

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA**

**Y MECÁNICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN DE  
UNA RED LORAWAN EN PRESENCIA DE INTERFERENCIA  
ELECTROMAGNÉTICA SOBRE LA BANDA DE 900 MHZ**

**PRESENTADO POR:**

**BR. GABRIEL ANTONIO CRUZ YUPANQUI**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRONICO**

**ASESOR:**

**MSc. JORGE LUIS ARIZACA CUSICUNA**

**CUSCO – PERÚ**

**2023**

## INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, asesor del trabajo de investigación titulado **“EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN DE UNA RED LORAWAN EN PRESENCIA DE INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA SOBRE LA BANDA DE 900 MHZ”**, presentado por el bachiller CRUZ YUPANQUI GABRIEL ANTONIO, con código número 73671019 para optar al Título Profesional de Ingeniero Electrónico.

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por tres veces, mediante el software antiplagio, conforme al Artículo 6° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 9%

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación, tesis, textos, libros, revistas, artículos científicos, material de enseñanza y otros (Art. 7, inc 2 y 3)

Porcentaje	Evaluación y acciones.	Marque con X
Del 1 al 10 %	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayores a 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 04 de enero del 2023

  
-----  
Jorge Luis Arizaca Cusicuna  
DNI: 42348906  
<https://orcid.org/0000-0003-2658-5492>

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio:  
<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:301946109?locale=es-MX>

NOMBRE DEL TRABAJO

**tesis final gabriel antonio cruz yupanqui l  
evantamiento.pdf**

AUTOR

**Gabriel Cruz Yupanqui**

RECUENTO DE PALABRAS

**18874 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**102442 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**131 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**7.3MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jan 4, 2024 9:43 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jan 4, 2024 9:45 PM GMT-5****● 9% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base c

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossr

**● Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 11 palabras)
- Material citado

## **AGRADECIMIENTO**

*Expresar mis más sinceros agradecimientos a mis padres Antonio Cruz Huamán, Celedonia Yupanqui Loaiza y mi querido hermano Luis Alberto Cruz Yupanqui, por haberme acompañado, comprendido y alentado durante mi formación personal y profesional.*

*También agradecer a mi asesor M.SC. Jorge Luis Arizaca Cusicuna, por haberme brindado su tiempo y apoyo incondicional durante todo el desarrollo de la tesis, a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, por la enseñanza y valores adquiridos durante el transcurso de mis estudios.*

*Finalmente agradecer al Laboratorio de Investigación e Innovación en Sistemas de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información-UNSAAC, por haberme brindado espacio de sus instalaciones y equipos para el desarrollo de la tesis.*

*En memoria de mi querida mascota “Bichito”.*

## Resumen

El crecimiento y coexistencia de redes inalámbricas sobre una misma fracción de espectro radioeléctrico trae consigo problemas de interferencia, lo que impulsa a usar tecnologías de comunicación inalámbricas capaces de hacer frente a las alteraciones o perturbaciones en los enlaces de telecomunicación. En la presente tesis, se desarrolla un conjunto de pruebas experimentales con una red de LoRaWAN, con el objetivo de evaluar el comportamiento de sus parámetros de transmisión frente a interferencia electromagnética y su efecto en ellas.

Para ello, primero se eligió la tecnología que conformó la red de LoRaWAN, cuyos elementos que acceden la red fueron los siguientes, nodo TTGO-T BEAM V0.7, puerta de enlace WISGATE EDGE PRO (Rak7289), servidor de red privado LoRaWAN SERVER. Posteriormente, se implementó la red de LoRaWAN, conformada por nodos y una puerta de enlace, ubicadas en puntos estratégicos que pudieran ayudar al desarrollo de la tesis. Seguidamente, se desarrollaron pruebas experimentales con la red de LoRaWAN implementada, exponiéndolas a diferentes niveles y tipos de interferencia a través de un generador de radio frecuencia, para que de esta manera se pueda evaluar los parámetros de transmisión de la red y su comportamiento frente a interferencia.

Finalmente, concluidas las pruebas experimentales, se filtraron y validaron los datos para su análisis. En conclusión, la red de LoRaWAN implementada cuyos principales parámetros de transmisión se vieron afectados en mayor o menor medida, según el nivel y tipo de interferencia a la que estuvieron expuestos, dando como resultado que la red de LoRaWAN implementada ofrece una alta robustez a interferencia debido a su esquema de modulación y sus parámetros de transmisión.

### **PALABRAS CLAVE:**

Interferencia, LoRaWAN, SNR, RSSI.

## *Índice*

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Índice</b> .....	2
<b>Lista de figuras</b> .....	5
<b>Lista de tablas</b> .....	7
<b>CAPÍTULO I</b> .....	9
<b>ASPECTOS GENERALES</b> .....	9
<b>1.1. Planteamiento del problema</b> .....	9
<b>1.2. Formulación del problema</b> .....	10
1.2.1. Problema general.....	10
1.2.2. Problemas específicos .....	10
<b>1.3. Objetivos</b> .....	11
1.3.1. Objetivo general.....	11
1.3.2. Objetivos específicos .....	11
1.4. Justificación .....	11
<b>1.5. Limitaciones</b> .....	12
<b>CAPÍTULO II</b> .....	13
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	13
<b>2. Antecedentes de la investigación</b> .....	13
<b>2.1. Bases teóricas</b> .....	14
2.1.1. Onda electromagnética.....	14
2.1.1.1. Propiedades básicas de las ondas electromagnéticas .....	14
2.1.1.2. Propagación de las ondas electromagnéticas.....	15
2.1.2. Espectro radioeléctrico.....	16
2.1.3. Interferencia .....	16

2.1.4.	<i>Internet de las cosas (IoT)</i> .....	18
2.1.5.	<i>Ciudad inteligente (Smart City)</i> .....	18
2.1.6.	<i>LoRa</i> .....	19
2.1.6.1.	<i>Modulación LoRa</i> .....	20
2.1.6.2.	<i>Características de la modulación LoRa</i> .....	21
2.1.6.3.	<i>Parámetros de LoRa</i> .....	22
2.1.6.4.	<i>Descripción del paquete LoRa</i> .....	32
2.1.7.	<i>LoRaWAN</i> .....	33
<b><i>CAPÍTULO III</i></b> .....		36
<b><i>DISEÑO EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED LORAWAN</i></b> .....		36
<b>3.</b>	<b><i>Elección de elementos que conformarán la red</i></b> .....	36
3.1.1.	<i>Puerta de enlace (Gateway)</i> .....	37
3.1.2.	<i>Nodo final para LoRaWAN</i> .....	38
3.1.3.	<i>Servidor de red para LoRaWAN</i> .....	39
3.1.4.	<i>Analizador de espectros</i> .....	40
3.1.5.	<i>Generador de señales de radiofrecuencia</i> .....	41
<b>3.2.</b>	<b><i>Diseño Experimental</i></b> .....	42
3.2.1.	<b><i>Objetivo experimental</i></b> .....	43
3.2.2.	<b><i>Red LoRaWAN expuesta a interferencia co-canal.</i></b> .....	44
3.2.2.1.	<i>Ubicación de la red para pruebas experimentales por interferencia co-canal</i> .....	44
3.2.3.	<b><i>Red LoRaWAN expuesta a interferencia por canal adyacente.</i></b> .....	45
3.2.3.1.	<i>Ubicación de la red para pruebas experimentales por interferencia adyacente.</i> ....	46
3.2.4.	<b><i>Pruebas experimentales complementarias.</i></b> .....	47
3.2.5.	<b><i>Ubicación del generador de señales de radiofrecuencia</i></b> .....	48
3.2.6.	<b><i>Ubicación del servidor de red</i></b> .....	49
<b>3.3.</b>	<b><i>Configuración de la red LoRaWAN</i></b> .....	49

3.3.1.	Configuración de los nodos LoRa.....	49
3.3.2.	Configuración de la puerta de enlace LoRa.....	52
3.3.3.	Configuración del generador de radiofrecuencia.....	53
<b>CAPITULO IV.....</b>		<b>55</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>		<b>55</b>
<b>4.</b>	<b>Nivel de piso de ruido para el canal inalámbrico de transmisión de los nodos LoRa</b> 55	
<b>4.1.</b>	<b>Pruebas de operatividad de la red LoRaWAN y generador de RF .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.</b>	<b>Pruebas experimentales con interferencia co-canal .....</b>	<b>59</b>
4.2.1.	Resultados de las pruebas experimentales por interferencia co-canal.....	60
4.2.1.1.	Análisis.....	61
4.2.1.2.	Comportamiento del RSSI.....	64
4.2.1.3.	Comportamiento de la relación señal a ruido (SNR) .....	65
4.2.1.4.	Capacidad de transferencia de datos.....	71
<b>4.3.</b>	<b>Pruebas experimentales con interferencia por canal adyacente .....</b>	<b>73</b>
4.3.1.	Resultados de las pruebas experimentales por interferencia por canal adyacente.....	74
4.3.1.1.	Análisis.....	75
4.3.1.2.	Comportamiento del RSSI.....	76
4.3.1.3.	Comportamiento de la relación señal a ruido (SNR) .....	77
<b>4.4.</b>	<b>Pruebas experimentales complementarias .....</b>	<b>78</b>
4.4.1.	Resultados de las pruebas experimentales realizadas .....	79
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>81</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>82</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>85</b>
	ANEXO 1- Datos de las pruebas experimentales.....	85
	ANEXO 2- Hoja de datos de la puerta de enlace .....	98
	ANEXO 3- Hoja de datos del nodo lora.....	107

ANEXO 4- Hoja de datos del generador de ondas de radiofrecuencia .....	108
ANEXO 5- Procesamiento de datos en matlab .....	120
ANEXO 6- Código de programación de los nodos LoRa.....	125
ANEXO 6- Configuración de la puerta de enlace .....	127

## Lista de figuras

Figura 2.1 Onda electromagnética [6] .....	14
Figura 2.2 Interferencia por co-canal (Elaboración propia) .....	17
Figura 2.3 Interferencia por canal adyacente (Elaboración propia) .....	17
Figura 2.4 Señal LoRa [15] .....	19
Figura 2.5 Modulación LoRa (Elaboración propia).....	20
Figura 2.6 Cálculo de la potencia de recepción (Elaboración propia).....	25
Figura 2.7 Cálculo del RSSI (Elaboración propia) .....	26
Figura 2.8 Cálculo de la relación señal a ruido (Elaboración propia).....	27
Figura 2.9 Factor de ensanchamiento (SF) (Elaboración propia).....	28
Figura 2.10 Tiempo en el aire del paquete LoRa (Elaboración propia) .....	30
Figura 2.11 Descripción del paquete LoRa (Elaboración propia) .....	32
Figura 2.12 Arquitectura de la red LoRaWAN .....	34
Figura 2.13 Capas de protocolo de LoRaWAN .....	34
Figura 3.1 Puerta de enlace Wisgate Elite 2 (RAK WIRELES TECHNOLOGY) .....	38
Figura 3.2 TTGO-T BEAM V0.7 (LILYGO).....	39
Figura 3.3 Analizador de espectros RSA306B (Tektronix).....	41
Figura 3.4 Generador de señales ERASynth Micro.....	42
Figura 3.5 Ubicación de la red para pruebas experimentales por interferencia co-canal .....	45

<i>Figura 3.6 Ubicación de la red para pruebas experimentales por interferencia por canal adyacente.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.7 Ubicación de la red para pruebas experimentales complementarias .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.8 Vista satelital del generador de señales UNSAAC (Elaboración propia) .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.9 Vista lateral de la ubicación del generador de señales (Elaboración propia) .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.10 Configuración del generador de señales (Elaboración propia) .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.1 Espectrograma de la banda de 915-928 MHz (Elaboración propia) .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.2 Piso de ruido del canal de transmisión (Elaboración propia).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.3 Verificación de parámetros de los nodos LoRa (Elaboración propia).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.4 Espectrograma de los paquetes LoRa transmitidos (Elaboración propia).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.5 Espectrograma de interferencia co-canal (Elaboración propia).....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.6 Espectrograma de interferencia por co-canal (Elaboración propia).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.7 Señal LoRA en presencia de interferencia (Elaboración propia).....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.8 Espectro de la señal resultante producto de la interferencia (Elaboración propia) .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.9 Intensidad de potencia producto de la interferencia (Elaboración propia).....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.10 Capacidad de transferencia de datos según el nivel de interferencia para cada factor de ensanchamiento (Elaboración propia).....</i>	<i>71</i>
<i>-Figura 4.11 Capacidad de transferencia de datos según el a factor de ensanchamiento para cada nivel de interferencia (Elaboración propia) .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.12 Espectro de la señal con interferencia por canal adyacente (Elaboración propia) ....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.13 Espectrograma del canal en presencia de interferencia (Elaboracion propia).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.14 Señal LoRA en presencia de interferencia por canal adyacente (Elaboración propia) .....</i>	<i>75</i>

## ***Lista de tablas***

<i>Tabla 2.1 Niveles de potencia de transmisión para LoRaWAN (Elaboración propia)</i> .....	22
<i>Tabla 2.2 Bandas de transmisión para LoRaWAN (Elaboración propia)</i> .....	23
<i>Tabla 2.3 Límite admitido de SNR para LoRaWAN (Elaboración propia)</i> .....	27
<i>Tabla 2.4 Tasa de codificación para LoRaWAN (Elaboración propia)</i> .....	29
<i>Tabla 2.5 Plan de anchos de banda para LoRaWAN (Elaboración propia)</i> .....	31
<i>Tabla 3.1 Comparación de características de puertas de enlace para LoRaWAN (Elaboración propia)</i> .....	37
<i>Tabla 3.2 Características del nodo final TTGO T-BEAM V0.7</i> .....	38
<i>Tabla 3.3 Comparación de las características de servidores de red para LoRaWAN</i> .....	39
<i>Tabla 3.4 Características del analizador de espectro Tektronix RSA306B (Elaboración propia)</i> .....	40
<i>Tabla 3.5 Características del generador de señales (Elaboración propia)</i> .....	41
<i>Tabla 3.6 Resumen de las características de los nodos LoRa (Elaboración propia)</i> .....	49
<i>Tabla 3.7 Resumen de las características de la puerta de enlace LoRa (Elaboración propia)</i> .....	52
<i>Tabla 4.1 Verificación de datos en la puerta de enlace LoRa (Elaboración propia)</i> .....	58
<i>Tabla 4.2 Configuración de los dispositivos para la prueba experimental</i> .....	59
<i>Tabla 4.3 Tabla guía para las pruebas experimentales</i> .....	60
<i>Tabla 4.4 RSSI promedio recibido según el nivel de interferencia (Elaboración propia)</i> ..	64
<i>Tabla 4.5 RSSI promedio recibido según el factor de ensanchamiento (Elaboración propia)</i> .....	65
<i>Tabla 4.6 SNR promedio recibido para factor de ensanchamiento en ausencia de interferencia (Elaboración propia)</i> .....	65

<i>Tabla 4.7 Porcentaje de paquetes recibidos para cada factor de ensanchamiento según el nivel de interferencia (Elaboración propia).....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 4.8 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 7.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 4.9 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 8.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.10 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 9.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.11 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 10.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.12 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 11.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 4.13 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 12.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 4.14 SNR en función del SF para un nivel de interferencia de -85 dBm.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4.15 SNR en función del SF para un nivel de interferencia de -80 dBm.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4.16 SNR en función del SF para un nivel de interferencia de -75 dBm.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4.17 SNR en función del SF para un nivel de interferencia de -70 dBm.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4.18 SNR en función del SF para un nivel de interferencia de -65 dBm.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4.19 Configuración de los nodos LoRa para pruebas experimentales dentro del campus universitario (Elaboración propia).....</i>	<i>ca 73</i>
<i>Tabla 4.20 Resultados del comportamiento del RSSI para pruebas por interferencia por canal adyacente sin presencia de interferencia (Elaboración propia).....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 4.21 Resultados del comportamiento del RSSI para pruebas por interferencia por canal adyacente en presencia de interferencia (Elaboración propia).....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 4.22 Resultados del comportamiento del SNR para pruebas experimentales por interferencia por canal adyacente sin presencia de interferencia (Elaboración propia)....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 4.23 Resultados del comportamiento del SNR para pruebas experimentales por interferencia por canal adyacente en presencia de interferencia (Elaboración propia)....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 4.24 Configuración de los nodos LoRa para pruebas experimentales complementarias.....</i>	<i>78</i>

# CAPÍTULO I

## ASPECTOS GENERALES

### 1.1. Planteamiento del problema

En la última década el uso del espectro radioeléctrico se ha visto incrementado, en razón a la proliferación de redes de comunicaciones inalámbricas LPWAN, tales como LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox y LTE-M, que usan este medio para transferir información, permitiendo la agrupación e interconexión de objetos o dispositivos, a través de redes públicas o privadas cuyos elementos están conectados entre sí y coexisten en una misma banda del espectro radioeléctrico.

Este crecimiento y coexistencia entre redes inalámbricas, traerá consigo problemas de interferencia, dado que estos medios de telecomunicación en su mayoría funcionan en bandas sin licencia o bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) del espectro radioeléctrico.

Se estima que el creciente despliegue de redes LoRaWAN y otros medios de telecomunicación, que operen en bandas ISM para la implementación de ciudades inteligentes e industria 4.0, generará inconvenientes, debido a que habrá redes inalámbricas y otros dispositivos que coexistan y operen sobre una misma banda, ocasionando atenuación de la señal, pérdida parcial o completa de paquetes, mayor consumo de energía, dificultad para el enlace entre dispositivos y degradación de la capacidad de transferencia de datos.

En el 2019 Orión Afisiadis, Matthieu Cotting, Andreas Burg y Alexios Balatsoukas [1], realizaron un trabajo de investigación, con el propósito de poner a prueba el desempeño de la modulación LoRa frente a ruido blanco gaussiano aditivo e interferencia de otro usuario LoRa. El estudio contempla realizar un análisis teórico matemático de la modulación en adición de ruido e interferencia, aunada a la investigación también se realiza una simulación para corroborar y comparar los resultados, llegando a la conclusión de que la interferencia

tiene un fuerte impacto en el cálculo de la tasa de error de bit en comparación al ruido blanco gaussiano aditivo.

Sin embargo, en el estudio realizado, no se evaluó el impacto de la interferencia en los parámetros de transmisión para LoRaWAN, ya sea de manera teórica o experimental, además se carece de información donde se estime como los parámetros de transmisión son afectados en presencia de interferencia, es por ello que es necesario realizar un análisis del comportamiento de los parámetros de transmisión de una red LoRaWAN en diferentes escenarios de nivel de interferencia electromagnética.

## **1.2. Formulación del problema**

¿En qué medida son afectados los parámetros de transmisión de una red LoRaWAN en presencia de interferencia en la banda de 900 MHz?

### **1.2.1. Problema general**

No se tiene un análisis del comportamiento de los parámetros de transmisión de una red LoRaWAN en diferentes escenarios de nivel de interferencia electromagnética.

### **1.2.2. Problemas específicos**

- No se tiene una evaluación del estado del espectro radioeléctrico en un entorno urbano con baja y alta presencia de dispositivos irradiadores electromagnéticos en la banda de 900 MHz.
- No se conoce el comportamiento del canal inalámbrico en la banda ISM de 900 MHz para una red LoRaWAN.
- No se conoce la forma en la que las variables y parámetros de una red LoRaWAN son afectados en presencia de interferencia electromagnética.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar el comportamiento de los principales parámetros de una red LoRaWAN en diferentes escenarios de nivel de interferencia electromagnética en la banda de 900 MHz.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Diseñar e implementar una red LoRaWAN para evaluar el comportamiento de sus parámetros frente a interferencias electromagnéticas.
- Determinar el estado del espectro radioeléctrico en un entorno urbano con baja y alta presencia de dispositivos irradiadores electromagnéticos en la banda de 900 MHz.
- Analizar el comportamiento de los principales parámetros de transmisión de una red LoRaWAN frente a interferencia electromagnética.

