusiones

A partir de un análisis teórico exhaustivo y la aplicación de diversas metodologías de simulación, se concluye que la planificación de cobertura en entornos urbanos densamente poblados y con topografía irregular enfrenta desafíos significativos en términos de precisión predictiva. Los simuladores Radio Mobile y Xirio Online tienden a subestimar la calidad de la cobertura en áreas caracterizadas por una alta concentración de edificaciones. Sin embargo, se ha observado que la precisión de ambos simuladores mejora notablemente al alejarse de estas zonas complejas, donde la densidad de edificaciones disminuye.

Por lo tanto, es crucial diferenciar los enfoques de planificación radioeléctrica según el entorno específico. Para entornos suburbanos, Radio Mobile se identifica como el simulador más adecuado, proporcionando estimaciones de cobertura que se sitúan aproximadamente 1 dB por debajo de los valores medidos en la realidad. Este nivel de precisión lo hace apropiado para planificaciones donde existe línea de visión directa entre la antena transmisora y la antena receptora. Complementariamente, se puede considerar el modelo de Lee para ciudades con características similares a Tokio. A pesar de que este modelo debería, en teoría, proporcionar resultados adecuados en entornos urbanos, en la práctica los resultados distan considerablemente de la realidad. No obstante, en un contexto suburbano, las discrepancias se limitan a aproximadamente 2 dB en comparación con las mediciones reales, lo que sugiere que su uso podría ser viable junto con el simulador Radio Mobile.

En contraste, para ambientes urbanos con una alta densidad de edificaciones, Radio Mobile no proporciona resultados cercanos a la realidad, lo que limita su utilidad como herramienta de planificación en tales escenarios.

Respecto a los diversos modelos y cálculos realizados para identificar cuál se adapta mejor a la planificación en un entorno urbano, se ha evidenciado que ninguno de ellos se aproxima a la cobertura real medida. Esta inexactitud se debe a la complejidad inherente en el cálculo de la cantidad y disposición de obstáculos que interfieren en el vano de transmisión. Cuando se presentan múltiples obstáculos que bloquean totalmente la línea de visión directa, resulta extremadamente complicado obtener resultados que reflejen fielmente la realidad. Esto resalta la necesidad de desarrollar modelos más sofisticados y precisos que consideren la multifacética interacción entre la señal y su entorno en entornos urbanos complejos.

5.4 Líneas futuras

Para la mejora del presente Trabajo de Fin de Grado, se propone la realización de un análisis exhaustivo de la red LoRaWAN bajo condiciones de alta demanda, mediante un incremento significativo en el número de sensores conectados. Este enfoque permitirá evaluar el comportamiento de la red en situaciones de elevada carga de datos transmitidos, facilitando un estudio detallado sobre la distribución del ancho de banda entre los dispositivos conectados. Este análisis proporcionará información crítica acerca de la capacidad y eficiencia de la red en escenarios caracterizados por una alta densidad de tráfico, lo cual es fundamental para la optimización de la infraestructura.

Adicionalmente, se recomienda la implementación de múltiples estaciones base, configurando una red LoRaWAN en topología de malla. Esta arquitectura permitirá una extensión más uniforme de la cobertura en comparación con una configuración basada en una única estación base, lo que es crucial para la mitigación de zonas muertas y la mejora de la resiliencia de la red. El estudio se enfocará en la evaluación de parámetros clave como los tiempos de latencia y el alcance efectivo de la red, proporcionando un entendimiento profundo de los beneficios y desafíos asociados a la configuración mallada en el contexto de la tecnología LoRaWAN.

Finalmente, con el fin de obtener una planificación de cobertura con una precisión superior, se considera conveniente la adquisición de la versión de pago del simulador Xirio. Esta inversión permitirá acceder a funcionalidades avanzadas y datos más precisos, lo que resultará en una modelización más confiable y representativa de la realidad operativa de la red en estudio. La utilización de herramientas avanzadas será esencial para la validación de los resultados y la formulación de estrategias de mejora en la implementación de la red LoRaWAN.

6 Anexos

6.1 Anexo sensor de PH

Código utilizado para la calibración del sensor de PH del Libelium Smart water.

```
#include <WaspSensorSW.h>

float pHVol;
float temp;
float pHValue;

// Calibration values
#define cal_point_10 1.985
#define cal_point_7 2.070
#define cal_point_4 2.227

// Temperature at which calibration was carried out
#define cal_temp 23.7

pHClass pHSensor;
pt1000Class temperatureSensor;

void setup()
{
  USB.ON();
  USB.println(F("pH example for Smart Water..."));

  // Store the calibration values
  pHSensor.setCalibrationPoints(cal_point_10, cal_point_7, cal_point_4,
cal_temp);

  //////////////////////////////////////
  // 1. Turn ON the Smart Water sensor board
  //////////////////////////////////////
  Water.ON();
}

void loop()
{
  //////////////////////////////////////
  // 2. read the sensors
  //////////////////////////////////////

  // Read the ph sensor (voltage value)
  pHVol = pHSensor.readpH();
  // Read the temperature sensor
  temp = temperatureSensor.readTemperature();
```

```

// Convert the value read with the information obtained in calibration
pHValue = pHSensor.pHConversion(pHVol, temp);

////////////////////////////////////
// 3. Print the output values
////////////////////////////////////

USB.print(F("pH value: "));
USB.print(pHVol);
USB.print(F("volts | "));
USB.print(F(" Temperature: "));
USB.print(temp);
USB.print(F("degrees | "));
USB.print(F(" pH Estimated: "));
USB.println(pHValue);
}

```

6.2 Anexo sensor ORP:

Código utilizado para la calibración del sensor de ORP del Libelium Smart water.

```

#include <WaspSensorSW.h>

float ORPValue;

// Offset obtained from sensor calibration
#define calibration_offset 0.0

ORPClass ORPSensor;

void setup()
{
  USB.ON();
  USB.println(F("ORP example for Smart Water..."));

  //////////////////////////////////
  // 1. Turn ON the Smart Water sensor board
  //////////////////////////////////
  Water.ON();
}

void loop()
{
  //////////////////////////////////
  // 2. read the sensors
  //////////////////////////////////

  // Reading of the ORP sensor
  ORPValue = ORPSensor.readORP();
}