## **1.4. Justificación**

La presente investigación se enfocará en analizar el comportamiento de los principales parámetros de transmisión de una red LoRaWAN frente a interferencia electromagnética, ya que debido a los recientes despliegues de redes LoRaWAN para el desarrollo de ciudades y universidades inteligentes, industria 4.0 y otras aplicaciones que coexistan en una misma porción del espectro radioeléctrico, afectaría a la interoperabilidad entre estas redes y otros dispositivos que funcionen en una misma banda.

Así, el presente trabajo permitiría mostrar:

- El desempeño de una red LoRaWAN en presencia de interferencia.
- Los parámetros de transmisión óptimos según el nivel de interferencia.

## **1.5. Limitaciones**

- Se analizará el espectro en la banda de 900 MHz, solo en la fracción no licenciada de (915 MHz – 928 MHz) para LoRaWAN.
- Se trabajará con un número definido de nodos LoRa que tendrá la red LoRaWAN.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2. Antecedentes de la investigación**

El espectro radioeléctrico es el medio que permite la comunicación de redes inalámbricas, haciendo posible la transferencia de información a grandes distancias mediante dispositivos finales y puertas de enlace, que a su vez conectan otras redes con la internet para aplicaciones de IoT.

De acuerdo a la investigación realizada por Rubén E. Sáenz en 2018 en la Universidad del País Vasco-España [2], encuentra los parámetros mínimos de transmisión necesarios para módulos LoRa como dispositivos finales en una red de IoT. Presentando como resultado un cuadro con parámetros mínimos que deben cumplir los módulos LoRa para un óptimo funcionamiento y su efecto en la red para servicio de IoT.

De manera adicional, Albert Angles Vàsquez, [3], realizó un estudio sobre el número de dispositivos finales que pueden llegar a ser desplegados en una determinada área, la potencia máxima de transmisión y sus restricciones energéticas, proponiendo modelos propagación que representan pérdidas por trayectoria de acuerdo a la potencia de transmisión y el número de dispositivos finales encontrados en el área, tanto para un entorno interior y exterior. Como resultado del estudio concluye que, en una red destinada para el uso de IoT, es importante elegir una banda de frecuencias con pocos dispositivos en operación, porque ayuda a reducir los requisitos para realizar un enlace de comunicación, lo que a su vez tiene un impacto directo en el consumo de energía.

Así mismo, debido a la proliferación de redes de sensores inalámbricos que hacen uso de bandas ISM y operan en mismo canal, genera problemas de interferencia electromagnética, es por ello que, en el 2017, Julio Cesar Santiago Asto desarrolla una de tesis de maestría [4], donde encuentra y concluye que, la proliferación de redes de sensores que operan en una

determinada banda y área, genera problemas de interferencia, ocasionando degradación en la transferencia de las tramas.

## 2.1. Bases teóricas

### 2.1.1. Onda electromagnética

Las ondas electromagnéticas están compuestas por campos eléctricos y magnéticos oscilantes perpendiculares entre sí y variables en el tiempo, con una velocidad de propagación aproximada de  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  en dirección perpendicular al plano formado por los campos eléctricos y magnéticos [5].

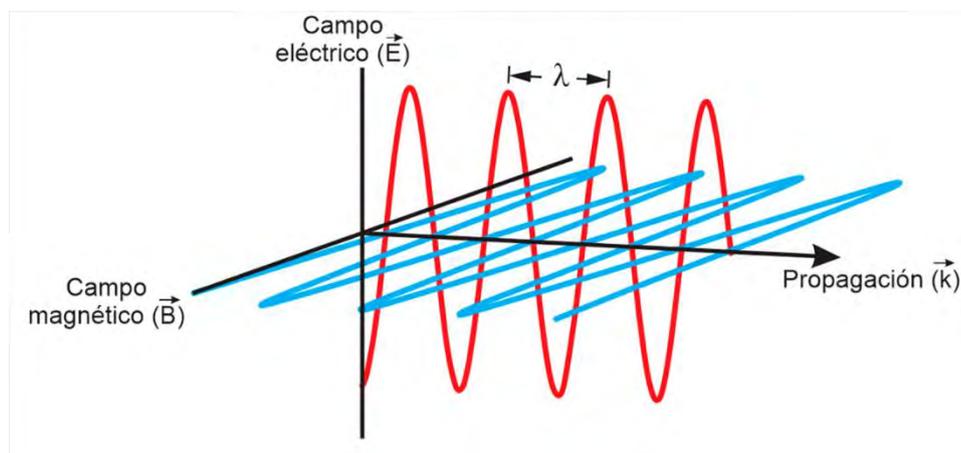


Figura 2.1 Onda electromagnética [6]

#### 2.1.1.1. Propiedades básicas de las ondas electromagnéticas

- a) **Potencia de radiación.** - Una onda electromagnética representa una manifestación de energía en forma de radiación electromagnética, cuya magnitud se incrementa en proporción a las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos [5].
- b) **Polarización de una onda.** - Las ondas electromagnéticas muestran una propiedad de polarización que condiciona la orientación de las oscilaciones de los campos eléctricos y magnéticos conforme se propagan. Estas oscilaciones se encuentran confinadas en planos específicos para cada uno de los campos. La polarización está definida por la ubicación del plano de variación del campo eléctrico [5].

c) **Frecuencia.** - La frecuencia de una onda electromagnética corresponde a la frecuencia de las oscilaciones presentes en los campos eléctricos y magnéticos que la constituyen. En otras palabras, se refiere al número de ciclos completos que tanto el campo eléctrico como el magnético realizan en un intervalo de un segundo [5].

d) **Longitud de onda.** - La longitud de onda ( $\lambda$ ) se define como la distancia recorrida por una onda durante un intervalo de tiempo (T) equivalente al período de una única oscilación completa [5].

$$\lambda = c/f$$

$\lambda$ : longitud de onda  
c: velocidad de la luz  
f: frecuencia

### 2.1.1.2. Propagación de las ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas pueden propagarse a través del vacío, lo que significa que no requieren de un medio material para propagarse. Sin embargo, también pueden propagarse a través de diferentes medios materiales, como el aire, el agua o los objetos sólidos, aunque su velocidad y propiedades pueden variar en función del medio.

- **Pérdidas por espacio libre.**

También conocidas como pérdidas por propagación, se refieren a la disminución de la energía de una onda electromagnética a medida que se propaga a través del espacio vacío. Estas pérdidas ocurren debido a la expansión del frente de onda a medida que se aleja de su fuente, es decir, la energía que inicialmente estaba concentrada en un área más pequeña se distribuye en un volumen más grande, lo que resulta en una disminución de la densidad de energía de la onda.

Asimismo, las ondas electromagnéticas poseen propiedades cuando el medio de propagación no es el vacío.

- **Refracción**

La refracción ocurre cuando una onda electromagnética pasa de un medio a otro, lo que resulta en un cambio de dirección y velocidad.

- **Reflexión**

La reflexión es producto de la incidencia de una onda electromagnética con la frontera de otro medio de propagación, como consecuencia parte o toda la potencia de la onda es reflejada.

- **Difracción**

La difracción se presenta cuando una onda es distorsionada por un obstáculo, permitiendo el paso de solo una pequeña parte de la onda.

### **2.1.2. Espectro radioeléctrico**

El espectro radioeléctrico es una sección del espectro electromagnético, que está conformado por un subconjunto de ondas electromagnéticas que se propagan a través del espacio, es decir, no necesita de un medio físico para su propagación, y está fijada por convención por debajo de los 3000 GHz. Así mismo, el espectro radioeléctrico es un recurso natural, de carácter ilimitado, usado para la prestación de servicios de telecomunicación, emergencia, seguridad, industria e investigación [7].

### **2.1.3. Interferencia**

Es el efecto de una energía no deseada a causa de una o muchas emisiones, inducciones, radiaciones o combinaciones de éstas sobre la recepción en un sistema de telecomunicación, manifestando perturbaciones en la señal, pérdida parcial o completa de la señal, dificultad para el enlace entre dispositivos y degradación de la capacidad de transferencia de datos [8].

- **Interferencia co-canal**

La interferencia co-canal es producida por la superposición de dos o más señales que se originan por transmisores diferentes y funcionan en la misma banda del espectro radioeléctrico [9].

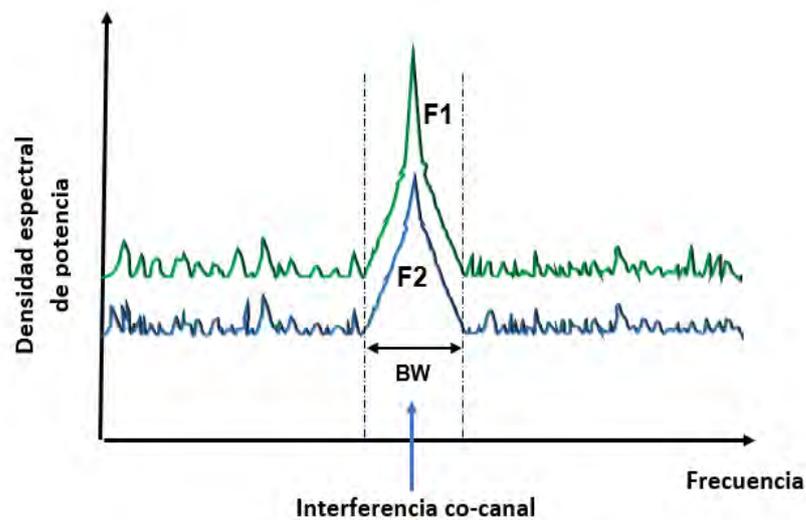


Figura 2.2 Interferencia co-canal (Elaboración propia)

- **Interferencia por canal adyacente**

La interferencia por canal adyacente es producida cuando parte de la potencia de una portadora de una señal invade parte del canal de transmisión de otra señal [9].

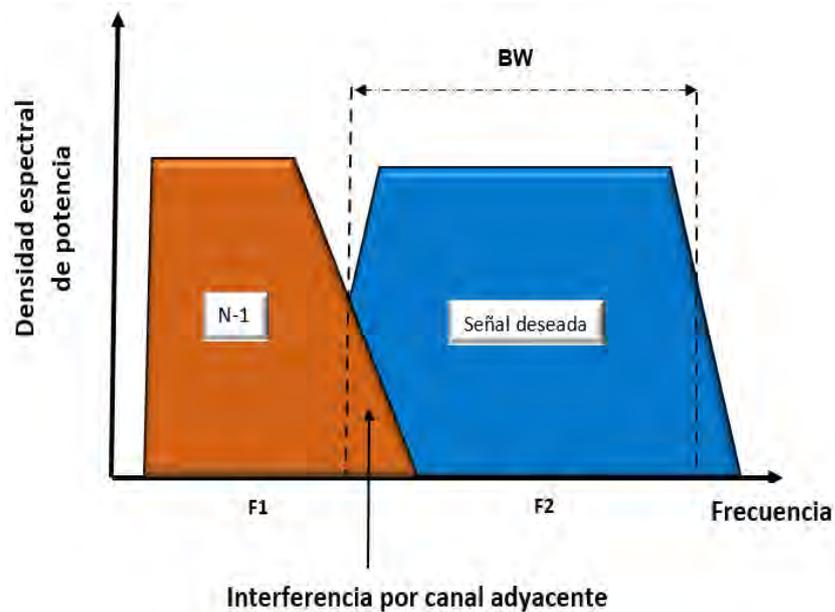


Figura 2.3 Interferencia por canal adyacente (Elaboración propia)

#### **2.1.4. Internet de las cosas (IoT)**

Internet de las cosas es un concepto ampliamente usado en los últimos años, y se entiende como la interconexión digital de los objetos mediante internet. Hoy en día el crecimiento de la población ha llevado a buscar alternativas que permitan plantear soluciones a mediano y largo plazo, por consiguiente, se ha visto la obligación de entender las necesidades del usuario en tiempo real, mejorando el funcionamiento de sistemas en un instante, optimizando las instrucciones y descubriendo nuevas maneras de conectar e intercomunicar dispositivos.

El término IoT ha sido utilizado por vez primera por Kevin Ashton quien fue uno de los creadores del Centro Auto-ID del MIT. Kevin Ashton formaba parte de un conjunto de profesionales, quiénes descubrieron cómo unir objetos al mundo de la internet a través de una etiqueta RFID; siendo una de sus presentaciones en 1999 en la que usó por vez primera el término de “Internet de las Cosas”, cuya frase se ha venido arraigando desde entonces [10].

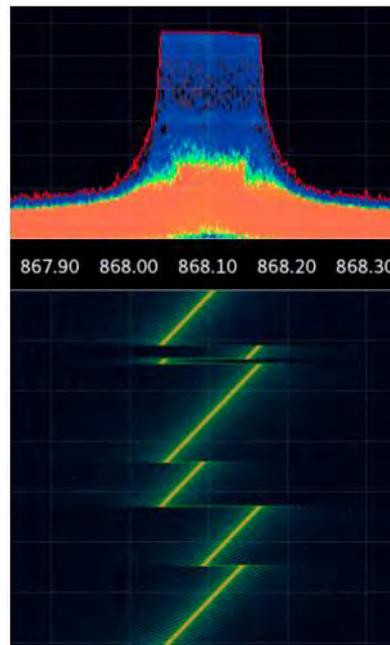
#### **2.1.5. Ciudad inteligente (Smart City)**

Las ciudades inteligentes están conformadas principalmente por tecnologías de la información y la comunicación (TIC), que desarrollan, implementan y promueven actividades de desarrollo sostenible, para enfrentar los crecientes desafíos del proceso de urbanización, impulsando el rendimiento de tecnologías, con el objetivo de mejorar en temas como la economía, sociedad, educación, infraestructura y por último medioambiente.

Según estudios de la ONU se señala que *“la población del planeta (% 54) vive en ciudades, para lo cual en el 2030 habrá 41 ciudades con una población superior a los 10 millones de habitantes teniendo la proyección que el % 90 de este crecimiento se concentre en Asia y África, curiosamente los continentes que más enfrentan los desafíos para satisfacer las necesidades básicas”* [11]. Este problema obliga a plantear alternativas de

planificación, administración y el desarrollo de las ciudades con un enfoque sostenible que abarca temas como, sistemas de infraestructura, plataformas inteligentes, energías renovables y espacios urbanos [12].

### 2.1.6. LoRa



*Figura 2.4 Señal LoRa [13]*

Long Range (LoRa) es una tecnología creada para realizar enlaces de comunicación de largo alcance, está basada en una modulación de espectro ensanchado chirp (Chirp Spread Spectrum Modulation), que conserva características similares de la modulación FSK, pero incrementada significativamente en alcance de cobertura, cuya principal ventaja está en la capacidad de lograr enlaces de largo alcance con bajas potencias, es decir, estaciones base que cubren ciudades o cientos de metros cuadrados [14].

Asimismo, esta tecnología es usada en distintas regiones del mundo entero, donde su operación en el espectro puede variar según la banda ISM asignada, siendo usada en Europa la banda ISM de 863-870 MHz, en los Estados Unidos la banda ISM de 902-928 MHz y en nuestra región (Perú) la banda ISM 915-928 MHz según (DECRETO SUPREMO N° 006-2013-MTC) [15].

LoRa es una tecnología de capa física desarrollada por Cycleo en el año 2010, empresa que dos años más tarde fue adquirida por Semtech. Quien hoy en día es el fabricante de los dispositivos LoRa, quienes ofrecen librerías programadas a disposición de los usuarios, de esta manera dando un sin fin de aplicaciones que permite la comunicación entre nodos LoRa mediante un protocolo establecido por el creador del dispositivo [16].

### 2.1.6.1. Modulación LoRa

Como se ha señalado anteriormente, LoRa es un acrónimo de Long Range y es una tecnología de bajo consumo de energía, donde el emisor transmite pequeños paquetes de datos hacia un receptor ubicado a una larga distancia, su modulación está basada en espectro ensanchado chirp, donde el ensanchamiento del espectro se logra generando una señal de chirrido que varía continuamente en frecuencia de manera ascendente o descendente.

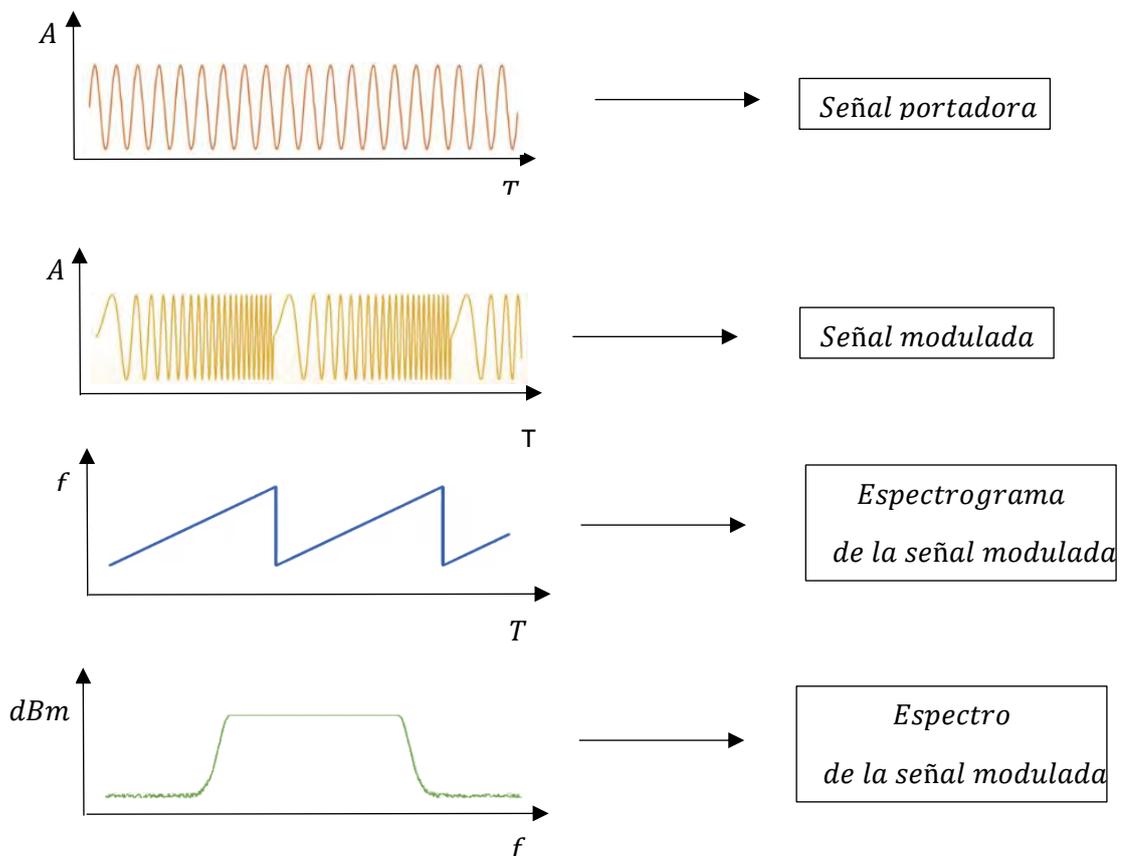


Figura 2.5 Modulación LoRa (Elaboración propia)

### 2.1.6.2. Características de la modulación LoRa

- **Ancho de banda escalable.** - Su modulación es escalable tanto en ancho de banda como en frecuencia, ya que se puede utilizar tanto para salto de frecuencia de banda estrecha y para aplicaciones de secuencia directa de banda ancha. A comparación de otros esquemas de modulación de banda estrecha o banda ancha, LoRa puede adaptarse fácilmente para cualquier modo de operación con solo unos pocos cambios en la configuración de sus registros [17].
- **Envoltente constante con baja potencia.** - LoRa es una modulación de envoltente constante similar a FSK, lo que significa que tienen las mismas etapas de proceso de adquisición de señal de bajo costo, baja potencia y alta eficiencia que se pueden reutilizar sin modificaciones. Además, debido a la ganancia de procesamiento asociada con LoRa, la potencia del transmisor se puede reducir en comparación con un enlace FSK [17].
- **Alta robustez.** - La señal LoRa es muy resistente a los mecanismos de interferencia dentro y fuera de la banda de operación. Dado que el tiempo de símbolo LoRa puede ser más largo que la ráfaga típica de corta duración de los sistemas de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS), proporcionando una excelente robustez a los mecanismos de interferencia de AM pulsada [17].
- **Multitrayecto y resistencia al desvanecimiento.** - La señal de chirrido de LoRa es de un ancho de banda considerablemente grande, por lo tanto, LoRa ofrece robustez multitrayecto y al desvanecimiento, lo que lo convierte en ideal para su uso en entornos urbanos y suburbanos [17].
- **Capacidad de largo alcance.** - El presupuesto de un enlace de LoRa supera al de los enlaces por desplazamiento de frecuencia (FSK) convencionales. Pero cuando se toma en conjunto con la robustez comprobada a la interferencia y los mecanismos de

desvanecimiento, LoRa puede tener un rendimiento de hasta x4 en el rango de enlace por las características anteriormente mencionadas [17].

- **Rango y localización.** - LoRa tiene la capacidad de discriminar linealmente entre errores de frecuencia y de tiempo, lo que permite que sea ideal para aplicaciones de localización y alcance, como los servicios de ubicación en tiempo real [17].

### 2.1.6.3. Parámetros de LoRa

- **Potencia de transmisión**

Es el nivel de energía que necesita un transmisor para realizar un enlace de comunicación, sus unidades están expresadas en miliwatts (mW) o decibeles (dB). A continuación, se muestra una tabla con los niveles de potencia de transmisión para LoRa usadas por protocolo.

<b>Plan de frecuencia</b>	<b>Potencia de transmisión</b>
EU868	+16 dBm
CN779	+12 dBm
EU433	+12dBm
IN865	+30 dBm
KR920	+14 dBm
AS923-1	+16 dBm
AS923-2	+16 dBm
AS923-3	+16 dBm
AS923-4	+16 dBm
RU864	+16 dBm

*Tabla 2.1 Niveles de potencia de transmisión para LoRaWAN (Elaboración propia)*

- **Banda de transmisión**

La banda de transmisión está situada por un intervalo de frecuencias del espectro electromagnético, asignado para diferentes usos dentro de las radiocomunicaciones. A continuación, se muestran las bandas en las que LoRa puede transmitir.

PLAN	EU868	CN779	EU433	IN865	KR920	AS923-1	AS923-2	AS923-3	AS923-4	RU864
<b>Banda de frecuencia por defecto</b>	863 a 870 MHz	779 a 787 MHz	433 a 434 MHz	865 a 867 MHz	920.9 a 923.3 MHz	915 a 928 MHz	915 a 928 MHz	915 a 928 MHz	917 a 920 MHz	864 a 870 MHz
<b>Frecuencia de canal para Tx</b>	868.10 MHz	779.5 MHz	433.175 MHz	865.0625 MHz	922.10 MHz	923.20 MHz	921.4 MHz	916.6 MHz	917.3 MHz	868.9 MHz
	868.30 MHz	779.7 MHz	433.375 MHz	865.4025 MHz	922.30 MHz	923.40 MHz	921.6 MHz	916.8 MHz	917.5 MHz	869.1 MHz
	868.50 MHz	779.9 MHz	433.575 MHz	865.985 MHz	922.50 MHz					
<b>Frecuencia de canal para Rx</b>	869.525 MHz	786.0 MHz	434.665 MHz	866.550 MHz	923.10 MHz	923.2 MHz	921.4 MHz	916.6 MHz	917.3 MHz	869.1 MHz

*Tabla 2.2 Bandas de transmisión para LoRaWAN (Elaboración propia)*

- **Capacidad de canal de transmisión**

La capacidad de canal de transmisión es la velocidad con la que se puede transmitir información sobre un canal de comunicación.

Con el teorema de Shannon-Hartly podemos calcular la velocidad máxima con la que se puede transmitir información sobre un ancho de banda en específico en presencia de ruido.

$$C = B * \log_2(1 + S/N) \dots (1)$$

*fuentes* [17]

Donde:

C = Capacidad de canal (bit/s).

B = Ancho de banda del canal.

S = Potencia media de la señal recibida (vatios).

N = Potencia media de ruido o interferencia (vatios).

S/N = Relación de señal a ruido (SNR).

Reorganizando la Ecuación 1 de la base logarítmica 2 al logaritmo natural  $\ln = \log_e$  se puede transformar la ecuación de la siguiente manera.

$$\frac{C}{B} = 1.433 * \frac{S}{N} \dots (2)$$

Fuente [17]

Para modulaciones de espectro ensanchado, la relación de señal a ruido (SNR) es pequeña, debido a que la señal suele estar por debajo del piso de ruido.

Entonces, suponiendo un nivel de  $S/N \ll 1$ , la Ecuación 2 se puede reescribir como:

$$\frac{C}{B} = \frac{S}{N} \dots (3)$$

De la ecuación 3 se concluye que para transmitir información sin errores sobre un canal con una relación señal/ruido fija, es necesario aumentar el ancho de banda de la señal transmitida.

▪ **Potencia de recepción**

La potencia de recepción es el nivel de la señal que incide sobre un dispositivo final a una determinada distancia.

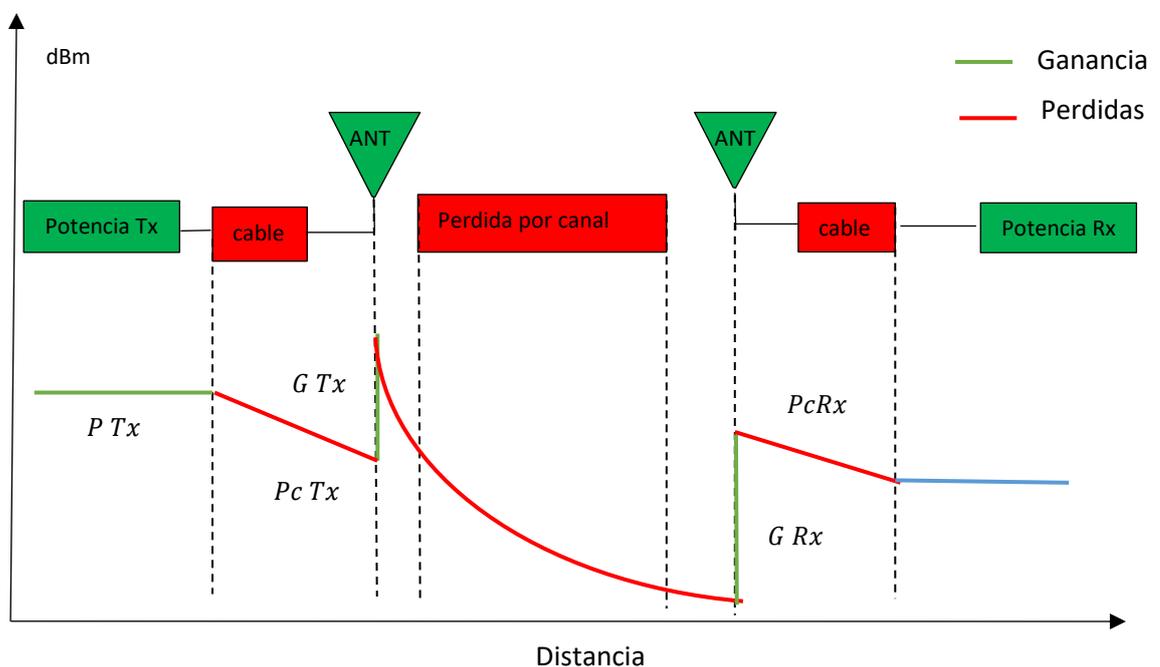


Figura 2.6 Cálculo de la potencia de recepción (Elaboración propia)

A través de la siguiente fórmula, se puede conocer el valor de la potencia de recepción final.

$$PRx \text{ (dBm)} = P \text{ Tx (dBm)} + G \text{ Tx (dB)} - P \text{ cTx (dB)} + G \text{ Rx (dB)} - P \text{ cRx (dB)}$$

FUENTE [18]

Donde:

$PRx$  = Potencia de recepción.

$P \text{ Tx}$  = Potencia de transmisión.

$G \text{ Tx}$  = Ganancia de la antena del transmisor.

$P_{cTx}$  = Pérdidas por conector en el transmisor.

$G_{Rx}$  = Ganancia de la antena del receptor.

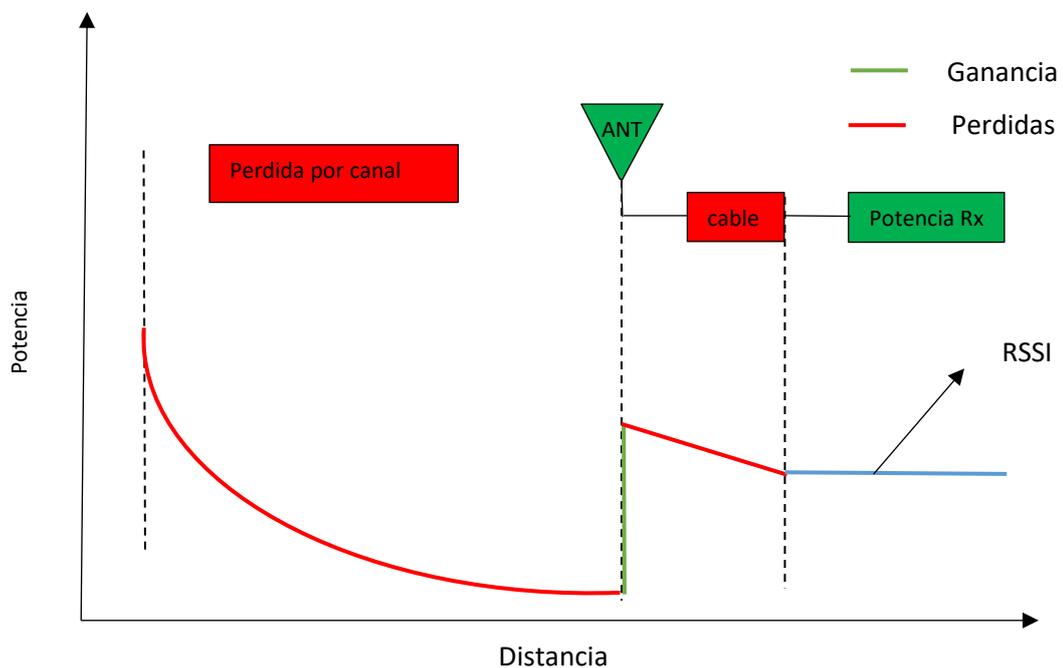
$P_{cRx}$  = Pérdidas por conector en el receptor.

#### ▪ **Indicador de fuerza de señal recibida (RSSI)**

El RSSI cuyo acrónimo es Received Signal Strength Indicator, es una escala de referencia usada para medir el nivel de potencia de una señal recepcionada por un dispositivo de red inalámbrica.

Asimismo, cabe indicar que el RSSI indica la intensidad de señal recibida, más no la calidad de señal.

El RSSI tiene como unidad de medida el dBm y es de valor negativo, cuanto más cercano a 0, se tiene mejor intensidad de señal [17].



*Figura 2.7 Cálculo del RSSI (Elaboración propia)*

- **Relación señal a ruido (SNR-S/N)**

La relación señal a ruido o SNR es un indicador que relaciona la potencia media de señal recibida y el nivel de potencia media del piso de ruido que se puede demodular.

La fórmula para el cálculo de la relación señal a ruido es:

$$S/N = \frac{\text{Potencia media de la señal}}{\text{Potencia media de ruido}} \text{ (dB)}$$

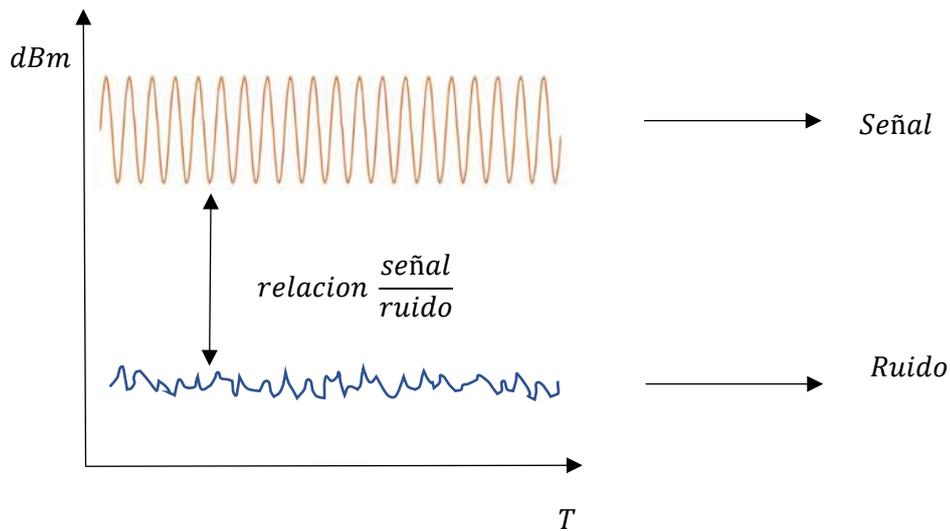


Figura 2.8 Cálculo de la relación señal a ruido (Elaboración propia)

A continuación, se muestran los límites de SNR admitidos por LoRa para cada factor de ensanchamiento (SF).

SF	SNR
6	-5 dB
7	-7.5 dB
8	-10 dB
9	-12.5 dB
10	-15 dB
11	-17.5 dB
12	-20 dB

Tabla 2.3 Límite admitido de SNR para LoRaWAN (Elaboración propia)

- **Factor de ensanchamiento (Spreading Factor-SF- Factor de dispersión)**

El factor de ensanchamiento es la relación entre la tasa nominal de símbolos y la tasa de chips, es decir, es el código de ensanchamiento aplicado a la señal de datos original y representa el número de símbolos enviados por bit de información [17].

LoRa tiene los siguientes SF: 7,8,9,10,11,12.

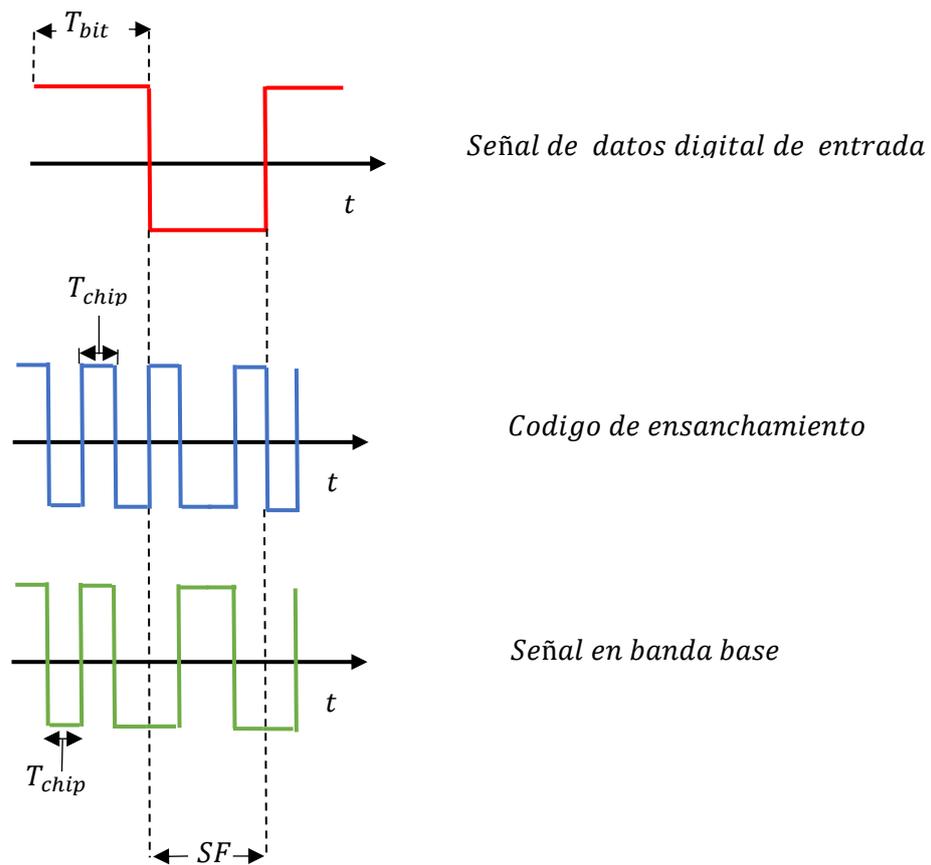


Figura 2.9 Factor de ensanchamiento (SF) (Elaboración propia)

$$SF = N_{T_{chip}}$$

$T_{bit}$  : Es el tiempo de duración de un dato de la señal de entrada.

$T_{chip}$ : Es el tiempo de duración de un dato del código de ensanchamiento.

SF: Es el número de símbolos enviados por cada bit de información

- **Corrección de errores de reenvío (FEC- Forward Error Correction)**

La corrección de errores de reenvío o FEC, es un proceso donde se agregan bits de corrección de error a los datos que se están por transmitir, estos bits agregados ayudan a restaurar los datos corrompidos producto de la interferencia [19].

Para el FEC se tiene la tasa de codificación (Coding rate-CR), que indica la proporción de bits transmitidos que llevan información.

A continuación, se muestra la fórmula que lo representa.

$$CR = \frac{4}{4 + CR}$$

LoRa admite los siguientes valores de tasa de codificación

TASA DE CODIFICACIÓN (CR)	$CR = \frac{4}{4 + CR}$
1	4/5
2	4/6
3	4/7
4	4/8

*Tabla 2.4 Tasa de codificación para LoRaWAN (Elaboración propia) [19]*

- **Tiempo en el aire**

El tiempo en el aire o ToA (Time on Air), es la cantidad de tiempo que la antena del transmisor está energizada, es decir está transmitiendo datos.

Para el cálculo del tiempo en el aire de un paquete LoRa se puede realizar de la siguiente manera.

$$T_{oA} = T_{Preámbulo} + T_{payload}$$

**Preámbulo:** También conocida como cabecera, que contiene información acerca de la longitud del payload y la razón del código.

**Payload:** Es la carga útil del paquete, que contiene al mensaje que se desea transmitir.

**Payload CRC:** El payload CRC es un mecanismo de detección de errores de uno

o varios bits durante una transmisión.

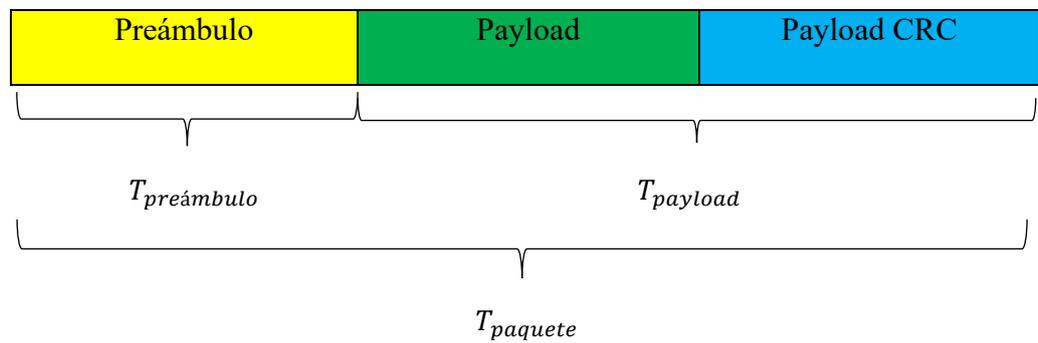


Figura 2.10 Tiempo en el aire del paquete LoRa (Elaboración propia)

$$T_{paquete} = T_{oA} = T_{Preámbulo} + T_{payload}$$

Para el cálculo del tiempo de preámbulo se usa la siguiente ecuación.

$$T_{preámbulo} = (n_{preámbulo} + 4.25) * T_s$$

Donde:

$T_{preámbulo}$  = Tiempo de preámbulo.

$n_{preámbulo}$  = Número de preámbulo.