```

```

// Apply the calibration offset
ORPValue = ORPValue - calibration_offset;

////////////////////////////////////
// 3. Print the output values
////////////////////////////////////

USB.print(F("ORP Estimated: "));
USB.print(ORPValue);
USB.println(F(" volts"));

delay(1000);
}

```

6.3 Anexo Sensor Oxígeno disuelto

Código utilizado para la calibración del sensor de oxígeno disuelto del Libelium Smart water.

```

#include <WaspSensorSW.h>

float DOVol;
float DOValue;

// Calibration of the sensor in normal air
#define air_calibration 2.65
// Calibration of the sensor under 0% solution
#define zero_calibration 0.0

DOClass DOSensor;

void setup()
{
  USB.ON();
  USB.println(F("DO example for Smart Water..."));

  // Configure the calibration values
  DOSensor.setCalibrationPoints(air_calibration, zero_calibration);

  //////////////////////////////////
  // 1. Turn ON the Smart Water sensor board
  //////////////////////////////////
  Water.ON();
}

void loop()
{
  //////////////////////////////////
  // 2. read the sensors

```

```

////////////////////////////////////

// Reading of the ORP sensor
DOVol = DOSensor.readDO();
// Conversion from volts into dissolved oxygen percentage
DOValue = DOSensor.DOConversion(DOVol);

////////////////////////////////////
// 3. Print the output values
////////////////////////////////////

// Print of the results
USB.print(F("DO Output Voltage: "));
USB.print(DOVol);

// Print of the results
USB.print(F(" DO Percentage: "));
USB.println(DOValue);
}

```

6.4 Anexo sensor de Conductividad

Código utilizado para la calibración del sensor de conductividad del Libelium Smart water.

```

#include <WaspSensorSW.h>

float ECRes;
float ECValue;

// Value 1 used to calibrate the sensor
#define point1_cond 10500
// Value 2 used to calibrate the sensor
#define point2_cond 40000

// Point 1 of the calibration
#define point1_cal 197.00
// Point 2 of the calibration
#define point2_cal 150.00

conductivityClass ConductivitySensor;

void setup()
{
  USB.ON();
  USB.println(F("EC example for Smart Water..."));

  // Configure the calibration parameters

```

```

        ConductivitySensor.setCalibrationPoints(point1_cond, point1_cal, point2_cond,
point2_cal);

        ///////////////////////////////////
        // 1. Turn ON the Smart Water sensor board
        ///////////////////////////////////
        Water.ON();
    }

    void loop()
    {
        ///////////////////////////////////
        // 2. read the sensors
        ///////////////////////////////////

        // Reading of the Conductivity sensor
        ECRes = ConductivitySensor.readConductivity();
        // Conversion from resistance into us/cm
        ECValue = ConductivitySensor.conductivityConversion(ECRes);

        ///////////////////////////////////
        // 3. Print the output values
        ///////////////////////////////////

        // Print of the results
        USB.print(F("Conductivity Output Resistance: "));
        USB.print(ECRes);

        // Print of the results
        USB.print(F(" Conductivity of the solution (uS/cm): "));
        USB.println(ECValue);
    }

```

6.5 Anexo sensor de Temperatura

Código utilizado para la comprobación del buen funcionamiento del sensor de temperatura del Libelium Smart water.

```

#include <WaspSensorSW.h>

// This variable will store the temperature value
float temp;

// Create an instance of the class
pt1000Class TemperatureSensor;

char node_ID[] = "Temperature_example";

```

```

void setup()
{
  USB.ON();
  USB.println(F("Water temperature PT-1000 example for Smart Water..."));

  ///////////////////////////////////
  // 1. Turn ON the Smart Water sensor board
  ///////////////////////////////////
  Water.ON();
}

void loop()
{
  ///////////////////////////////////
  // 2. read the sensors
  ///////////////////////////////////

  // Reading of the Temperature sensor
  temp = TemperatureSensor.readTemperature();

  ///////////////////////////////////
  // 3. Print the output values
  ///////////////////////////////////

  // Print of the results
  USB.print(F("Temperature (celsius degrees: "));
  USB.println(temp);

  // Delay
  delay(1000);
}

```

6.6 Anexo sensor de turbidez

Código utilizado para la comprobación del buen funcionamiento del sensor de turbidez del Libelium Smart water.

```

#include <TurbiditySensor.h>

// Create an instance of the class
turbidityClass turbidity;

void setup()
{
  // Turn on the Turbidity sensor board and start the USB
  USB.ON();
  USB.println(F("Turbidity example for Smart Water"));
}

```

```

////////////////////////////////////
// 1. Power on sensors
////////////////////////////////////
turbidity.ON();
}

void loop()
{
  //////////////////////////////////////
  // 2. Get Turbidity Measure
  //////////////////////////////////////

  float turVal = turbidity.getTurbidity();
  USB.print(F("Turbidity Value: "));
  USB.print(turVal);
  USB.print(F(" NTU | "));

  //////////////////////////////////////
  // 3. Get Temperature Measure from Turbidity sensor
  //////////////////////////////////////

  float temperature = turbidity.getTemperature();
  USB.print(F("Temperature Value: "));
  USB.print(temperature);
  USB.println(F(" Celsius Degrees"));

  delay(2000);
}

```

6.7 Anexo código final Libelium Smart Water

Código final utilizado en el Libelium Smart water para su funcionamiento, enviando a través de LoRa las mediciones cada 12 horas.

```

#include <WaspSensorSW.h>
#include <WaspLoRaWAN.h>
#include <WaspFrame.h>

uint8_t PORT = 10;
float ECRes;
float ECValue;
float pHVol;
float temp;
float pHValue;
float ORPValue;

```

```

float DOVol;
float DOValue;

// Calibration of the sensor in normal air
#define air_calibration 3.39
// Calibration of the sensor under 0% solution
#define zero_calibration 1.96

DOClass DOSensor;

//float temp;

// Calibration values
#define cal_point_10 1.985
#define cal_point_7 2.070
#define cal_point_4 2.227
#define calibration_offset 0.0
// Temperature at which calibration was carried out
#define cal_temp 23.7

pHClass pHSensor;
pt1000Class temperatureSensor;

char DEVICE_EUI[] = "AAAAAAAAAAAAAA";
char APP_EUI[] = "AAAAAAAAAAAAAA";
char APP_KEY[] = "AAAAAAAAAAAAAA";
char moteID[] = "AAAA";

// Value 1 used to calibrate the sensor
#define point1_cond 10500
// Value 2 used to calibrate the sensor
#define point2_cond 40000

// Point 1 of the calibration
#define point1_cal 197.00
// Point 2 of the calibration
#define point2_cal 150.00

conductivityClass ConductivitySensor;
ORPClass ORPSensor;
//frameStruct frame;

void setup()
{
  USB.ON();
  USB.println(F("EC example for Smart Water..."));

  USB.print(F("Nivel de Bateria: "));
  USB.print(PWR.getBatteryLevel(), DEC);

```

```

USB.println(F(" %"));
prueba = 2.35;

// Configure the calibration values
DOSensor.setCalibrationPoints(air_calibration, zero_calibration);

// Configure the calibration parameters
ConductivitySensor.setCalibrationPoints(point1_cond,    point1_cal,    point2_cond,
point2_cal);
pHSensor.setCalibrationPoints(cal_point_10, cal_point_7, cal_point_4, cal_temp);

////////////////////////////////////
// 1. Turn ON the Smart Water sensor board
////////////////////////////////////
Water.ON();

LoRaWAN.ON(SOCKET0);
LoRaWAN.setDeviceEUI(DEVICE_EUI);
LoRaWAN.setAppEUI(APP_EUI);
LoRaWAN.setAppKey(APP_KEY);
LoRaWAN.joinOTAA();
LoRaWAN.saveConfig();

// Inicializa el objeto frame
frame.setID(moteID);
}

void loop()
{

    Water.ON();

    LoRaWAN.ON(SOCKET0);
    LoRaWAN.setDeviceEUI(DEVICE_EUI);
    LoRaWAN.setAppEUI(APP_EUI);
    LoRaWAN.setAppKey(APP_KEY);
    LoRaWAN.joinOTAA();
    LoRaWAN.saveConfig();

    // Inicializa el objeto frame
    frame.setID(moteID);
    //////////////////////////////////
    // 2. read the sensors
    //////////////////////////////////
    // Reading of the ORP sensor
    DOVol = DOSensor.readDO();
    // Conversion from volts into dissolved oxygen percentage
    DOValue = DOSensor.DOConversion(DOVol);
    // Reading of the Conductivity sensor

```

```

ECRes = ConductivitySensor.readConductivity();
// Conversion from resistance into us/cm
ECValue = ConductivitySensor.conductivityConversion(ECRes);

// Read the ph sensor (voltage value)
pHVol = pHSensor.readpH();
// Read the temperature sensor
temp = temperatureSensor.readTemperature();
// Convert the value read with the information obtained in calibration
pHValue = pHSensor.pHConversion(pHVol, temp);

// Reading of the ORP sensor
ORPValue = ORPSensor.readORP();
// Apply the calibration offset
ORPValue = ORPValue - calibration_offset;
////////////////////////////////////
// 3. Print the output values
////////////////////////////////////

// Print of the results
USB.print(F("Conductivity Output Resistance: "));
USB.print(ECRes);

// Print of the results
USB.print(F(" Conductivity of the solution (uS/cm): "));
USB.println(ECValue);

frame.createFrame(ASCII);
frame.addSensor(SENSOR_BAT, PWR.getBatteryLevel());
//frame.addSensor(SENSOR_WATER_COND, ECRes);
//frame.addSensor(SENSOR_WATER_COND, ECValue);
frame.addSensor(SENSOR_WATER_PH, pHVol);
frame.addSensor(SENSOR_WATER_PH, temp);
frame.addSensor(SENSOR_WATER_PH, pHValue);
frame.addSensor(SENSOR_WATER_ORP, ORPValue);
frame.addSensor(SENSOR_WATER_WT, temp);
frame.addSensor(SENSOR_WATER_DO, DOVol);
frame.addSensor(SENSOR_WATER_DO, DOValue);

LoRaWAN.sendUnconfirmed(PORT, frame.buffer, frame.length);
frame.showFrame();

PWR.deepSleep("00:12:00:00",RTC_OFFSET,RTC_ALM1_MODE2,ALL_OFF);
ALL_ON;
USB.ON();
}

```

6.8 Anexo librerías Wasmote

- Librería WaspSensorSW.h: permite inicializar sondas, tomar lectura de los mismas, configurar parámetros de medición de las sondas y controlar cuándo la sonda se encuentra habilitada o no para ahorrar en consumo energético.
- Librería WaspLoRaWAN.h: permite inicializar y configurar el módulo LoRaWAN del dispositivo Wasmote, para que éste pueda conectarse con la estación base además del envío y recepción de datos a través de la red LoraWAN.
- Librería WaspFrame.h: permite la creación de tramas de datos a enviar a través de LoRaWAN, permitiendo añadir datos a estas tramas y elegir el formato y orden de las mismas.

6.9 Anexo adición de dispositivo en estación base

Los dispositivos de Clase A, como el que está en estudio en este trabajo se identifican con la estación base a través de 3 parámetros:

- DevEUI: Es un identificador único para cada dispositivo, normalmente viene definido desde fábrica, aunque en ocasiones se puede cambiar.
- AppEUI: Se trata de un identificador utilizado para clasificar los nodos en función de la aplicación que va a interactuar con ellos.
- AppKey: Clave de 128 bits que comparten el nodo y la estación base.

El DevEUI se asemejaría a la dirección MAC del dispositivo, el AppEUI sería el puerto por el cual se establece la comunicación y el AppKEY sería una llave pública para la comunicación.

Para la adición de un dispositivo a la estación base deberemos de completar los siguientes campos en la misma:

ADD END-DEVICE KEY

Dev EUI

0000000000

App EUI

App Key

Class

A

Device Profile

LW102-OTA-EU868

Network Profile

DEFAULT-CLASS-A

OK

Cancel

Figura 6.1 Adición de nodo a la estación

Seleccionando la frecuencia que se usará, en este caso será 868 MHz y el tipo de dispositivo a agregar, de clase A, B o C, en este caso es de clase A.