$T_s$  = Tiempo de símbolo.

- **Cambio de canal para cada transmisión**

Lora usa este método de cambio de frecuencia de portadora o cambio de canal como mecanismo de resistencia a interferencia, este cambio de canal se realiza de manera pseudo aleatoria, LoRaWAN como protocolo tiene múltiples canales de transmisión como se muestra en la tabla N° 2.2.

- **Sensibilidad**

La sensibilidad es un parámetro muy importante en las telecomunicaciones, porque indica el nivel de potencia de señal más bajo que un receptor puede recibir para demodular.

Asimismo, es conocida como sensibilidad Rx y tiene la siguiente ecuación.

$$\text{Sensibilidad Rx (dBm)} = -174 + 10\log(BW) + \text{Límite SNR (dB)} + NF \text{ (dB)}$$

Donde:

*Sensibilidad Rx* = Sensibilidad del receptor.

-174 = Ruido térmico en 1 Hz de ancho de banda a temperatura ambiente.

*BW* = Ancho de banda del canal.

*Límite SNR* = Límite de relación S/N tolerado por el factor de ensanchamiento.

*NF* = Factor de ruido (chips transceptores LoRa SX1272 y SX1276, NF es 6 dB).

#### ▪ **Ancho de banda**

Para señales analógicas, el ancho de banda es la longitud de frecuencias donde se encuentra la mayor potencia de la señal y su longitud está medida en hercios (Hz), LoRaWAN por protocolo usa anchos de banda definidos para cada región.

<b>Plan</b>	<b>EU868</b>	<b>CN779</b>	<b>EU433</b>	<b>IN865</b>	<b>KR920</b>	<b>AS923</b>	<b>RU864</b>
<b>Ancho de banda</b>	125/500 (KHz)	125 (KHz)	125/250 (KHz)	125 (KHz)	125 (KHz)	125 (KHz)	125 (KHz)

*Tabla 2.5 Plan de anchos de banda para LoRaWAN (Elaboración propia)*

#### ▪ **Relación señal a interferencia (SIR)**

La relación señal a interferencia o SIR es un indicador que relaciona la potencia media de señal recibida y el nivel de potencia media de interferencia, debido a otras señales que utilizan la misma banda de frecuencia.

La fórmula para el cálculo de la relación señal a ruido es:

$$S/I = \frac{\text{Potencia media de la señal}}{\text{Potencia media de la interferencia}} \text{ (dB)}$$

### 2.1.6.4. Descripción del paquete LoRa

A continuación, se realiza una ejemplificación gráfica de cómo se podría dar el paquete

LoRa

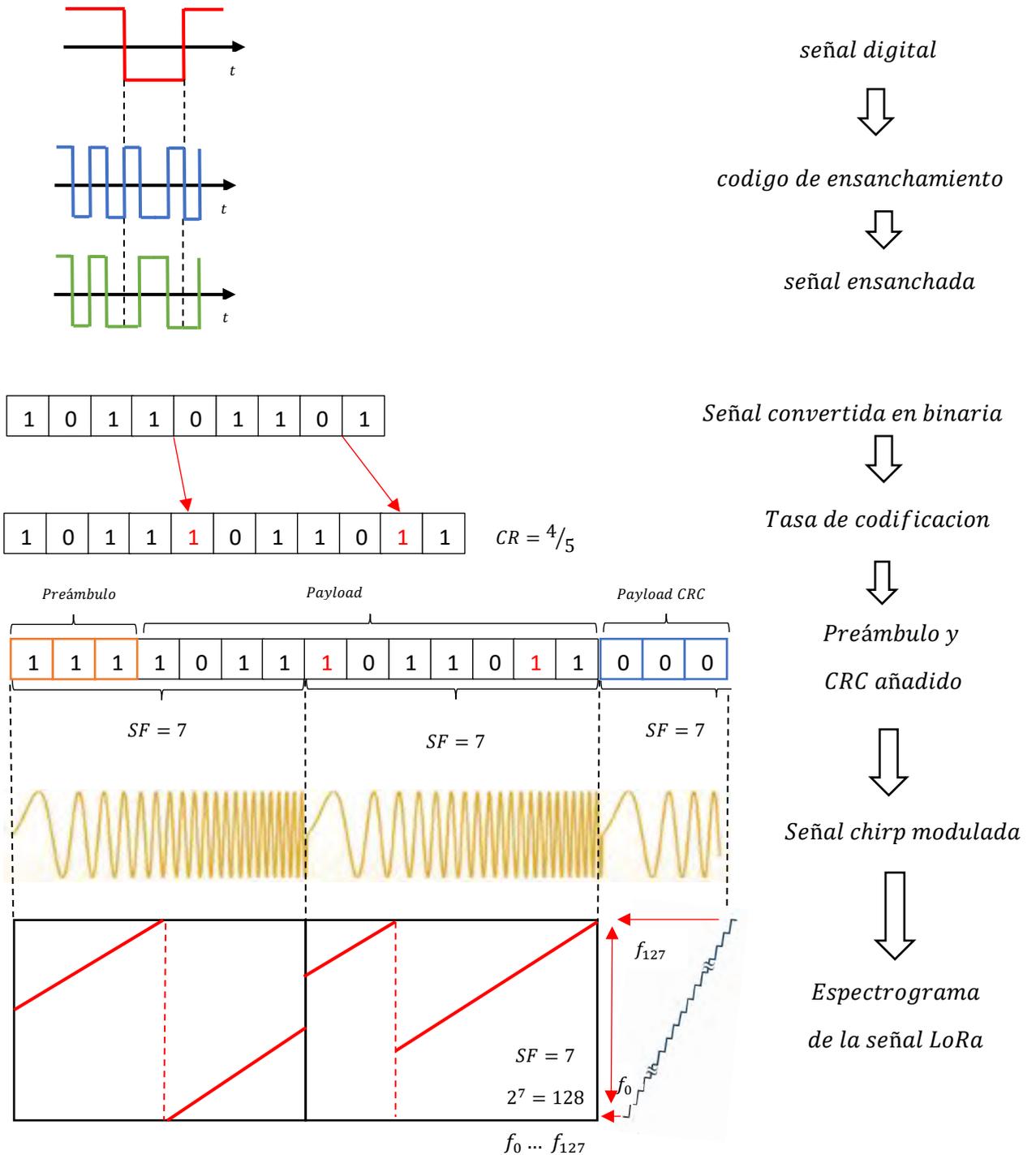


Figura 2.11 Descripción del paquete LoRa (Elaboración propia)

### **2.1.7. LoRaWAN**

LoRaWAN es un protocolo de red de área amplia y bajo consumo (LPWA), que está diseñada para interconectar objetos a internet a través de redes; el protocolo de red LoRaWAN contiene funciones que permiten comunicaciones del tipo bidireccionales seguras de bajo costo para aplicaciones de IoT y ciudades inteligentes [20].

LoRaWAN precisa el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red, mientras LoRa habilita la capa física para la conexión de largo alcance.

El protocolo y arquitectura de red de LoRaWAN, posee mayor atribución para la determinación de la duración de la batería de un nodo sensor, la capacidad de la red, la seguridad y la diversidad de aplicaciones atendidas por la red [14].

La arquitectura de red de LoRaWAN tiene una topología estrella de estrellas, donde las puertas de enlaces reciben y reenvían información hacia los nodos LoRa (dispositivos finales) y un servidor de red central.

La tasa de transferencia de datos en baudios de la red LoRaWAN varía entre 0,3 kbps y 50 kbps dependiendo de la configuración de la variable de ‘velocidad de datos’ (DR) que se esté usando. La elección de la velocidad de datos nos permite una prestación dinámica entre el rango de comunicación y la permanencia del mensaje; las comunicaciones con diferentes velocidades de datos no interfieren entre sí dando paso a la creación de un conjunto de canales de código implícitas que amplían la capacidad del Gateway, maximizando la vida útil de la batería de los dispositivos finales y la capacidad general de la red. El servidor de red LoRaWAN se encarga de administrar la configuración de DR y la potencia de salida de RF hacia cada nodo sensor específico mediante un esquema de velocidad de datos adaptativo (ADR) [21].

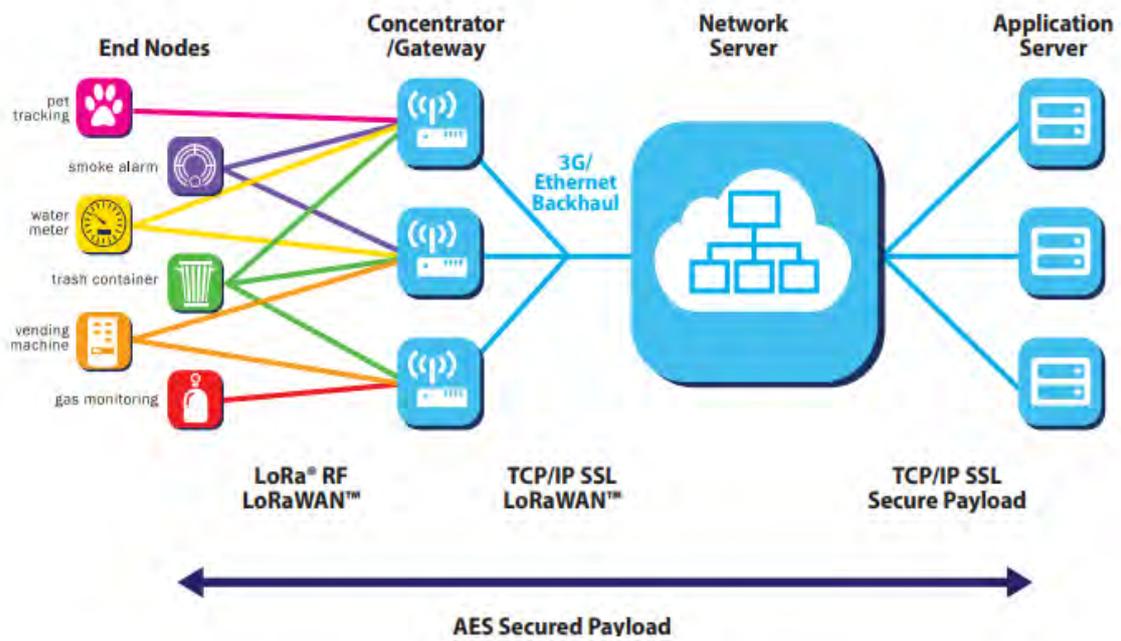


Figura 2.12 Arquitectura de la red LoRaWAN [21]

LoRaWAN cuenta con diferentes tipos de dispositivos finales para satisfacer las diferentes necesidades debido a la amplia gama de aplicaciones.

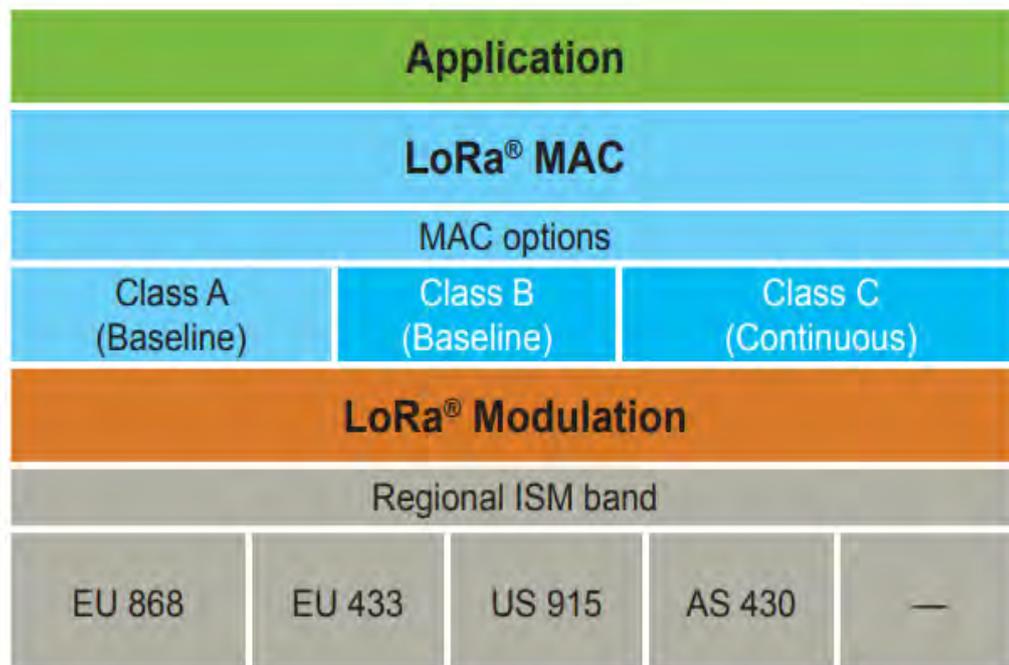


Figura 2.13 Capas de protocolo de LoRaWAN [21]

- **Clase A – Dispositivos finales bidireccionales de menor potencia.**

La clase A de la red LoRaWAN tiene que ser compatible con todos los dispositivos finales, en esta clase el tipo de comunicación entre el dispositivo final y la puerta de enlace para comunicación con el servidor, se realiza de manera bidireccional; en esta clase el dispositivo final siempre inicia la comunicación enviando una solicitud ascendente (Uplink), para luego recibir un enlace descendente (Downlink) de manera asíncrona. En esta operación el dispositivo final entra en modo suspensión durante el tiempo que uno defina, dando lugar a un menor consumo de energía, puesto que la transferencia de datos de enlace descendente desde el servidor estarán en espera hasta siguiente enlace Uplink del dispositivo final [21].

- **Clase B – Dispositivos finales bidireccionales con latencia de enlace decente determinada.**

La clase B hace uso de las características de la clase A, para esta clase los dispositivos finales se sincronizan con la red mediante el envío de señales periódicas, abriendo canales descendentes en horarios que están programados lo que proporciona a la red enviar comunicaciones de enlace descendente, por consiguiente, permite saber al servidor cuando el dispositivo final está en modo escucha; lo anterior mencionado da como resultado un mayor consumo de energía en los dispositivos finales [21]

- **Clase C - Dispositivos finales bidireccionales de latencia más baja.**

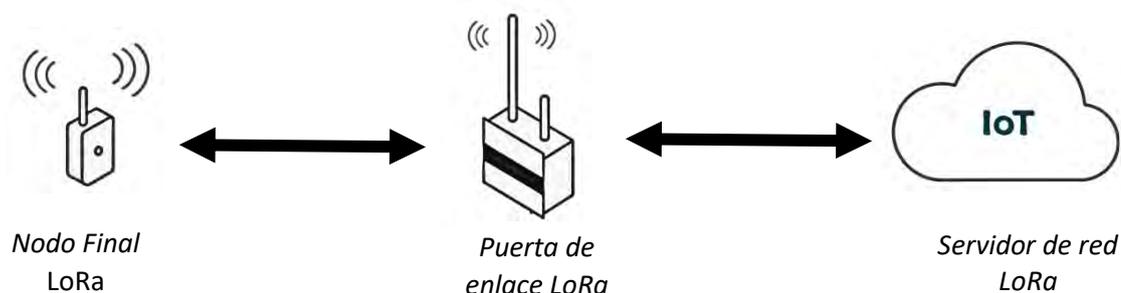
En esta clase los dispositivos finales hacen uso de todas las características de las anteriores clases, con la diferencia de que los dispositivos finales tienen ventanas de recepción permanentemente abiertas excepto cuando están transmitiendo dando como resultado una menor latencia o tiempo de respuesta a costa de mayor consumo de energía respecto a las clases A y B [21].

## CAPÍTULO III

### DISEÑO EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED LORAWAN

Una red de LoRaWAN está compuesta principalmente de puertas de enlace LoRa (gateway), nodos LoRa (dispositivo final) y un servidor de red.

- **Puerta de enlace:** Está encargada de recibir los datos transmitidos por un nodo y reenviar los paquetes hacia un servidor de red.
- **Nodo LoRa:** Está encargado de recibir los datos de un sensor y transmitirlos hacia una puerta de enlace.
- **Servidor de red LoRa:** Está encargado de coordinar y gestionar las comunicaciones entre los dispositivos finales y otros componentes de la red LoRa para permitir la transmisión de datos a larga distancia con bajo consumo de energía.



*Figura 3.1 Diseño de la red LoRaWAN (Elaboración propia)*

### 3. Elección de elementos que conformarán la red

Para la elección de elementos que conformaron la red LoRaWAN, se tomó en consideración los dispositivos con los que cuenta el “Laboratorio de Investigación e Innovación en Sistemas de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información” de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica-UNSAAC.

### 3.1.1. Puerta de enlace (Gateway)

La puerta de enlace LoRa es un dispositivo encargado recibir los paquetes transmitidos por un nodo LoRa, para posteriormente reenviar los paquetes hacia un servidor de red privado público o privado.

Se planteó 3 alternativas como puertas de enlace para la red de LoRaWAN.

PUERTA DE ENLACE PARA LORAWAN			
Características	Wisgate Developer (RAK7244)	Wisgate Edge lite 2 (Rak 7268)	Wisgate Edge pro (Rak7289)
Frecuencia de operación	AU 915, KR 920 y AS 923	AU 915, KR 920 y AS 923	AU 915, KR 920 y AS 923
Canales	8	8	16
Soporte de clase	A y C	A y C	A, B y C
Potencia TX	27 dBm	27 dBm	27 dBm
Sensibilidad RX	-139 dBm	-139 dBm	-139 dBm
Tipo de alimentación	5V / 2.5A	12V/1A Y POE	12V/1A Y POE
Sistema operativo	LINUX	OpenWRT	OpenWRT
GPS	Ublox MAX-7Q	No	ZOE-M8Q
Conexión BACKHAUL	LTE y Ethernet	LTE, Ethernet y WI-FI	LTE, Ethernet y WI-FI
Temperatura de operación	-40°C a 60°C	-10°C a 55°C	-30°C a 55°C
Protección	IP30	IP30	IP67
Costo	\$ 316	\$ 219	\$ 372

*Tabla 3.1 Comparación de características de puertas de enlace para LoRaWAN (Elaboración propia)*

En la tabla N° 3.1 se observa que todas las alternativas propuestas tienen características similares, pero se debe de resaltar que solo algunas características fueron de mayor importancia para el desarrollo de la tesis, tales como:

**Sistema operativo:** Contiene un conjunto de órdenes y programas que controlan las funciones básicas de un dispositivo, además tiene que ser de un fácil uso y compatible con la integración de aplicaciones.

**Costo:** se contó con un presupuesto limitado para la adquisición del dispositivo o equipo.

Teniendo en cuenta los anteriores puntos mencionados, se optó por elegir la puerta de enlace

Wisgate Elite 2, porque cuenta con el sistema operativo OpenWRT, que permite la compatibilidad con el interfaz usuario web para una fácil configuración y supervisión de la adquisición de datos, además de no tener incorporada GPS, lo que redujo considerablemente su costo en comparación a las demás puertas de enlace.



*Figura 3.1 Puerta de enlace Wisgate Elite 2 (RAK WIRELES TECNOLOGY)*

### **3.1.2. Nodo final para LoRaWAN**

También conocido como nodo final LoRa, es un dispositivo encargado recibir los datos de sensores y transmitirlos hacia una puerta de enlace para ser posteriormente procesados.

El laboratorio de investigación (LIISTTI-UNSAAC), tenía en sus instalaciones el nodo LoRa TTGO-T BEAM (V0.7), por lo que se optó como elección de nodo LoRa para la tesis, y cuyas características e imagen se muestran a continuación.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>NODO FINAL TTGO T-BEAM V0.7</b>
<b>Fabricante</b>	LILYGO
<b>Transceptor de radio</b>	SX1276
<b>Tipo de Modulación</b>	LoRa
<b>Frecuencia de operación</b>	AU 915, KR 920 Y AS 923
<b>Potencia TX</b>	20 dBm
<b>Sensibilidad RX</b>	-139 dBm
<b>Alimentación</b>	1.7 V ~ 3.7V
<b>Corriente</b>	Transmisión 29 mA Reposo 1.5 uA
<b>Temperatura de operación</b>	-40 °C- + 85 °C
<b>Error de frecuencia</b>	+/- 15KHz
<b>Costo</b>	\$ 33.50

*Tabla 3.2 Características del nodo final TTGO T-BEAM V0.7*



Figura 3.2 TTGO-T BEAM V0.7 (LILYGO)

### 3.1.3. Servidor de red para LoRaWAN

El servidor de red para LoRaWAN fue otro elemento principal que conformó la red, ya que estuvo encargada de recibir, procesar y almacenar los paquetes enviados por la puerta de enlace para posteriormente ser mostrados en una interfaz web.