6.10 Anexo toolbox MATLAB

En la toolbox de MATLAB se han implementado una serie de funciones destinadas a realizar cálculos teóricos que sirven como soporte para las simulaciones, así como para comparar los resultados teóricos obtenidos. La descripción y propósito de cada función desarrollada en MATLAB están documentados en el archivo contents:

```
% ToolPropLoRa - Esta toolbox incluye funciones para cálculos de potencia
% recibida y perdidas en propagacion radioelectrica
%
% Funciones:
% Ate_Tierra_Plana - Calcula la potencia recibida a una determinada distancia
% de la estacion base usando el modelo de tierra plana
% Ate_Cost231 - Calcula la potencia recibida a una determinada distancia
% de la estacion base usando el modelo COST231
% Potencia_Lee - Calcula la potencia recibida a una determinada distancia de
% la estacion base usando el modelo de Lee
% Ate_Arista - Calcula la perdida de potencia ocasionada por un obstáculo en el
% vano de la transmision, es decir, entre la estacion base y el receptor,
% devuelve el valor en dB
% Ate_Curvatura - Calcula las perdidas en dB ocasionadas por la no vision
% directa de la estacion base y el receptor debido a la curvatura de la Tierra
% Ate_Curvatura2 - Calcula las perdidas en dB ocasionadas por la
% curvatura de la Tierra para cualquier distancia, sin tener en cuenta si
% existe vision directa o no
% Ate_Espacio_libre - Calcula las perdidas en dB utilizando el modelo de
% espacio libre
% Ate_Reflexion_esferica - Calcula las perdidas debido a la reflexion
% esferica producida en la transmisión
% dBm2dBu - Calcula el nivel de campo eléctrico en dBu

% Versión 3.0 02-Octubre-2024 Autor: Antonio Jesús Quesada Salas
```

6.10.1 Función Ate_Tierra_Plana

```
function [L_T_Plana, Coeficiente_Reflexion] =
Ate_Tierra_plana(f,d,htx,hrx,epsr,sigma,fi)
%Ate_Reflexion obtiene la atenuacion de potencia en dB debido a una
%reflexion del rayo en el suelo dependiendo de las características de este
%asi como el coeficiente de reflexion del mismo
%
% Uso:
%
% [L_T_Plana, Coeficiente_Reflexion] =
Ate_Reflexion(f,d,htx,hrx,epsr,sigma,fi);
% Argumentos de entrada:
%
% f: frecuencia en MHz
% d: distancia entre antenas en kilometros
% htx: altura antena transmisora en metros
% hrh: altura antena receptora en metros
% epsr: caracteristica electrica del suelo
% sigma: caracteristica electrica del suelo
```

```

%   fi: angulo entre el suelo y el rayo reflejado en grados
%
% Argumentos de salida:
%
% L_Reflexion: es la potencia que se pierde debido a reflexion en el
% terreno dependiendo de este en dB
% Coeficiente_Reflexion: calculo del coeficiente de reflexion dependiendo
% del tipo de terreno
% See also: Ate_Cost231, Potencia_Tierra_Plana
%
%Ejemplo de uso:
%L_T_Plana, Coeficiente_Reflexion] =
Ate_Tierra_plana(868,2.61,12,1.5,30,0.01,28.9344)
%
%L_T_Plana =
%
%    12.2987
%
%
%Coeficiente_Reflexion =
%
% -17.9774 + 0.0013i

```

6.10.2 Función Ate_Cost231

```

function [L_Cost231] = Ate_Cost231(f,d,w,b,fi,hm,Ahr,Ahb,ciudad)
%Ate_Cost231 obtiene la atenuacion en dB a una distancia determinada de
%la estacion base utilizando el modelo de propagacion COST231
%
% Uso:
%
%     L_Cost231 = Ate_Cost231(f,d,w,b,fi,hm,Ahr,Ahb,ciudad);
% Argumentos de entrada:
%
%   f: frecuencia en MHz
%   d: distancia en metros
%   w: anchura de la calle en metros
%   b: separacion entre edificios en metros
%   fi: angulo en grados entre el rayo y el eje de la calle
%   ht: altura de la antena transmisora en metros
%   hm: altura de la antena receptora en metros
%   Ahb: diferencia entre la altura de la estacion base y los edificios
%   limitrofes en metros
%   Ahr: diferencia entre la altura de la estacion movil y los edificios
%   limitrofes en metros
%   ciudad: 1 para ciudad grande 2 para ciudad mediana
%
% Argumentos de salida:
%
% L_Cost231: es la potencia que se tendria usando el modelo COST231
% See also: Ate_Lee, Ate_Tierra_Plana
% Ejemplo de uso:
% L_Cost231 = Ate_Cost231(868,2610,7,2,90,1.5,-10,0.35,2)
%
%L_Cost231 =
%
%    112.1864

```

6.10.3 Función Potencia_Lee

```
function [Potencia_Lee] = Potencia_Lee(ht, pt, gt, hm, f,d, ciudad)
%Potencia_Lee obtiene la potencia recibida en dBm a una distancia determinada de
%la estacion base utilizando el modelo de propagacion de LEE para medios
%suburbanos y urbanos en 3 modelos de ciudad diferente
%
% Uso:
%
%     [Potencia_Lee] = Potencia_Lee(ht, pt, gt, hm, f,d);
% Argumentos de entrada:
%
%     f: frecuencia en MHz
%     d: distancia en kilometros
%     ht: altura de la antena transmisora en metros
%     hm: altura de la antena receptora en metros
%     pt: potencia de transmision en dBm
%     gt: ganancia de antena transmisora en dBi
%     ciudad: 1 suburbano, 2 urbano tipo Filadelfia, 3 urbano tipo Newark y 4
%             urbano tipo Tokio
%
% Argumentos de salida:
%
% Potencia_Lee: es la potencia en dBm teorica calculada usando el modelo
% de Lee para el medio elegido
% See also: Ate_Cost231, Potencia_Tierra_Plana
%
%Ejemplo de uso:
%Potencia_LEE = Potencia_Lee(12, 6, 3, 1.5, 868,2610, 4)
%
%Potencia_LEE =
%
% -104.6354
```

6.10.4 Función Ate_Arista

```
function [L_Arista] = Ate_Arista(hp, d1, d2,c,f)
%Ate_Arista obtiene la perdida de potencia en dB debido a un obstaculo
%de tipo arista de filo de cuchillo en el vano de la transmision de acuerdo a la
%recomendacion Rec. UIT-R P.526-15 (octubre de 2019). Utiliza una funcion
%que determina la integral de Fresnel compleja con argumento el parametro
%de difraccion de Kirchhoff.
%
% Uso:
%
%     L_Arista = Ate_Arista(hp, d1, d2, c, f);
% Argumentos de entrada:
%
%     hp: altura de ocultamiento del objeto frente al rayo directo
%     d1: distancia entre el transmisor y el obstaculo en metros
%     d2: distancia entre el receptor y el obstaculo en metros
%     c: velocidad de la luz
%     f: frecuencia en MHz
%
% Argumentos de salida:
```

```

%
% Ate_arista: es la potencia que se pierde debido a obstaculo de tipo
% arista de cuchillo en dB.
% See also: Ate_Reflexion, Ate_Curvatura
%
%Ejemplo de uso:
%L_arista = Ate_Arista(hp, d1, d2, c, f)
%
%L_arista =
%    6.0206

```

6.10.5 Función Ate_Espacio_libre

```

function [Ate_espacio_libre] = Ate_Espacio_libre(f,d)
%Espacio_libre obtiene la atenuacion en dB haciendo uno del modelo de
%espacio libre.
%
% Uso:
%
% Ate_Espacio_libre = Ate_Espacio_libre(f,d);
% Argumentos de entrada:
%
%   f: frecuencia en MHz
%   d: distancia en metros
%
% Argumentos de salida:
%
% Ate_espacio_libre: es la atenuacion de potencia que se tendria utilizando
% el modelo de espacio libre
%
%Ejemplo de uso:
%Ate_Espacio_libre = Ate_Espacio_libre(868,2610)
%
%Ate_Espacio_libre =
%
%    99.5450

```

6.10.6 Función Ate_Curvatura

```

function [L_Curvatura] = Ate_Curvatura( f, htx, hrx,RT, d, sigma,k,eps,
polarizacion)
%Ate_Curvatura obtiene la perdida de potencia en dB debido a la
%curvatura de la tierra para distancias en las que el receptor se encuentra
%más allá del horizonte radioeléctrico de acuerdo a la recomendacion
%Rec. UIT-R P.526-15 (octubre de 2019), utiliza la funcion calcular_G_y que
%calcula la ganancia debido a la altura de las antenas.
%
% Uso:
%
%   L_Curvatura = Ate_Curvatura(f, htx, hrx,RT, d, sigma,k,eps,polarizacion);
% Argumentos de entrada:
%
%
%   f: frecuencia en MHz
%   d: distancia entre antenas en kilometros
%   htx: altura antena transmisora en metros

```

```

%   hrx: altura antena receptora en metros
%   RT: radio de la tierra en kilometros
%   sigma: caracteristica electrica del suelo
%   d: distancia total entre antenas en kilometros
%   k: valor atmosfera refractiva normalmente 4/3
%   eps: permitividad relativa efectiva
%   polarizacion: 1 para polarizacion horizontal y 2 para vertical
%
% Argumentos de salida:
%   L_Curvatura: Perdida de potencia en dB debido a la curvatura de la
%   Tierra
% See also: Ate_Reflexion, Ate_Arista
% Ejemplo de uso:
% L_Curvatura = Ate_Curvatura(868, 12, 1.5,6370, 2.61, 10^-2,4/3,15,2)
% Hay línea de visión directa
%
% L_Curvatura =
%
% -12.9915

```

6.10.7 Función Ate_Curvatura2

```

function [L_Curvatura2] = Ate_Curvatura2(f, htx, hrx,RT, d, sigma,k,eps,
polarizacion)
%Ate_Curvatura2 obtiene la perdida de potencia en dB debido a la
%curvatura de la tierra para cualquier distancia y frecuencias de 10 MHz y
%superioresde acuerdo a la recomendacion Rec. UIT-R P.526-15 (octubre de
%2019), utiliza la funcion calcular_G_y que calcula la ganancia debido a la
%altura de las antenas.
%
% Uso:
%
%   L_Curvatura2 = Ate_Curvatura2(f, htx, hrx,RT, d, sigma,k,eps,polarizacion);
% Argumentos de entrada:
%
%   f: frecuencia en MHz
%   d: distancia entre antenas en metros
%   htx: altura antena transmisora en metros
%   hrx: altura antena receptora en metros
%   RT: radio de la tierra en kilometros
%   sigma: caracteristica electrica del suelo
%   d: distancia total entre antenas en kilometros
%   k: valor atmosfera refractiva normalmente 4/3
%   eps: permitividad relativa efectiva
%   polarizacion: 1 para polarizacion horizontal y 2 para vertical
%
% Argumentos de salida:
%   L_Curvatura2: Perdida de potencia en dB debido a la curvatura de la
%   Tierra
% See also: Ate_Reflexion, Ate_Curvatura
% Ejemplo de uso:
%L_Curvatura2 = Ate_Curvatura2(868, 12, 1.5,6370, 2610, 10^-2,4/3,15,2)
%Las pérdidas por difracción son cero
%
%L_Curvatura2 =
%
% -0.0019

```

6.10.8 Función dBm2dBu

```
function [dBu] = dBm2dBu(f,prx, grx)
%dbm2dBu obtiene el valor del campo electrico en dB?V/m
%
% Uso:
%
% dBu = dBm2dBu(f,prx, grx)
% Argumentos de entrada:
%
%   f: frecuencia en MHz
%   prx: potencia en recepcion en dBm
%   grx: ganancia en recepcion en dBm
%
% Argumentos de salida:
%
% dBu: valor del campo eléctrico en dB?V/m
%
%Ejemplo de uso:
%campo = dBm2dBu(868, -100, 2)
%
%campo =
%
% -176.0166
```

6.10.9 Script ejemplo de uso Toolbox

Se incluye una serie de ejemplos de uso de algunas de las funciones de la Toolbox implementada.