Existen diversos servidores de red públicos y privados para LoRaWAN, por lo que se planteó 3 alternativas como servidor de red.

<b>SERVIDOR DE RED PARA LORAWAN</b>			
<b>Características</b>	<b>ChirpStack</b>	<b>The Things Network</b>	<b>LoRaWAN SERVER</b>
<b>Interfaz Web</b>	Si	Si	Si
<b>Sistema Operativo</b>	Debian/Ubuntu	No requiere	Debian/Linux Windows Mac OS
<b>Clases de dispositivos soportados</b>	Dispositivos de clase A, B y C	Dispositivos de clase A, B y C	Dispositivos de clase A, B y C
<b>Integración De Aplicaciones</b>	HTTP / MQTT AWS / AMQP	MQTT / WEDHOOK AWS IOT	HTTP / MQTT AMQP
<b>Tipo de servidor</b>	Público / Privado	Público / Privado	Privado
<b>Soporte</b>	Soporte comunitario	Soporte comunitario	Soporte comunitario
<b>Licencia</b>	Software libre	Software libre	Software libre
<b>Versiones de LoRaWAN que soporta</b>	LoRaWAN (V 1.0 y V 1.1)	LoRaWAN (V 1.0 y V 1.1)	LoRaWAN (V 1.0 y V 1.1)

Tabla 3.3 Comparación de las características de servidores de red para LoRaWAN

En la tabla N° 3.3 se observa que todas las alternativas propuestas tienen características similares, sin embargo, solo una característica es de mayor importancia:

*El sistema operativo en el cual se puede usar, debe de permitir una fácil instalación, manejo de aplicativo web sencillo y la integración con otras aplicaciones.*

Por lo que se optó elegir el servidor de red LoRaWAN SERVER, cuya característica más resaltante es que se puede instalar en el sistema operativo Windows, además que puede integrar múltiples aplicaciones para diversos proyectos por su gran variedad de protocolos de comunicación.

### **3.1.4. Analizador de espectros**

El analizador de espectros es un equipo electrónico de medición, con capacidad para analizar y visualizar la distribución de frecuencias de una señal o una onda presentes en el entorno, además, de descomponer una señal en sus componentes de frecuencia individuales y muestreando la amplitud de cada componente en función de su frecuencia. Esto mediante la transformada de Fourier, que permite transformar una señal en el dominio del tiempo a su representación en el dominio de la frecuencia.

El analizador de espectro usado para el desarrollo de la tesis es el Tektronix RSA306B, cuya características e imagen se muestran a continuación.

<b>Características</b>	<b>Tektronix RSA306B</b>
<b>Rango de medición</b>	+20 dBm a -160 dBm
<b>Duración mínima de señal a captar</b>	27 µseg
<b>Rango de frecuencia de medición</b>	9 kHz a 6.2 GHz
<b>Capacidad de análisis de espectro</b>	SI
<b>Interface de programación</b>	SignalVu-PC TM
<b>Sistema operativo requerido</b>	Microsoft Windows
<b>Características que ofrece el software</b>	Pantalla de espectrograma, medición de pulsaciones, reproducción de archivos guardados.
<b>Portabilidad</b>	Portátil, óptimo para trabajos de campo

*Tabla 3.4 Características del analizador de espectro Tektronix RSA306B (Elaboración propia)*



*Figura 3.3 Analizador de espectros RSA306B (Tektronix)*

### 3.1.5. Generador de señales de radiofrecuencia

Para realizar la tesis y cumplir con el objetivo propuesto, era necesario contar con algún elemento o dispositivo capaz de generar ondas electromagnéticas, y de transmitir en la frecuencia de operación de la red de LoRaWAN.

Para lo cual, el laboratorio de investigación LIISTTI-UNSAAC, tenía en sus instalaciones un generador de señales de RF ERASynth Micro, que se usó para el objetivo en mención y cuyas características e imagen se muestran a continuación.

<b>Características</b>	<b>ERASynth Micro</b>
<b>Rango de Frecuencia</b>	12,5 MHz a 6,4 GHz
<b>Rango de amplitud</b>	-50dBm a +15 dBm
<b>Ruido de fase</b>	-115 dBc/Hz
<b>Modulación</b>	AM, FM, Pulso
<b>Tiempo de cambio de frecuencia</b>	1 ms
<b>Voltaje de alimentación</b>	5 V
<b>Consumo de energía</b>	<2 W

*Tabla 3.5 Características del generador de señales (Elaboración propia)*



*Figura 3.4 Generador de señales ERASynth Micro*

### 3.2. Diseño Experimental

En esta tesis se realizó una evaluación del comportamiento de una red LoRAWAN en presencia de interferencia, para de esta manera probar la efectividad de este sistema de comunicación y el efecto en sus parámetros de transmisión.

Por lo tanto, para garantizar una comunicación fiable y eficaz en entornos inalámbricos fue crucial evaluar la relación señal a ruido (SNR), indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI) y capacidad de transferencia de datos, debido a que:

- **Relación señal a ruido.** - Además de indicar la relación de proporción entre la potencia de la señal deseada y la potencia del ruido presente en un sistema de comunicación indicando la calidad de la señal.
- **Indicador de fuerza de señal recibida.** - Es una medida que cuantifica la potencia de la señal recibida en un receptor, representando la intensidad de la señal captada por el receptor, sin tener en cuenta la relación con el ruido.
- **Capacidad de transferencia de datos.** - Es una medida que indica la cantidad de información que puede ser transmitida a través de un canal de comunicación en un intervalo de tiempo determinado. Así mismo, la capacidad de transferencia de datos está influenciada por diversos factores, como el ancho de banda disponible, la calidad de la señal y la eficiencia del protocolo de comunicación utilizado.

### 3.2.1. Objetivo experimental

El objetivo de este experimento consiste en someter a una red LoRaWAN a interferencia. Según el marco teórico, los sistemas de comunicación pueden experimentar interferencia co-canal e interferencia por canal adyacente, es así que se plantean como objetivos experimentales lo siguiente:

- Realizar pruebas experimentales con interferencia co-canal sobre la red LoRaWAN en operación, donde se deberán situar cada uno de los elementos de la red en puntos definidos en base a líneas de vista optimas, y cuya ubicación del nodo deberá estar relacionada al valor máximo de relación señal a ruido, para lo cual se deberá usar un nodo con todos los factores de ensanchamiento admitidos y un canal de transmisión tanto para el nodo y la señal interferente.
- Realizar pruebas experimentales con interferencia por canal adyacente sobre la red LoRaWAN en operación, donde se deberán situar cada uno de los elementos de la red en puntos definidos en base a líneas de vista optimas, y cuyos valores de relación señal a ruido en correspondencia a su factor de ensanchamiento y la distancia sean las máximas posibles, para lo cual se deberá usar como mínimo dos canales de transmisión y 3 factores de ensanchamiento para los nodos y un canal de transmisión para la señal interferente ubicada entre los canales de transmisión de los nodos.

Asimismo, previo al desarrollo de las pruebas experimentales se deberá evaluar el estado de la banda ISM 915 – 928 MHz con fines de conocer el estado del nivel de piso de ruido y percibir la existencia de dispositivos irradiadores de ondas electromagnéticas sobre la banda.

### 3.2.2. Red LoRaWAN expuesta a interferencia co-canal.

El objetivo específico de esta prueba experimental consistió en exponer la red a interferencia co-canal, para lo cual, fue necesario una puerta de enlace LoRa (gateway LoRa), un servidor de red encargado del almacenamiento de datos (parámetros de transmisión) y un nodo LoRa debido a que solo se usó un canal de transmisión.

Para esta prueba experimental, el nodo LoRa fue ubicado en una zona con línea de vista entre transmisor y receptor optima y cuyo valor de relación señal a ruido en relación a la distancia fue la máxima posible, además se usó un mismo canal de transmisión para el nodo LoRa y la señal interferente, asimismo, para el desarrollo de las pruebas experimentales se usaron todos los factores de ensanchamientos admitidos por el nodo LoRa con el fin de evaluar el comportamiento de cada uno de los parámetros de transmisión.

#### 3.2.2.1. Ubicación de la red para pruebas experimentales por interferencia co-canal.

El escenario de desarrollo de la tesis tuvo como escenario el campus de la Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco (UNSAAC), debido a que un futuro cercano, el campus universitario podría convertirse en la primera universidad inteligente en la región sur del país, así mismo, por poder tener un escenario controlado.

Es por ello que los elementos de la red estuvieron ubicados en los siguientes puntos.

- **Estación base.** - La estación base estuvo situada en las instalaciones del Laboratorio de Investigación e Innovación en Sistemas de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información ubicada en la facultad de Ingeniería Electrónica, donde estuvieron ubicados el servidor de red privado y la puerta de enlace LoRa.
- **Nodo Lora.** - El nodo LoRa estuvo situado a espaldas de la Escuela Profesional de Turismo en las coordenadas  $13^{\circ}31'18''S$  y  $71^{\circ}57'29''W$ , debido a que existe buena línea de vista y el valor de SNR registrado en las pruebas de reconocimiento de campo, fueron las máximas posibles.



*Figura 3.5 Ubicación de la red para pruebas experimentales por interferencia co-canal*

### **3.2.3. Red LoRaWAN expuesta a interferencia por canal adyacente.**

El objetivo específico de esta prueba experimental consistió en exponer la red a interferencia por canal adyacente, para lo cual, fue necesario una puerta de enlace LoRa, un servidor de red encargado del almacenamiento de datos (parámetros de transmisión) y tres nodos LoRa debido a que se usaron 3 factores de ensanchamiento para evaluar el efecto de interferencia en ellos.

Para esta prueba experimental, los nodos LoRa fueron ubicados en zonas con línea de vista entre transmisor y receptor óptimas y cuyos valores de relación señal a ruido en relación a su factor de ensanchamiento y la distancia fueron las máximas posibles, además fueron usados 2 canales de transmisión para los nodos LoRa y un canal de transmisión para la señal interferente.

### 3.2.3.1. Ubicación de la red para pruebas experimentales por interferencia adyacente.

El escenario de desarrollo para la prueba experimental también se tuvo como escenario el campus de la Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco (UNSAAC).

Es por ello que los elementos de la red estuvieron ubicados en los siguientes puntos.

- **Estación base.** - Al igual que, para las pruebas experimentales por interferencia co-canal la estación base estuvo situada en las instalaciones del Laboratorio de Investigación e Innovación en Sistemas de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información ubicada en la facultad de Ingeniería Electrónica, donde estuvieron ubicados el servidor de red privado y la puerta de enlace LoRa.
- **Nodos LoRa.** - Los nodos LoRa estuvieron situados en puntos estratégicos con las mejores líneas de vista posibles, valores de relación señal a ruido en correspondencia a su factor de ensanchamiento y distancia, siendo los máximos posibles. Estos fueron determinados en las pruebas de reconocimiento, seleccionando 3 ubicaciones donde se situaron los nodos.



Figura 3.6 Ubicación de la red para pruebas experimentales por interferencia por canal adyacente

- ✓ **Nodo 1:** Se ubicó en las inmediaciones de la puerta de ingreso número 6 de la Av. Universitaria, cuya ubicación está en 13°31'15"S y 71°57'37"W.
- ✓ **Nodo 2:** Situado en las inmediaciones de la puerta de ingreso número 4 de la Av. La Cultura, cuya ubicación está en 13°31'18"S y 71°57'29"W.
- ✓ **Nodo 3:** Situado en la inmediación de los módulos de la Escuela Profesional De Psicología, cuya ubicación en Google Earth está en 13°31'21"S y 71°57'27"W.

### 3.2.4. Pruebas experimentales complementarias.

Como objetivo complementario en la elaboración de pruebas experimentales se planteó realizar toma de datos fuera del campus universitario, teniendo en consideración distancias superiores a los 500 m y 1000 m entre el nodo LoRa y la puerta de enlace, con el objetivo de poner a prueba los saltos de canal que realiza la red LoRaWAN y ponerla a prueba frente a interferencia, asimismo, dichos puntos fueron situados de manera que tuvieran las mejores líneas de vista, siendo estas las que se muestran a continuación:



Figura 3.7 Ubicación de la red para pruebas experimentales complementarias

- ✓ **Nodo 2:** Situada en la Av. Collasuyo, con ubicación mediante Google Earth de 13°31'09.1"S / 71°57'46.9"W.
- ✓ **Nodo 1:** Situada en el mirador Tete Qapa-Munay Senqa, con ubicación mediante Google Earth de 13°30'53.7"S 71°57'56.3"W.

### 3.2.5. Ubicación del generador de señales de radiofrecuencia

El generador de RF estuvo ubicado en el frontis de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica-UNSAAC, debido a que este lugar permitía generar niveles de interferencia estables hacia el gateway de la red LoRAWAN. La ubicación específica se da con coordenadas  $13^{\circ}31'16''S$  y  $71^{\circ}57'26''W$ , a una distancia lineal aproximada hacia la puerta de enlace de 40.55 metros, y una altura aproximada de 1 metro en referencia al nivel del piso, el generador de RF estuvo ubicado en el mismo punto en todas las pruebas experimentales realizadas.



Figura 3.8 Vista satelital del generador de señales UNSAAC (Elaboración propia)

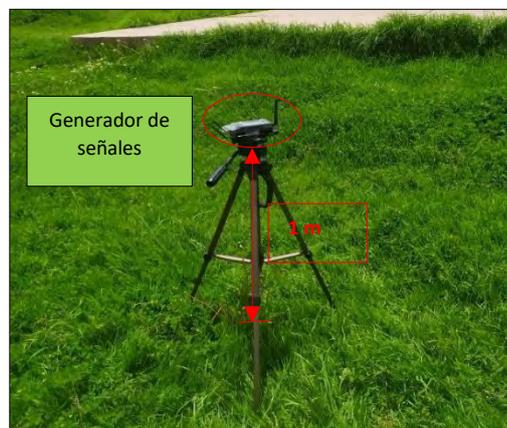


Figura 3.9 Vista lateral de la ubicación del generador de señales (Elaboración propia)

### 3.2.6. Ubicación del servidor de red

El servidor de red para LoRaWAN estuvo instalado en el laboratorio de telecomunicaciones LIISTTI-UNSAAC, en el computador N° 23 asignado para el desarrollo de la tesis.

El computador tenía instalado el sistema operativo de Microsoft Windows 10, memoria RAM de 16GB y una unidad de almacenamiento de estado sólido de 1TB.

### 3.3. Configuración de la red LoRaWAN

Para la implementación de la red de LoRaWAN fue imprescindible tener en cuenta el Decreto Supremo N° 006-2013-MTC [15], ya que limita las frecuencias de transmisión para su respectivo uso.

#### 3.3.1. Configuración de los nodos LoRa

La configuración de los nodos TTGO-T BEAM V0.7 (nodos LoRa) se expresan en la siguiente tabla que resume el proceso de configuración.

Característica	Nodo LoRa 1	Nodo LoRa 2	Nodo LoRa 3
Banda de operación	KR92O	KR92O	KR92O
Frecuencia ascendente (MHz)	922.1, 922.30 y 922.50	922.1, 922.30 y 922.50	922.1, 922.30 y 922.50
Frecuencia descendente (MHz)	923.1	923.1	923.1
Clase	A	A	A
Potencia de transmisión	+ 14 dBm	+ 14 dBm	+ 14 dBm
Ancho de banda	125 KHz	125 KHz	125 KHz
Tipo de activación	ABP	ABP	ABP
Factor de ensanchamiento	7,8,9,10,11,12	7,8,9,10,11,12	7,8,9,10,11,12
Corrección de error de reenvió (CR)	4/5	4/5	4/5
Enlace	Solo ascendente	Solo ascendente	Solo ascendente

Tabla 3.6 Resumen de las características de los nodos LoRa (Elaboración propia)

Para el desarrollo de la anterior tabla se toman en cuenta los siguientes criterios.

- **Instalación de las librerías para LoRaWAN**

La librería instalada fue “MCCI LoRaWAN LMIC library-versión 4.1.1”, debido a que fue la última versión encontrada al momento de configurar los nodos.

- **Frecuencia de operación**

La elección de la banda de operación de cada uno de los nodos LoRa, fue importante para la realización de la tesis, debido a que se está limitado a transmitir en la banda ISM de 915MHz - 928Mhz, según Decreto Supremo. Donde se tuvo múltiples alternativas como banda de transmisión (AS923-4, AS923-3, AS923-2, AS923-1, KR920, AU915); donde se observa que, la mejor alternativa como banda de transmisión para que la red de LoRaWAN estuviera en operación era la banda de KR920, debido a que tiene 3 canales de transmisión ascendentes y descendentes y se adapta a la banda ISM de nuestra región.

- **Enlace ascendente (Uplink):** Los nodos transmitieron los paquetes LoRa en los canales establecidos por protocolo de (922.10 MHz, 922.30MHz y 922.50 MHz).

- **Enlace descendente (Downlink):** Los nodos recibieron los paquetes LoRa en el canal establecido por protocolo de 923.10 MHz.

- **Potencia de transmisión**

Para establecimiento de la potencia de transmisión de los paquetes LoRa, se tomó en cuenta la tabla N° 2.1, donde se muestra los niveles de potencia de transmisión para LoRa usadas por protocolo, e indica que al hacer uso de la banda de transmisión de KR920, la potencia de transmisión es de 14dBm.

- **Ancho de banda**

Para establecimiento del ancho de banda de transmisión de los paquetes LoRa, se tomó en cuenta la tabla N° 2.5, donde se muestra los anchos de banda de transmisión para

LoRa usadas por protocolo, e indica que al hacer uso de la banda de transmisión de KR920, el ancho de banda de transmisión es de 125 KHz.

- **Tipo de activación**

El mecanismo de unión a la red que se uso fue la “activación por personalización” (ABP), debido a que la llave de acceso a la red y la llave de acceso a la aplicación se mantienen fijas, lo que permitió identificar de una manera más fácil y eficiente los nodos al momento de procesar los datos, que a diferencia de la “activación por aire” (OTA) las llaves de acceso a la red y aplicación son dinámicas, lo que haría que sea más difícil procesar la información.

- **Llave de sesión de red y de aplicación**

La llave de sesión de red y de aplicación fueron creadas para cada nodo LoRa, ya que estos datos permiten validar los dispositivos registrados en la puerta de enlace.

- **Factor de ensanchamiento (SF)**

Se usaron todos los factores de ensanchamiento (7,8,9,10,11,12) admitidos para LoRaWAN, debido a que se realizaron múltiples pruebas experimentales.

- **Factor corrección de errores de reenvío (CR)**

El valor de factor corrección de errores de reenvío con el que se trabajó fue  $CR = 4/5$ , porque es el más usado y recomendado para LoRaWAN.

- **Clase**

Para el desarrollo de la tesis se usó la clase A.

### 3.3.2. Configuración de la puerta de enlace LoRa

La configuración de la puerta de enlace se expresa en la siguiente tabla que resume el proceso de configuración.

Característica	Wisgate lite 2
Banda de operación	KR920
Frecuencia ascendente (MHz)	922.10, 922.30 y 922.50
Frecuencia descendente (MHz)	923.1
Clase	A y C
Potencia de transmisión	+ 23 dBm
Ancho de banda	125 KHz
Tipo de activación	ABP y OTA
Factor de ensanchamiento	9
Enlace	Ascendente y descendente
CR	4/5

*Tabla 3.7 Resumen de las características de la puerta de enlace LoRa (Elaboración propia)*

Para el desarrollo de la anterior la anterior tabla, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones.