6.10.9.1 Ejemplo de uso de la función Ate_Espacio_libre

Se muestra como se podría hacer uso de la función que calcula las pérdidas usando el modelo de Espacio libre, además se usa la función dBm2dBu, que pasa la potencia estimada de dBm a dBu.

```
% Definición de parámetros

clear all;
clc;
f = 868; % Frecuencia en MHz
d = [72, 95, 98, 100, 102, 105, 110, 360, 420, 490, 510, 550, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1900, 2610, 3000]; % Distancias en metros
PIRE = 9; % PIRE en dBm
grx = 2; % Ganancia del receptor en dBi

% Vector para almacenar las pérdidas por espacio libre
Ate_espacio_Libre = zeros(1, length(d));

% Cálculo de las pérdidas por espacio libre
for i = 1:length(d)
```

```

    Ate_espacio_Libre(i) = Ate_Espacio_libre(f, d(i));
end

% Mostrar los resultados de las pérdidas
disp('Pérdidas por espacio libre en cada distancia:');
disp(Ate_espacio_Libre);

% Vector para almacenar las potencias recibidas
Potencia = zeros(1, length(Ate_espacio_Libre));
campo = zeros(1, length(Ate_espacio_Libre)); % Para los valores de campo
eléctrico

% Calcular la potencia recibida en cada distancia
for i = 1:length(Ate_espacio_Libre)
    Potencia(i) = PIRE + grx - Ate_espacio_Libre(i);
end

% Calcular el valor de campo eléctrico en cada distancia
for i = 1:length(Ate_espacio_Libre)
    campo(i) = dBm2dBu(f, Potencia(i), grx);
end

% Mostrar resultados
disp('Potencias recibidas en cada distancia:');
disp(Potencia);
disp('Campo eléctrico en cada distancia:');
disp(campo);

```

6.10.9.2 Script ejemplo de uso de la función Ate_Tierra_Plana

Se muestra como se podría hacer uso de la función que calcula las pérdidas usando el modelo de Tierra plana, además se usa la función dBm2dBu, que pasa la potencia estimada de dBm a dBu.

```

%% Uso funcion Ate_Tierra_plana

clear all; clc;

f= 868;
pt = 6;           % Potencia de transmisión en dBm
gt = 3;           % Ganancia de la antena en transmisión en dBi
gr = 2;
htx = 12;
hrx = 1.5;
epsr = 30;
sigma = 10^-2;
fi = 28.93437;
Pr = zeros(1, 20);
Pt = 10^(pt/10)*(1*10^-3); %Potencia transmitida
Gr = 10^(gr/10); %Ganancia en recepcion
Gt = 10^(gt/10); %Ganancia en transmision
d = [72, 95, 98, 100, 102, 105, 110, 360, 420, 490, 510, 550, 700, 800, 900,
1000, 1200, 1900, 2610, 3000];
Ate_Tierra_Plana = zeros(1,length(d));
grx = gr;
c= 3*10^8;

```

```

Lb0 = zeros(1, length(Ate_Tierra_Plana));
for i = 1:length(Lb0)
    Lb0(i) = ((4*pi*d(i))/(c/(f*10^6)))^2;
end
for i = 1:length(d)
    Ate_Tierra_Plana(i) = Ate_Tierra_plana(f,d(i),htx,hrx,epsr,sigma,fi); %
    Llamada a la función
    Ate_Tierra_Plana(i) = 10^(Ate_Tierra_Plana(i)/10);
end
for i=1:length(d)

Pr(i) = (Pt*Gt*Gr*(1/Ate_Tierra_Plana(i))*(1/Lb0(i)));
end
Potencia_Tierra_Plana = zeros(1,length(d));
Potencia_Tierra_Plana = 10*log10(Pr/(1*10^-3)); %Cobertura en el receptor

% Calcular el valor de campo eléctrico en cada distancia
for i = 1:length(Potencia_Tierra_Plana)
    campo(i) = dBm2dBu(f,Potencia_Tierra_Plana(i),grx);
end

```

6.10.9.3 Script ejemplo de uso de la función Ate_COST231

Se muestra como se podría hacer uso de la función que calcula las pérdidas usando el modelo COST231, además se usa la función dBm2dBu, que pasa la potencia estimada de dBm a dBu.

```

%% Uso funcion Ate_Cost231

clear all; clc;

f = 868;
w = 7;
b = 2;
fi = 90;
ht = 12;
hm = 1.5;
pt = 6;
gt = 3;
Ahr = -10;
Ahb = 0.35;
gr = 2;
grx = gr;
ciudad = 2;
PIRE = pt + gt;
d = [72, 95, 98, 100, 102, 105, 110, 360, 420, 490, 510, 550, 700, 800, 900,
1000, 1200, 1900, 2610, 3000];
Ate_COST231 = zeros(1, length(d));
for i = 1:length(d)

```

```

    Ate_COST231(i) = Ate_Cost231(f,d(i),w,b,fi,hm,Ahr,Ahb,ciudad); % Llamada a
la función
end

% Mostrar los resultados
disp('Pérdidas modelo COST231 en funcion de cada distancia:');
disp(Ate_COST231);
Potencia = zeros(1, length(Ate_COST231));

% Calcular la potencia recibida en cada distancia
for i = 1:length(Ate_COST231)
    Potencia(i) = PIRE + gr - Ate_COST231(i);
end

% Calcular el valor de campo eléctrico en cada distancia
for i = 1:length(Potencia)
    campo(i) = dBm2dBu(f,Potencia(i),grx);
end