- **Plan de frecuencia**

El plan de frecuencia de la puerta de enlace LoRa, fue establecida según las características de transmisión de los nodos LoRa, los cuales estuvieron establecidos en KR920.

- **Frecuencia de recepción**

Para la configuración de los canales de recepción se tomó en cuenta la tabla N°3.6 de la configuración de los nodos LoRa, donde las frecuencias de los canales de recepción para la puerta de enlace fueron establecidas en las frecuencias de 922.1 MHz, 922.30 MHz y 922.50 MHz.

- **Ancho de banda del canal de recepción**

Para la configuración del ancho de banda para cada canal de recepción, se tomó en cuenta la tabla N°3.6 de la configuración de los nodos LoRa, donde cada canal de recepción fue establecido a un ancho de banda de 125KHz.

- **Factor de ensanchamiento**

Cada canal de recepción de la puerta de enlace, fue establecido para que pueda recibir todos los factores de ensanchamiento admitidos por LoRaWAN.

- **Clases**

La puerta de enlace para canal establecido, por defecto admite las clases A y C, por lo que no fue necesario la configuración del mismo.

- **Canal de transmisión de enlace descendente**

En caso de que la puerta de enlace tuviera que enviar algún mensaje hacia algún nodo LoRa, por defecto estaría configurado con un SF9, frecuencia descendente de 923.1MHz, ancho de banda de 125KHz y una potencia de transmisión de 23dBm.

### **3.3.3. Configuración del generador de radiofrecuencia**

Para la configuración del generador de OEM ERASynth Micro, se tomó en cuenta las siguientes consideraciones.

- **Frecuencia**

El canal de transmisión del generador de ondas electromagnéticas ERASynth fue establecido en los 922.3 MHz, porque es la frecuencia que se usó para realizar las pruebas experimentales.

- **Potencia**

La potencia de transmisión que se usó para las pruebas experimentales fue variable, debido a que hubo la necesidad de incrementar o reducir la potencia de transmisión para alcanzar niveles de interferencia de -65dbm, -70dbm, -75dbm, -80dbm y -85dbm,

según la prueba experimental a desarrollar.

- **Señal interferente**

Como señal interferente se envió un tren de pulsos debido a que es el que mejor representa a una señal interferente proveniente de un origen desconocido.



*Figura 3.10 Configuración del generador de señales (Elaboración propia)*

## CAPITULO IV

### PRUEBAS Y RESULTADOS

Antes de realizar las pruebas experimentales se realizó una verificación de la configuración de todos los parámetros establecidos de la red y una evaluación de la banda ISM de 915 – 928 MHz.

#### 4. Nivel de piso de ruido para el canal inalámbrico de transmisión de los nodos LoRa

Se conoce que un canal inalámbrico está conformado por un conjunto de frecuencias con un ancho de banda determinado, estos canales de transmisión están expuestos a una serie de señales de RF no deseadas, o también conocido como piso de ruido con una intensidad determinada.

Para realizar uno de los objetivos de la tesis, se procedió a usar el analizador de espectros para evaluar el estado del espectro en la banda ISM de 915-928 MHz.

Como resultado de la evaluación, se encontró que la banda ISM estaba libre de transmisores de OEM, debido a que en nuestra región aún es poco conocida.

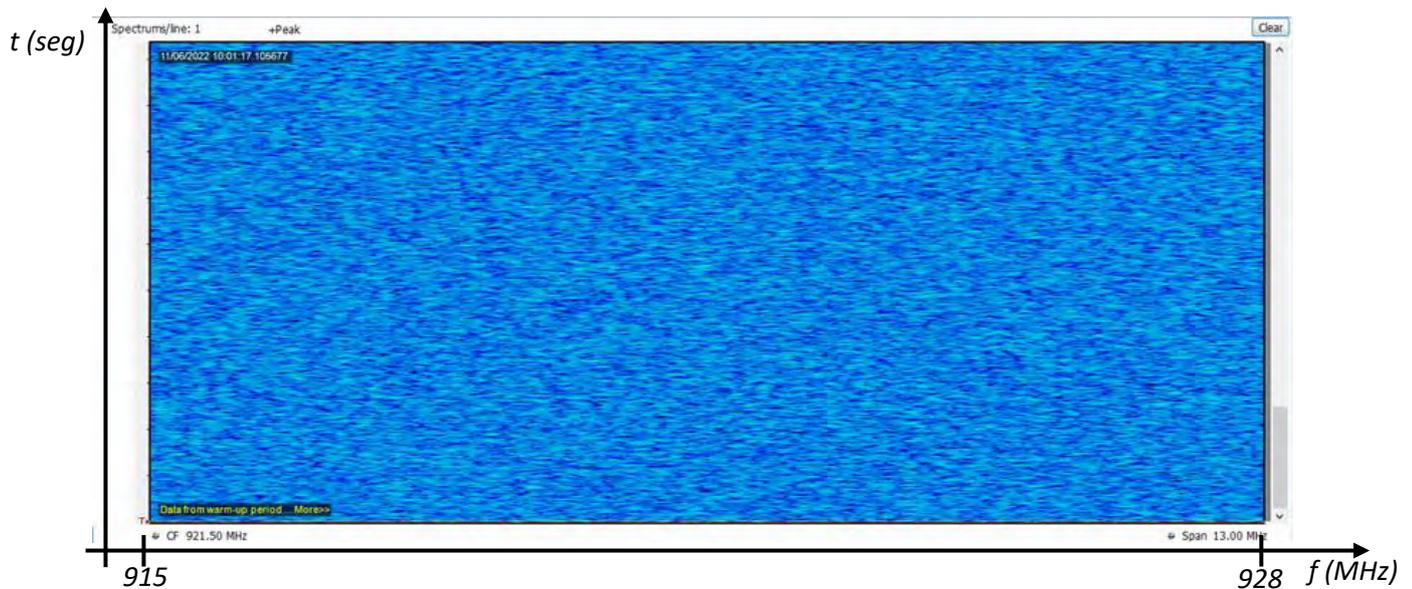


Figura 4.1 Espectrograma de la banda de 915-928 MHz (Elaboración propia)

Asimismo, se encontró que el nivel de piso de ruido para los canales de transmisión tenía una potencia promedio de -90.96 dBm, que en comparación a otras bandas de transmisión es considerablemente baja, debido a que en la banda de transmisión al momento de realizar las pruebas de evaluación aún no había dispositivos que realicen uso de este medio.

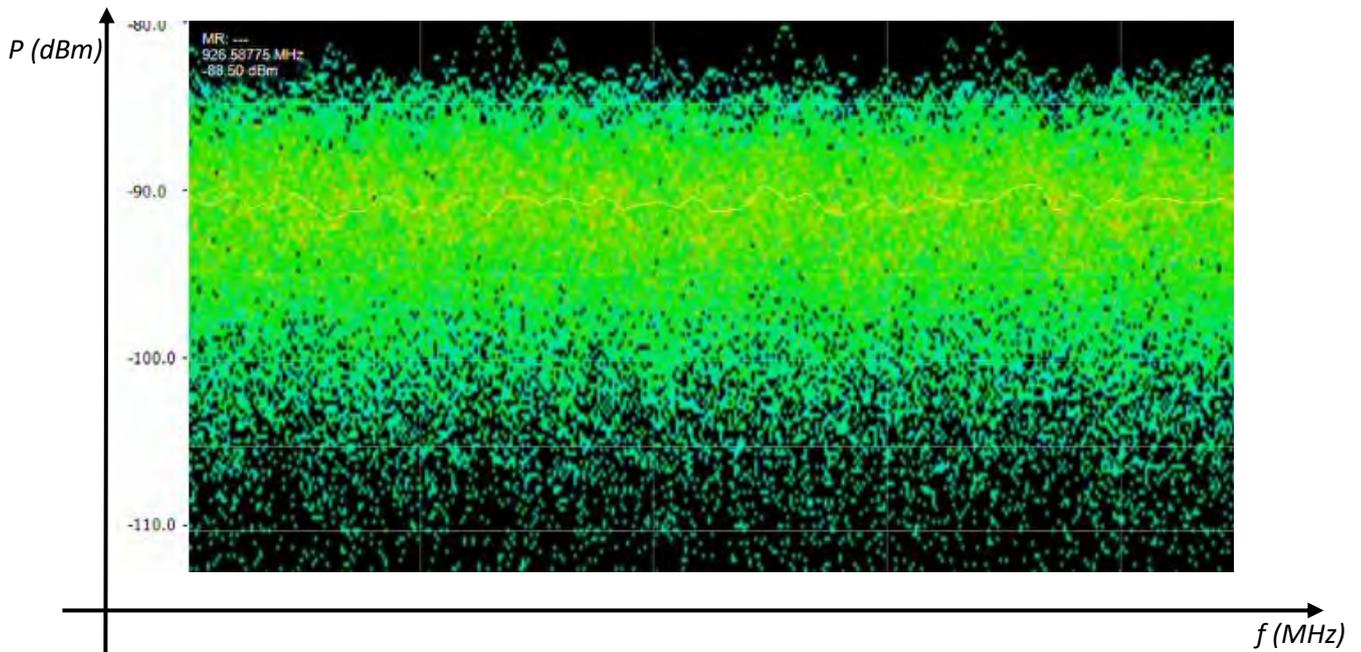
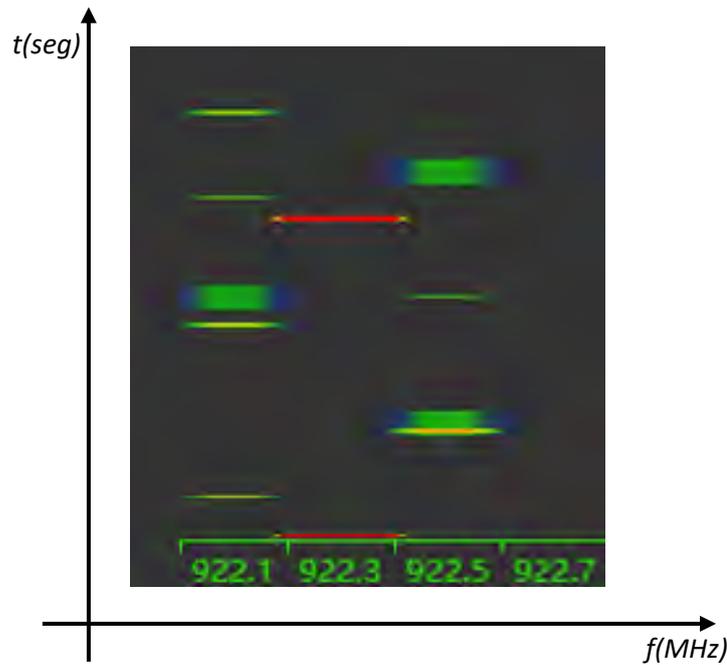


Figura 4.2 Piso de ruido del canal de transmisión (Elaboración propia)

#### 4.1. Pruebas de operatividad de la red LoRaWAN y generador de RF

##### ❖ Verificación de los nodos LoRa

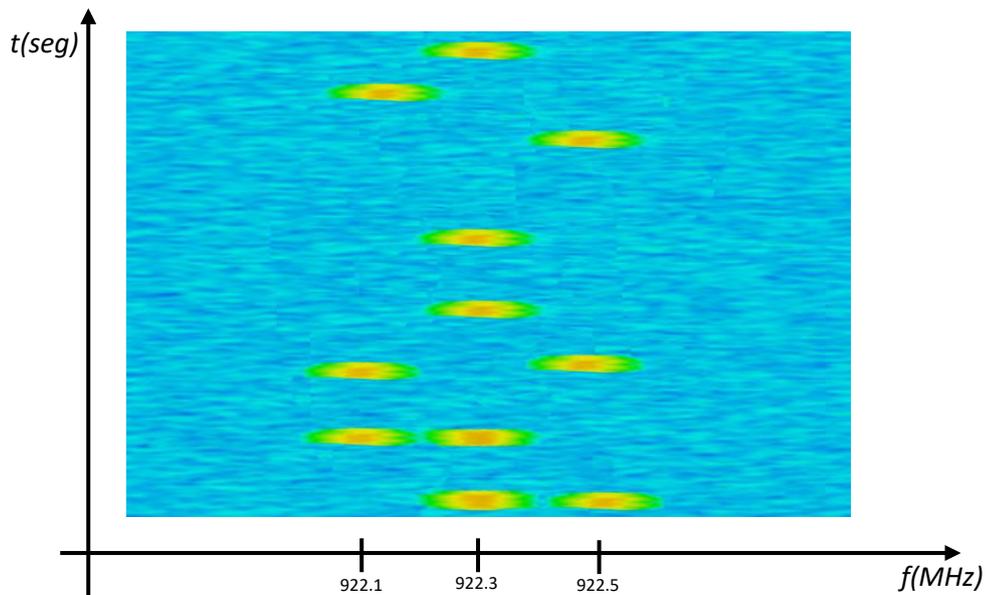
Antes de poner en operación la red LoRaWAN, se llevaron a cabo pruebas de conectividad de los nodos LoRa con la puerta de enlace. Durante estas pruebas, se verificó que los parámetros establecidos estuvieran correctamente configurados, entre los cuales, la potencia de transmisión, factor de ensanchamiento, canales de transmisión (ascendente y descendente) y código de detección de error estuvieron correctos desde la primera prueba.



*Figura 4.3 Verificación de parámetros de los nodos LoRa (Elaboración propia)*

En la figura 4.3 se ilustra los paquetes LoRa recibidos en la puerta de enlace en los canales de transmisión de 922.1 MHz, 922.3 MHz y 922.5 MHz, además, muestra el tiempo de duración de cada paquete de acuerdo al factor de ensanchamiento.

Asimismo, la siguiente imagen muestra los paquetes LoRa transmitidos por los nodos LoRa y vistos a través del analizador de espectros.



*Figura 4.4 Espectrograma de los paquetes LoRa transmitidos (Elaboración propia)*

### ❖ Verificación de los paquetes LoRa

En la siguiente tabla muestra la verificación de los paquetes LoRa recibidos con sus respectivos parámetros.

	Time	Freq.	RSSI	SNR	TxPwr	CRC	mod.	CR	DataRate	FCnt	AirTime	DevAddr	FPort
↕	10:46:30	922.5	-91	-5.8	-	CRC_OK	LORA	4/5	SF9BW125	45	206	260C5EF9	1
↕	10:46:18	922.1	-92	-6.8	-	CRC_OK	LORA	4/5	SF9BW125	43	206	260C5EF9	1
↕	10:46:11	922.5	-91	-5.5	-	CRC_OK	LORA	4/5	SF9BW125	42	206	260C5EF9	1
↕	10:46:59	922.1	-90	-5.5	-	CRC_OK	LORA	4/5	SF9BW125	40	206	260C5EF9	1

Tabla 4.1 Verificación de datos en la puerta de enlace LoRa (Elaboración propia)

### ❖ Verificación de la señal interferente

La siguiente imagen muestra la verificación del espectro de la señal interferente.

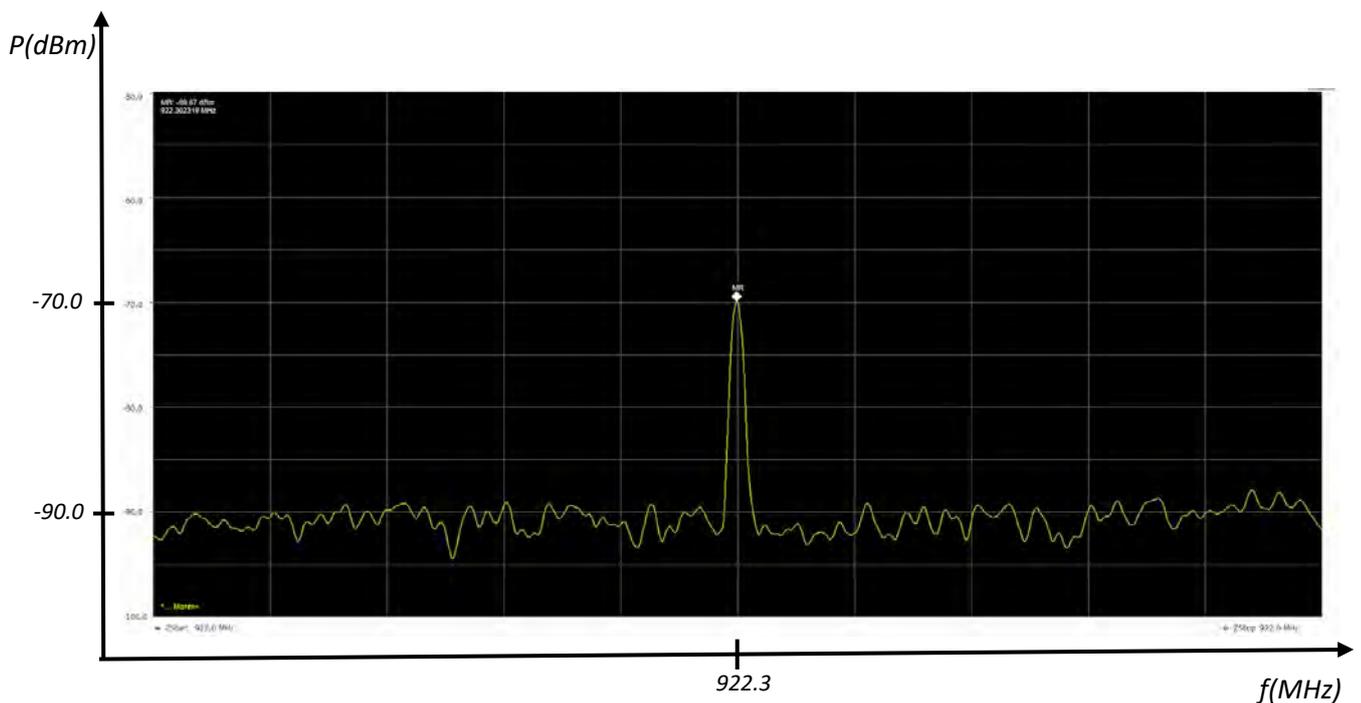


Figura 4.4.1 Espectro de la señal interferente

## 4.2. Pruebas experimentales con interferencia co-canal

Como el diseño experimental indica, se estableció los canales de transmisión para el nodo LoRa y el generador en un mismo canal, razón por la cual, ambos dispositivos se configuraron en el canal de transmisión de 922.3 MHz.

Una vez determinado el canal de transmisión para llevar a cabo las pruebas experimentales, se ubicó el nodo LoRa en las coordenadas 13°31'18"S / 71°57'34"W, el generador de ondas se posicionó en las coordenadas 13°31'16"S / 71°57'26"W, mientras que la puerta de enlace se instaló en las instalaciones del laboratorio, además, la potencia del generador de ondas de RF fue establecido de manera que en la puerta de enlace LoRa estuviera expuesta a niveles de interferencia de -85dBm, -80dBm, -75dBm, -65dBm, -60dBm, y hasta que el porcentaje de paquetes recibidos correctamente sea nulo, a razón de que el nivel de piso de ruido encontrado tenía un potencia promedio de -90.96 dBm.

La siguiente tabla muestra la configuración de los dispositivos.

<b>Configuración</b>	<b>Nodo LoRa</b>	<b>Generador de ondas</b>
<b>Potencia de transmisión</b>	+ 14dBm	Variable para cada factor de ensanchamiento
<b>Canal de transmisión</b>	922.3 MHz	922.3 MHz
<b>Ubicación</b>	13°31'19"S y 71°57'34"W	13°31'16"S y 71°57'26"W
<b>Distancia hacia la puerta de enlace</b>	285.45 metros	40.55 metros
<b>Factor de ensanchamiento</b>	Variable para cada nivel de interferencia.	-
<b>Tipo de onda</b>	Espectro ensanchado	Tren de Pulsos

*Tabla 4.2 Configuración de los dispositivos para la prueba experimental*

Una vez concluido con la configuración de los dispositivos y de acuerdo con el diseño experimental, se sometió a prueba cada uno de los factores de ensanchamiento para cada nivel de interferencia propuesto, como se muestra en la siguiente tabla:

Nivel de interferencia en la puerta de enlace LoRa	Factor de ensanchamiento del nodo LoRa
- 85 dBm	7,8,9,10,11,12
- 80 dBm	7,8,9,10,11,12
- 75 dBm	7,8,9,10,11,12
- 70 dBm	7,8,9,10,11,12
- 65 dBm	7,8,9,10,11,12
- 60 dBm	7,8,9,10,11,12

Tabla 4.3 Tabla guía para las pruebas experimentales

#### 4.2.1. Resultados de las pruebas experimentales por interferencia co-canal

Como resultado de las pruebas experimentales realizadas se obtuvo la siguiente imagen, que muestra el espectro del paquete LoRa enviado y el espectro de la señal interferente, ambos ocupando un mismo canal de transmisión.

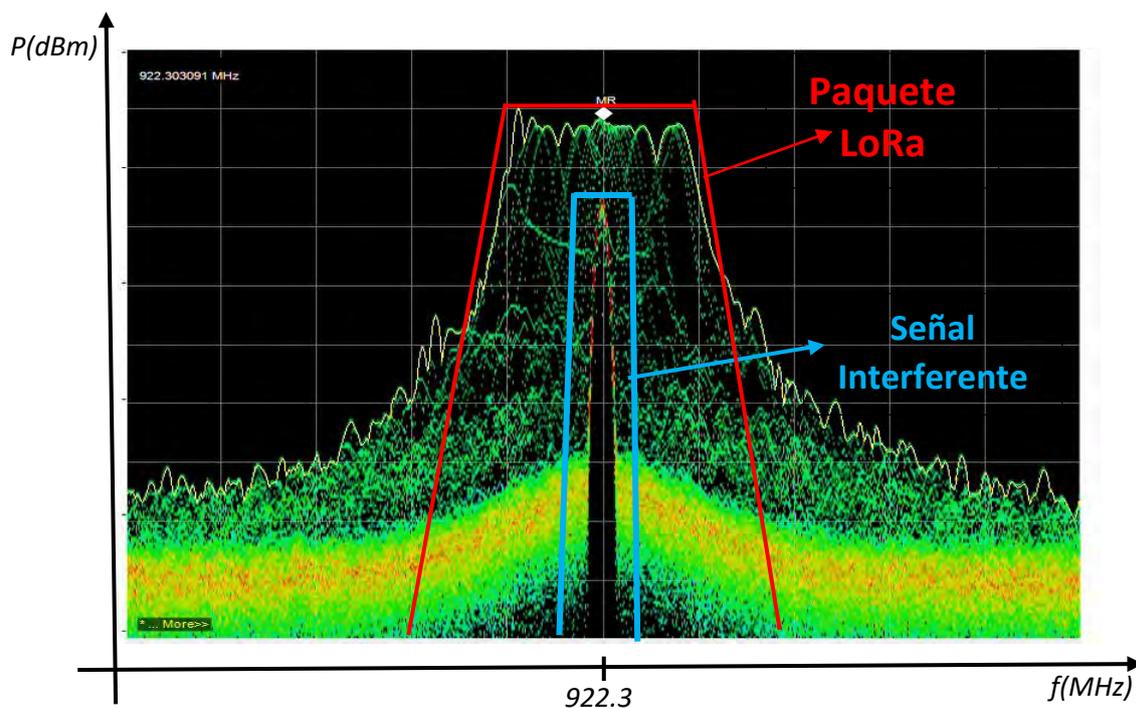
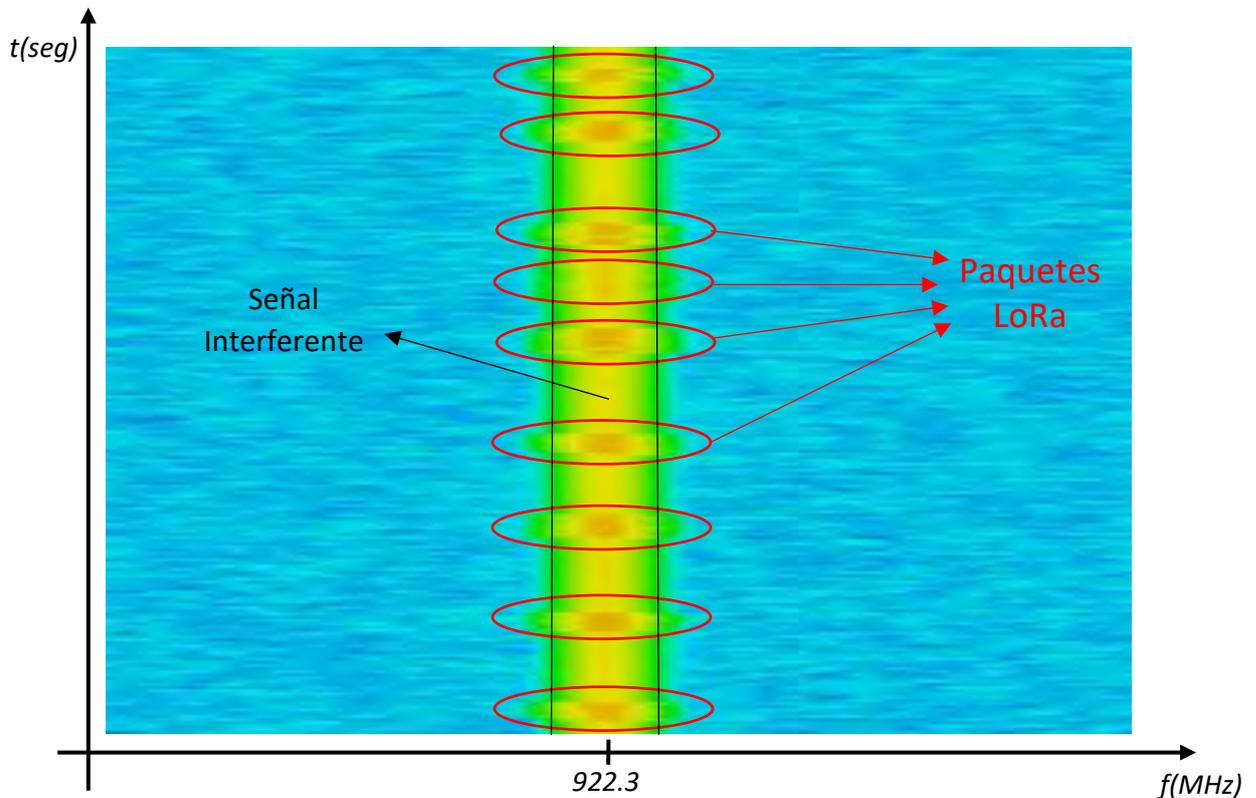


Figura 4.5 Espectrograma de interferencia co-canal (Elaboración propia)

La Figura N° 4.5 presenta el espectro del paquete LoRa enviado con un factor de ensanchamiento de 7 y una potencia de transmisión de 14 dBm, expuesta a un nivel de interferencia de -70 dBm, ambas señales ocupando el mismo canal de transmisión.

De manera similar, la siguiente figura muestra el espectrograma del canal inalámbrico, donde se puede observar los paquetes LoRa enviados y la señal interferente, ambos ocupando el mismo canal de transmisión.



*Figura 4.6 Espectrograma de interferencia por co-canal (Elaboración propia)*

La figura 4.6 representa el espectrograma de los paquetes LoRa que están enmarcados con elipses de color rojo e igualmente el de la señal interferente enmarcado entre las líneas de color negro, ambas señales ocupando el mismo canal de transmisión.

#### **4.2.1.1. Análisis**

De las pruebas experimentales realizadas, se observó que la capa física de LoRaWAN (modulación y canal inalámbrico), ayudaron en gran medida a tolerar la interferencia a la cual estuvo expuesta en el canal de transmisión.

- **Canal inalámbrico**

Se encontraba sin dispositivos irradiadores de OEM y con una potencia de piso de ruido baja.

▪ **La modulación**

Las modulaciones de espectro ensanchado brindan una alta resistencia a la interferencia. Sin embargo, LoRa se destaca aún más entre otras modulaciones debido a la forma única de su modulación, lo que le otorga una mayor capacidad para resistir interferencias.

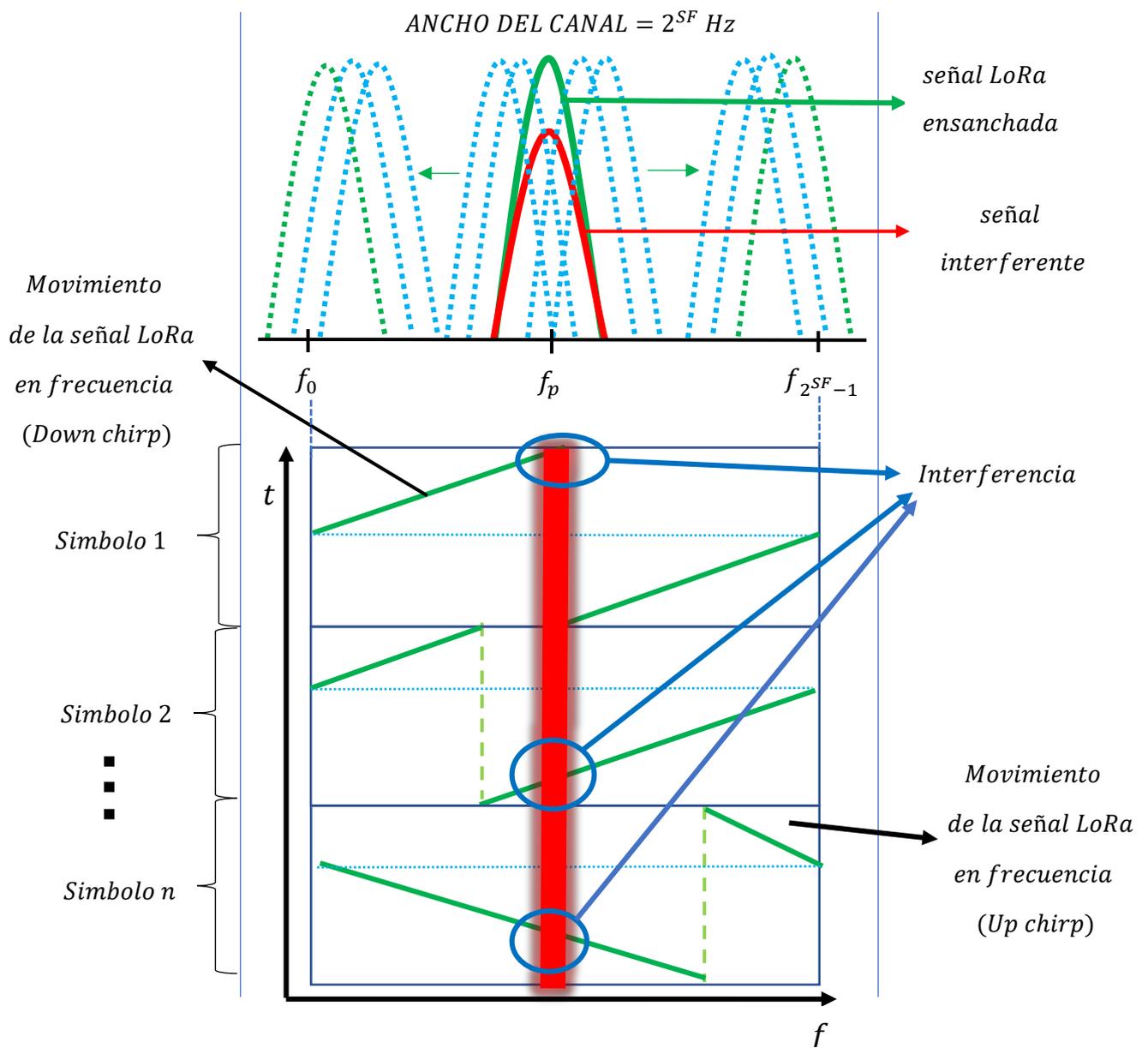
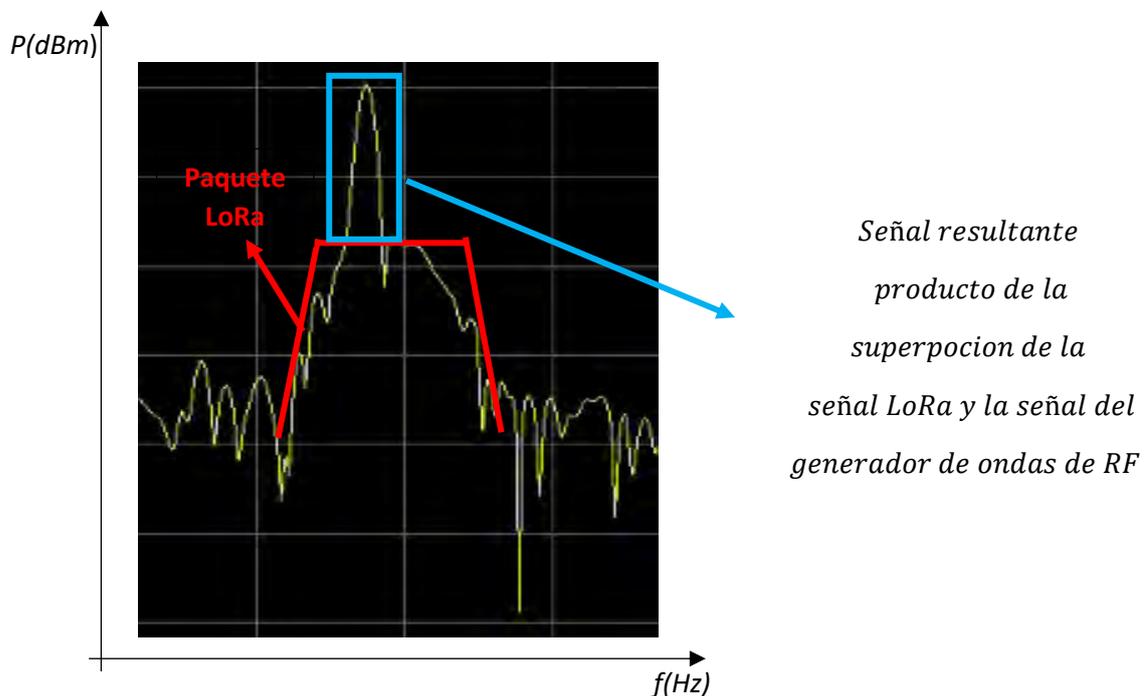


Figura 4.7 Señal LoRa en presencia de interferencia (Elaboración propia)

En la imagen anterior, se puede observar la representación del espectrograma del paquete LoRa representada con líneas verdes que realizan movimientos continuos de cambio de frecuencia en función del tiempo, presentando chirridos ascendentes (up chirp) o chirridos descendentes (down chirp), los cuales están vinculados al valor de su símbolo en un instante de tiempo. Asimismo, también se observa el espectrograma de la señal interferente representada por la línea roja manteniendo una frecuencia constante en el tiempo.

La imagen en conjunto representa a la interferencia co-canal, donde se aprecia a ambas señales ocupando un mismo canal de transmisión, produciendo interferencia en el instante que la señal LoRa y la señal del generador de radiofrecuencia coinciden en una misma frecuencia del canal inalámbrico como se señala en los círculos azules, el producto de la superposición de ambas señales genera una nueva señal con un valor de potencia, resultado de la suma de ambas señales.



*Figura 4.8 Espectro de la señal resultante producto de la interferencia (Elaboración propia)*

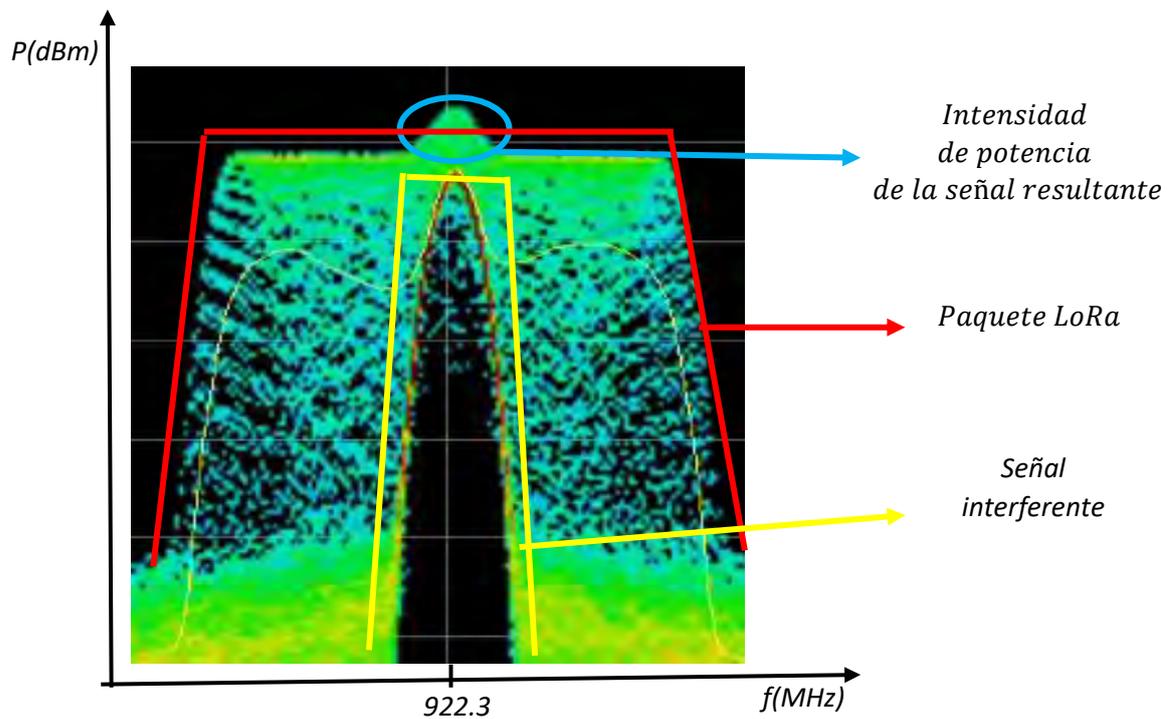


Figura 4.9 Intensidad de potencia producto de la interferencia (Elaboración propia)

#### 4.2.1.2. Comportamiento del RSSI

De la teoría, el RSSI es un indicador usado para medir el nivel de potencia de señal recepcionada por un dispositivo de red inalámbrico, pero, este parámetro está relacionado directamente a la distancia existente entre transmisor y receptor.

De la prueba experimental realizada se obtuvieron los siguientes datos, cuyos valores fueron calculados sumando todos los valores de RSSI de los paquetes LoRa recibidos y divididos entre el número de paquetes recibidos.

$$RSSI_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n RSSI_{i(paquetes\ recibidos)}}{n}$$

Factor de ensanchamiento	Niveles de interferencia	RSSI promedio
7,8,9,10,11,12	-85 dBm	-79.64 dBm
7,8,9,10,11,12	-80 dBm	-79.21 dBm
7,8,9,10,11,12	-75 dBm	-79.86 dBm
7,8,9,10,11,12	-70 dBm	-79.53 dBm
7,8,9,10,11,12	-65 dBm	-78.96 dBm
7,8,9,10,11,12	Sin Interferencia	-79.48 dBm

Tabla 4.4 RSSI promedio recibido según el nivel de interferencia (Elaboración propia)

Niveles de interferencia (dBm)	Factor de ensanchamiento	RSSI promedio
-85,-80,-75,-70,-65	7	-79.23 dBm
-85,-80,-75,-70,-65	8	-79.09 dBm
-85,-80,-75,-70,-65	9	-79.54 dBm
-85,-80,-75,-70,-65	10	-79.76 dBm
-85,-80,-75,-70,-65	11	-78.64 dBm
-85,-80,-75,-70,-65	12	-78.53 dBm
-	Sin interferencia	-79.48 dBm

Tabla 4.5 RSSI promedio recibido según el factor de ensanchamiento (Elaboración propia)

De las tablas mostradas se puede observar que los valores de RSSI obtenidos no sufren alteraciones significativas en sus valores, lo que nos permite afirmar que este parámetro LoRa no se ve afectado por la interferencia.