```

6.10.9.4 Script ejemplo de uso de la función Ate_Reflexion_esferica

Se muestra como se podría hacer uso de la función que calcula las pérdidas usando el modelo de Reflexión esférica, además se usa la función dBm2dBu, que pasa la potencia estimada de dBm a dBu.

```

%% Uso funcion Ate_Reflexion_esferica

clear all; clc;

f= 868;
pt = 6;          % Potencia de transmisión en dBm
gt = 3;          % Ganancia de la antena en transmisión en dBi
gr = 2;
htx = 12;
hrx = 1.5;
epsr = 30;
sigma = 10^-2;
k = 4/3;
Pr = zeros(1, 20);
Pt = (10^(pt/10))*(1*10^-3); %Potencia transmitida
Gr = 10^(gr/10); %Ganancia en recepcion
grx=2;
c = 3*10^8;
Gt = 10^(gt/10); %Ganancia en transmision
d = [72, 95, 98, 100, 102, 105, 110, 360, 420, 490, 510, 550, 700, 800, 900,
1000, 1200, 1900, 2610, 3000];
Ate_Reflexion_Esferica = zeros(1,length(d));

```

```

for i = 1:length(d)
    Ate_Reflexion_Esferica(i)
=Ate_Reflexion_esferica(f,d(i),htx,hxr,epsr,sigma,k); % Llamada a la función

    Ate_Reflexion_Esferica(i) = 10^(Ate_Reflexion_Esferica(i)/10);
end
Lb0 = zeros(1, length(Ate_Reflexion_Esferica));
for i = 1:length(Lb0)
    Lb0(i) = ((4*pi*d(i))/(c/(f*10^6)))^2;
end
for i=1:length(d)

Pr(i) = (Pt*Gt*Gr*(1/Ate_Reflexion_Esferica(i))*(1/Lb0(i)));
end
Potencia_Tierra_esferica = zeros(1,length(d));
Potencia_Tierra_esferica = 10*log10(Pr/(1*10^-3)); %Cobertura en el receptor
% Calcular el valor de campo eléctrico en cada distancia
for i = 1:length(Potencia_Tierra_esferica)
    campo(i) = dBm2dBu(f,Potencia_Tierra_esferica(i),grx);
end

```

6.10.9.5 Script ejemplo de uso de la función Potencia_Lee

Se muestra como se podría hacer uso de la función que calcula la potencia teórica usando el modelo de Lee, además se utiliza la función dBm2dBu que pasa la potencia estimada de dBm a dBu.

```

%% Uso funcion Potencia_Lee

clear all; clc;

f = 868;
d = 2.61;
ht = 12;
hm = 1.5;
pt = 6;
gt = 3;
grx = 2;

d = [72, 95, 98, 100, 102, 105, 110, 360, 420, 490, 510, 550, 700, 800, 900,
1000, 1200, 1900, 2610, 3000];
Potencia_LEE = zeros(1, length(d));
ciudad = 4;
for i = 1:length(d)
    Potencia_LEE(i) = Potencia_Lee(ht, pt, gt, hm, f,d(i), ciudad); % Llamada
a la función
end
% Calcular el valor de campo eléctrico en cada distancia

```

```

for i = 1:length(Potencia_LEE)
    campo(i) = dBm2dBu(f,Potencia_LEE(i),grx);
end

```

6.10.9.6 Script ejemplo de uso de la función Ate_curvatura

Se muestra como se podría hacer uso de la función Ate_curvatura que calcula las pérdidas ocasionadas por la no visión directa entre antena transmisora y receptora debido a la curvatura de la Tierra cuando la distancia es superior al horizonte radioeléctrico.

```

%% Uso funcion Ate_Curvatura

clear all; clc;

c = 3*10^8;
f = 868;
htx = 12;
hrx = 1.5;
RT = 6370;
d = 2.61;
sigma = 10^-2;
k = 4/3;
eps = 15;
polarizacion = 2;

[L_Curvatura] = Ate_Curvatura(c, f, htx, hrx,RT, d, sigma,k,eps,polarizacion)

```

6.10.9.7 Script ejemplo de uso de la función Ate_curvatura2

Se muestra como se podría hacer uso de la función Ate_curvatura2 que calcula las pérdidas ocasionadas por la no visión directa entre antena transmisora y receptora debido a la curvatura de la Tierra a cualquier distancia y frecuencias superiores a 10 MHz.

```

%% Uso funcion Ate_Curvatura2

clear all; clc;

f = 868;
htx = 12;
hrx = 1.5;
RT = 6370;
sigma = 10^-2;
k = 4/3;
eps = 15;
polarizacion = 2;

d = [360, 420, 550, 105, 510, 490, 72, 110, 100, 102, 95, 98, 2610, 700, 800,
900, 1000, 1200, 1900, 3000];
Ate_curvatura = zeros(1, length(d));

for i = 1:length(d)

```

```
Ate_curvatura(i) = Ate_Curvatura2( f, htx, hrx,RT, d(i),  
sigma,k,eps,polarizacion); % Llamada a la función  
end
```

6.10.9.8 Script ejemplo de uso de la función Ate_arista

Se muestra como se podría hacer uso de la función Ate_arista que calcula las pérdidas ocasionadas por una arista de tipo filo de cuchillo en el vano de la transmisión.

```
%% Uso funcion Ate_Arista  
  
hp = 7;  
d1 = 800;  
d = 400;  
f = 868;  
  
L_arista = Ate_Arista(hp, d1, d, f);
```


7 Bibliografía

1. MUPPALA, R., NAVNIT, A., POONDLA, S. y HUSSAIN, A.M. Investigation of indoor lorawan signal propagation for real-world applications. En: 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), 2021, pp. 1-5. DOI 10.1109/i2ct51068.2021.9418173.
2. MOYA QUIMBITA, M.A., 2018. Evaluación de pasarela LORA/LORAWAN en entornos urbanos [en línea]. Trabajo fin de master. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/109791>.
3. FELTRIN, L., et al. Lorawan: Evaluation of link- and system-level performance. IEEE Internet of Things Journal, 2018, vol. 5, no. 3, pp. 2249-2258. DOI 10.1109/jiot.2018.2828867.
4. ROLDÁN REVUELTA, A., 2023. Monitorización de la calidad del agua: estudio, Monitorización de la calidad del agua: estudio, calibración y validación del dispositivo Smart Water a bordo de un ASV [en línea]. Trabajo fin de master. Universidad de Sevilla. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/72551/fichero/TFM2551+Rold%C3%A1n+Revuelta.pdf>.
5. SEMTECH CORPORATION, 2019. LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview,. [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf
6. FABER, M.J. et al. A theoretical and experimental evaluation on the performance of Lora Technology. IEEE Sensors Journal, 2020, vol. 20, no. 16, pp. 9480-9489. DOI 10.1109/jsen.2020.2987776.
7. SILVA, E.F. et al. Adaptive parameters for LORA-Based networks Physical-Layer. IEEE Sensors Journal, 2023 vol. 23, no. 10, DOI 10.3390/s23104597.
8. GILSON, R., and Grudsky, M, 2017. LoRaWAN CAPACITY TRIAL IN DENSE URBAN ENVIRONMENT. [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: https://info.semtech.com/hubfs/machineQ_LoRaWAN_Capacity_Trial-2.pdf
9. XIRIO ONLINE, [sin fecha] [en línea]. Disponible en: <https://www.xirio-online.com/web/home/welcome.aspx>.
10. EDX SIGNAL PRO, [sin fecha] [en línea]. Disponible en: <https://edx.com/signal-pro/>.
11. RADIO MOBILE, [en línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6989/anexos/Anexo%2016.pdf>.
12. EVERYTHING RF, [en línea]. Disponible en: <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/free-space-path-loss-calculator>.
13. EVERYTHING RF, [en línea]. Disponible en: <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/friis-transmission-calculator>.

14. CASTILLO, J, 2018. Modelo OSI [en línea] [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://www.profesionalreview.com/2018/11/22/modelo-osi/>.
15. Multitech. [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://multitech.com/all-products/cellular/cellular-gateways/conduit-ip67-200-series/>.
16. Multitech Conduit 200 series [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://www.digikey.es/es/products/detail/multi-tech-systems-inc/MTCDTIP2-L4E1-B11EKP-L1M/13967657>
17. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias. BOE, 2020. [en línea] [Consulta: 13 julio 2024]. S.l.: ETD/666/202. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2020/07/21/pdfs/BOE-A-2020-8286.pdf>.
18. HERNANDO RÁBANOS, J.M., MENDO TOMÁS, L. y RIERA SALÍS, J.M., Comunicaciones Móviles. 3ª Ed. Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2015.
19. Propagación en espacio libre [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Propagaci%C3%B3n_por_espacio_libre#/media/Archivo:MP EL.png.
20. Modelo de propagación tierra plana [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-32-Propagacion-sobre-Tierra-plana_fig1_266328555.
21. Libelium. [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://www.libelium.com/es/productos-iot/waspmote/>.
22. Referencias PH [en línea], [sin fecha] [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://www.significados.com/ph/>.
23. Sensor PH. [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://development.libelium.com/sw-01-ph-sensor>.
24. Libelium Plug & Sense. [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://development.libelium.com/plug-and-sense-technical-guide/sensor-probes>.
25. Sensor ORP. [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://development.libelium.com/sw-02-orp-sensor>.
26. Referencias valores REDOX [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://somosaguadevida.com/beneficios/>.
27. Libelium. [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://development.libelium.com/sw-04-dissolved-oxygen>.
- 28.. Referencias oxígeno disuelto [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://www.hannabolivia.com/blog/post/492/todo-sobre-el-oxigeno-disuelto-od>.
29. Libelium [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://development.libelium.com/sw-05-conductivity-sensor>.
30. Referencias conductividad [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/conductividad-electrica-224738940/224738940>.

31. Libelium [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://development.libelium.com/sw-06-temperature-sensor>.
32. Libelium [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://development.libelium.com/sw-07-turbidity-sensor>.
33. Adeunis [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://www.adeunis.com/en/produit/ftd-network-tester/>.
34. KÜHNEL, C. Develop and operate your LoRaWAN IoT nodes: Ready-to-use devices and self-built Arduino nodes in the “The things network”. NL: Elektor, 2022.
35. Mobilefish.com. LoRa/LoRaWAN Tutorial 12: LoRa/LoRaWAN: Modulation Types and Chirp Spread Spectrum. YouTube [en línea], Actualizado 2 octubre 2018. [Consulta: 16 junio 2024]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=lg0eZWZFKiE>
36. QIN, J et al. Industrial Internet of Learning (IIoL): IIoT based pervasive knowledge network for LPWAN—concept, framework and case studies, in CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction, 2020 DOI 10.1007/s42486-020-00050-2.
37. Fresnel Zone Boundary Calculator. [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <http://www.gbppr.net/cgi-bin/fresnel.main.cgi>.
38. Knife Edge Diffraction Loss Calculator [en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <http://www.gbppr.net/cgi-bin/knife.main.cgi>.
39. Antenna Tilt Calculator Results[en línea], [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <http://www.gbppr.net/cgi-bin/tilt.cgi>.
40. MULTITECH, LORA Alliance - MultiTech. MultiTech, 2023 [en línea] [Consulta: 13 julio 2024]. Disponible en: <https://multitech.com/iot-wiki/lora-alliance/>.
41. PROAKIS, J.G. y SALEHI, M., Communication Systems Engineering. 1ª Ed. NJ: Prentice-Hall International, Inc., 1994.
42. SEMTECH CORPORATION, LoRa and LoRaWAN, AN1200.86 . Ver. 1.0 [En línea], marzo 2024 [Consulta: 16 junio 2024]. Disponible en: <https://www.semtech.com/lora/lorawan-standard>
43. RAMOS PASCUAL, F., Radiocomunicaciones. 2ª Ed. NJ, Barcelona: Marcombo S.A., 2015.
44. SKLAR, B., Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2ª Ed. NJ: Prentice-Hall PTR, 2001.
45. MARTÍNEZ MUÑOZ, D. et al., Transmisión Digital. 1ª Ed. Jaén: Universidad de Jaén, Servicio de Publicaciones, 2010.
46. AUGUSTIN, A., YI, J., CLAUSEN, T. y TOWNSLEY, W. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. Sensors, 2016, vol. 16, no. 9, pp. 1-18. DOI 10.3390/s16091466.

47. RECOMENDACIÓN.P.526, UIT,R, [en línea], octubre 2019 [Consulta: 2 agosto 2024]. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-11-200910-S!!PDF-S.pdf

48. HERNANDO RÁBANOS, J.M., Transmisión por radio. Ed. Universitaria Ramón Areces, 2003.