#### 4.2.1.3. Comportamiento de la relación señal a ruido (SNR)

De la teoría, la relación señal a ruido expresa la razón entre la potencia media de señal recibida y el nivel de potencia media del piso de ruido.

Antes de llevar a cabo las pruebas experimentales, fue necesario determinar la relación señal a ruido para cada factor de ensanchamiento en ausencia de interferencia. Los resultados recopilados se muestran en la siguiente tabla, estos fueron calculados sumando todos los valores de SNR de los paquetes LoRa recibidos y divididos entre el número de paquetes recibidos.

$$SNR_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n SNR_{i(Paquetes\ recibidos)}}{n}$$

Factor de ensanchamiento	7	8	9	10	11	12
SNR promedio	10.3dB	9.9dB	9.75dB	9.53dB	8.86dB	8.43dB

Tabla 4.6 SNR promedio recibido para factor de ensanchamiento en ausencia de interferencia (Elaboración propia)

Por otro lado, como resultado de las pruebas experimentales realizadas se obtuvo la siguiente tabla que expresa la cantidad de paquetes LoRa recibidos en relación al total de paquetes enviados según el factor de ensanchamiento para cada nivel de interferencia al cual estuvieron expuestos.

Nivel de interferencia	Factor de ensanchamiento					
	7	8	9	10	11	12
-85 dBm	100 %	100%	100%	100%	100%	100%
-80 dBm	100 %	100%	100%	100%	100%	100%
-75 dBm	100 %	100%	100%	100%	100%	100%
-70 dBm	100 %	100%	100%	100%	100%	100%
-65 dBm	10%	20%	25%	27%	100%	100%
-60 dBm	0%	0%	0%	0%	19%	20%
-55 dBm	0%	0%	0%	0%	0%	0%

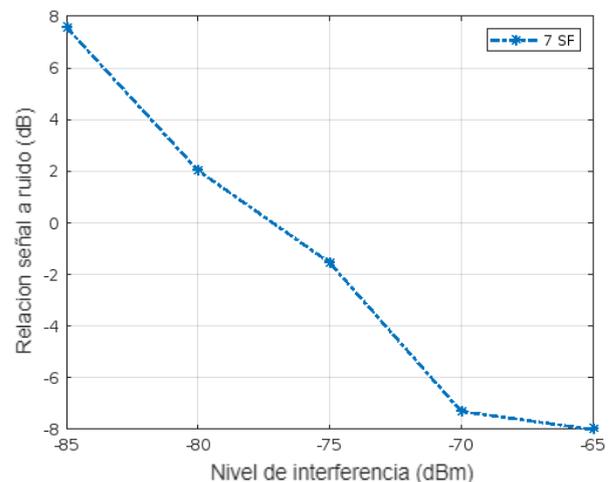
Tabla 4.7 Porcentaje de paquetes recibidos para cada factor de ensanchamiento según el nivel de interferencia (Elaboración propia)

A partir de las pruebas experimentales, se generaron tablas y gráficos que ilustran cómo varía la relación señal a ruido en función del factor de ensanchamiento para diferentes niveles de interferencia. Los valores necesarios para el cálculo se obtuvieron mediante la suma de todos los valores de SNR de los paquetes recibidos y divididos entre el número de paquetes recibidos.

$$SNR_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n SNR_i(\text{Paquetes recibidos})}{n}$$

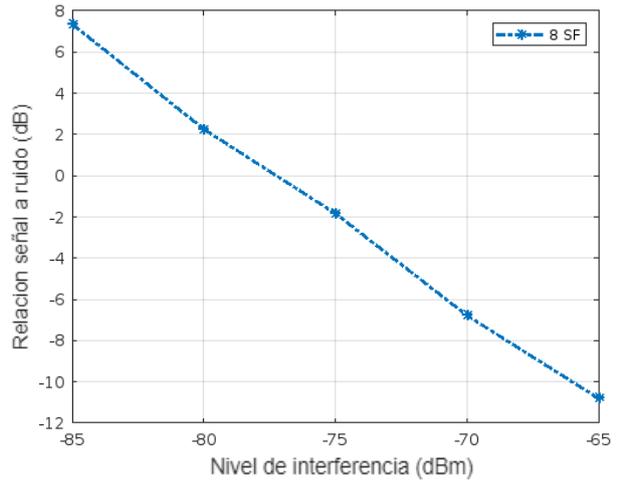
Nivel de interferencia	SNR promedio
-85 dBm	7.58 dB
-80 dBm	2.04 dB
-75 dBm	-1.54 dB
-70 dBm	-7.3 dB
-65 dBm	-8 dB
-60 dBm	-

Tabla 4.8 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 7



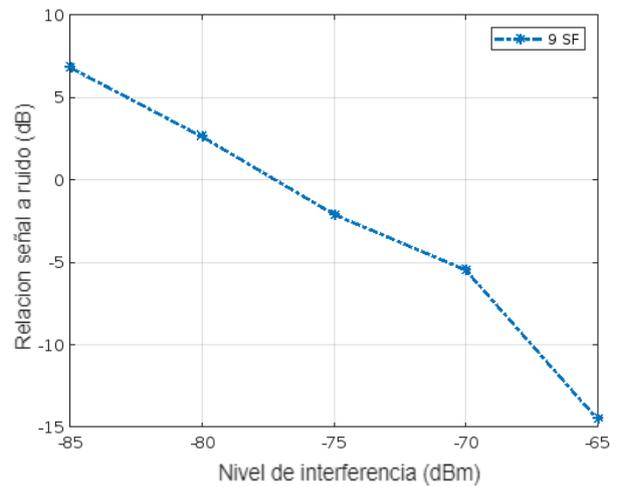
Nivel de interferencia	SNR promedio
-85 dBm	7.37 dB
-80 dBm	2.26 dB
-75 dBm	-1.82 dB
-70 dBm	-6.78 dB
-65 dBm	-10.8 dB
-60 dBm	-

Tabla 4.9 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 8



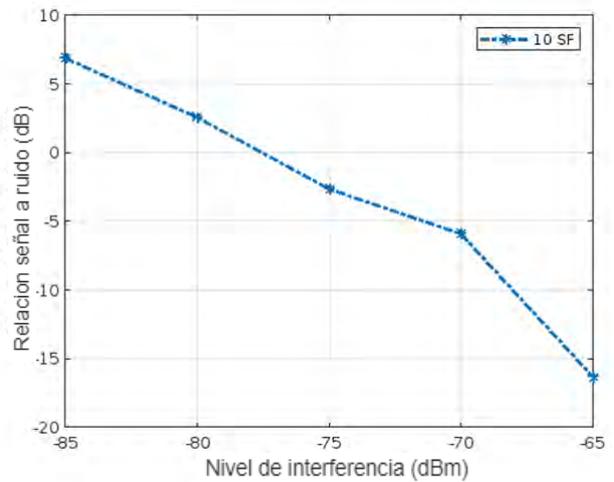
Nivel de interferencia	SNR promedio
-85 dBm	6.81 dB
-80 dBm	2.62 dB
-75 dBm	-2.08 dB
-70 dBm	-5.45 dB
-65 dBm	-14.5 dB
-60 dBm	-

Tabla 4.10 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 9



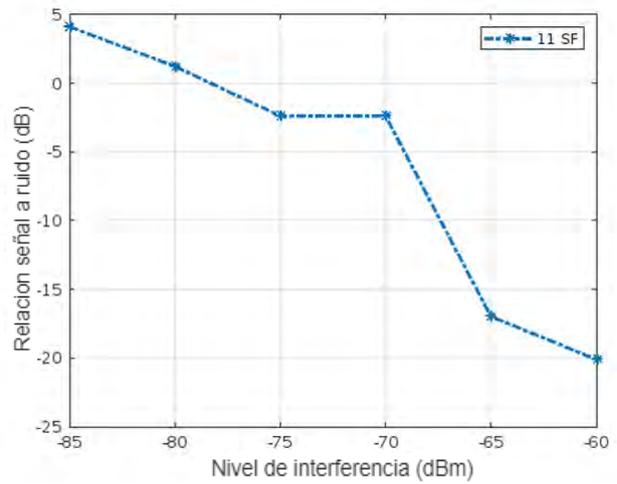
Nivel de interferencia	SNR promedio
-85 dBm	6.88 dB
-80 dBm	2.57 dB
-75 dBm	-2.63 dB
-70 dBm	-5.89 dB
-65 dBm	-16.22 dB
-60 dBm	-

Tabla 4.11 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 10



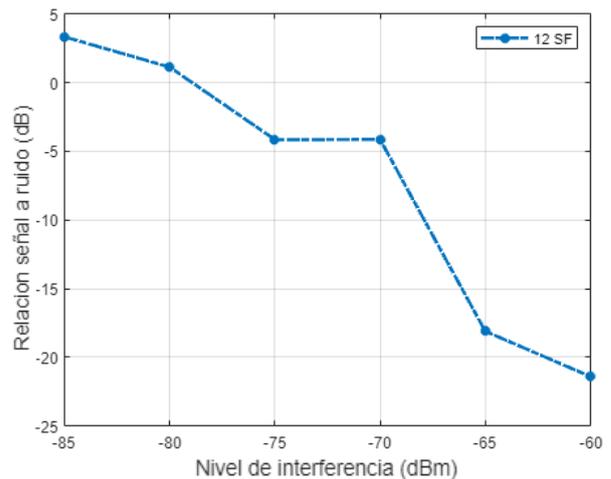
Nivel de interferencia	SNR promedio
-85 dBm	4.12 dB
-80 dBm	1.25 dB
-75 dBm	-2.37 dB
-70 dBm	-2.38 dB
-65 dBm	-14.5 dB
-60 dBm	-20.1 dB

Tabla 4.12 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 11



Nivel de interferencia	SNR promedio
-85 dBm	3.34 dB
-80 dBm	1.14 dB
-75 dBm	-4.14 dB
-70 dBm	-4.15 dB
-65 dBm	-18.1 dB
-60 dBm	-21.4 dB

Tabla 4.13 SNR en función de los niveles de interferencia para un SF 12

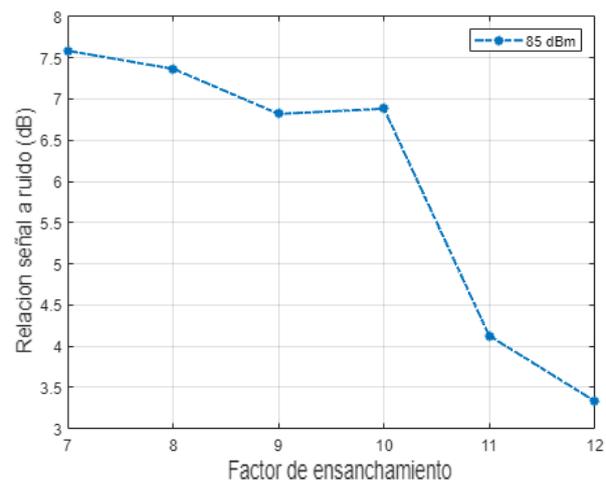


Los resultados obtenidos a partir de las tablas e imágenes presentadas muestran un patrón permanente: a medida que se incrementa el nivel de interferencia, la relación señal a ruido disminuye para cada valor del factor de ensanchamiento analizado. Además, se observa que un bajo nivel de interferencia y un menor factor de ensanchamiento conlleva a una mejora significativa en la relación señal a ruido. Esta disminución en la relación SNR a medida que la interferencia aumenta se debe a la mayor presencia de distorsiones en la señal, lo cual afecta negativamente la calidad de la señal.

Por otro lado, se logra mitigar en gran medida los efectos adversos producidos por la interferencia, esto debido al margen de relación señal a ruido admitido por cada factor de ensanchamiento. En este punto crítico, incluso con valores bajos de factor de ensanchamiento, la interferencia se convierte en el factor dominante que limita la calidad de la señal y, en consecuencia, la relación señal a ruido, como se muestra en las siguientes tablas e imágenes.

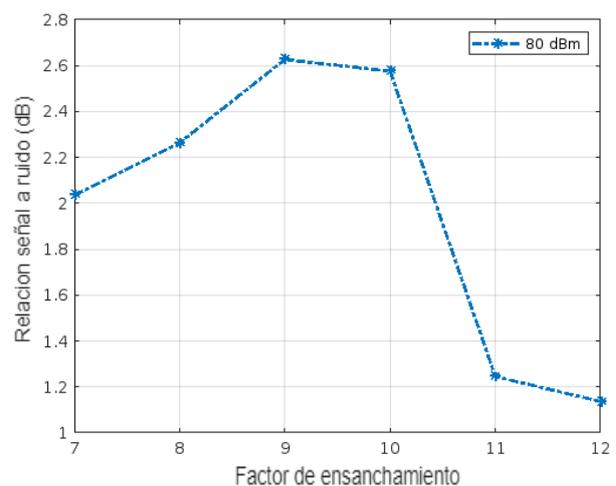
<b>Factor de ensanchamiento</b>	<b>SNR promedio</b>
<b>7</b>	7.58 dB
<b>8</b>	7.37 dB
<b>9</b>	6.82 dB
<b>10</b>	6.88 dB
<b>11</b>	4.12 dB
<b>12</b>	3.34 dB

*Tabla 4.14 SNR en función del SF para un nivel de interferencia de -85 dBm*



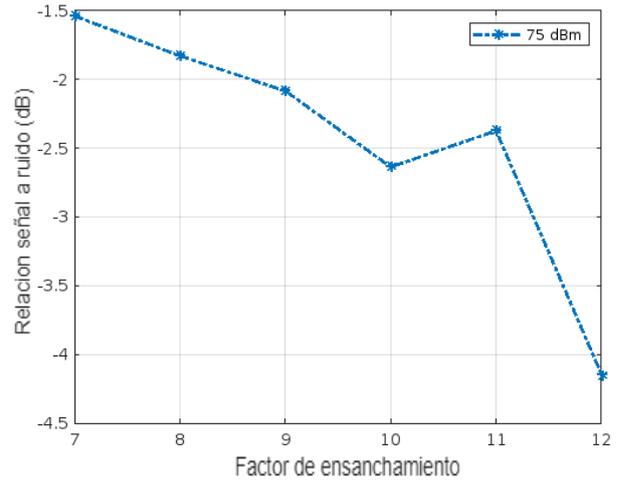
<b>Factor de ensanchamiento</b>	<b>SNR promedio</b>
<b>7</b>	2.04 dB
<b>8</b>	2.26 dB
<b>9</b>	2.62 dB
<b>10</b>	2.58 dB
<b>11</b>	1.25 dB
<b>12</b>	1.14 dB

*Tabla 4.15 SNR en función del SF para un nivel de interferencia de -80 dBm*



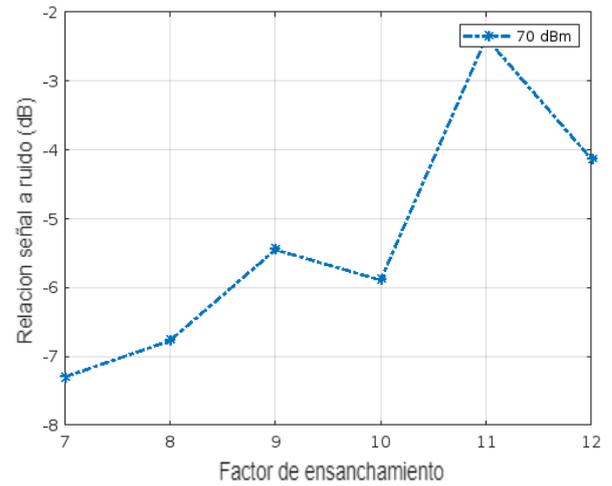
<b>Factor de ensanchamiento</b>	<b>SNR promedio</b>
7	-1.54 dB
8	-1.82 dB
9	-2.08 dB
10	-2.64 dB
11	-2.37 dB
12	-4.14 dB

Tabla 4.16 SNR en función del SF para un nivel de interferencia de -75 dBm



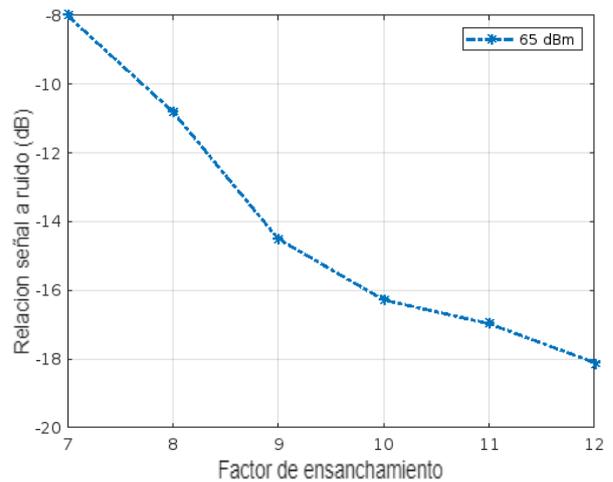
<b>Factor de ensanchamiento</b>	<b>SNR promedio</b>
7	-7.3 dB
8	-6.78 dB
9	-5.45 dB
10	-5.89 dB
11	-2.37 dB
12	-4.13 dB

Tabla 4.17 SNR en función del SF para un nivel de interferencia de -70 dBm



<b>Factor de ensanchamiento</b>	<b>SNR promedio</b>
7	-8 dB
8	-10.8 dB
9	-14.5 dB
10	-16.28 dB
11	-16.97 dB
12	-18.1 dB

Tabla 4.18 SNR en función del SF para un nivel de interferencia de -65 dBm



#### 4.2.1.4. Capacidad de transferencia de datos

De las pruebas experimentales realizadas y obtención del comportamiento de la relación señal a ruido, y mediante el teorema de Shannon-Hartley, se calculó la capacidad de transferencia de datos según los niveles de interferencia y factores de ensanchamiento.

$$C = B * \log_2(1 + S/N)$$

Donde:

C = Capacidad de canal (bit/s).

B = Ancho de banda.

S = Potencia media de la señal recibida (vatios).

N = Potencia media de ruido o interferencia (vatios).

S/N = Relación de señal a ruido (SNR).

Capacidad de transferencia de datos según el nivel de interferencia para cada factor de ensanchamiento.

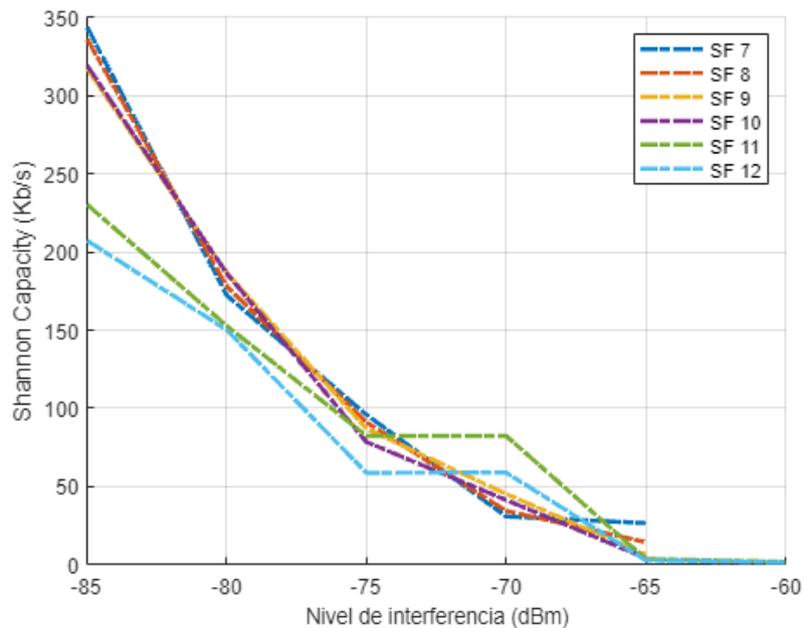
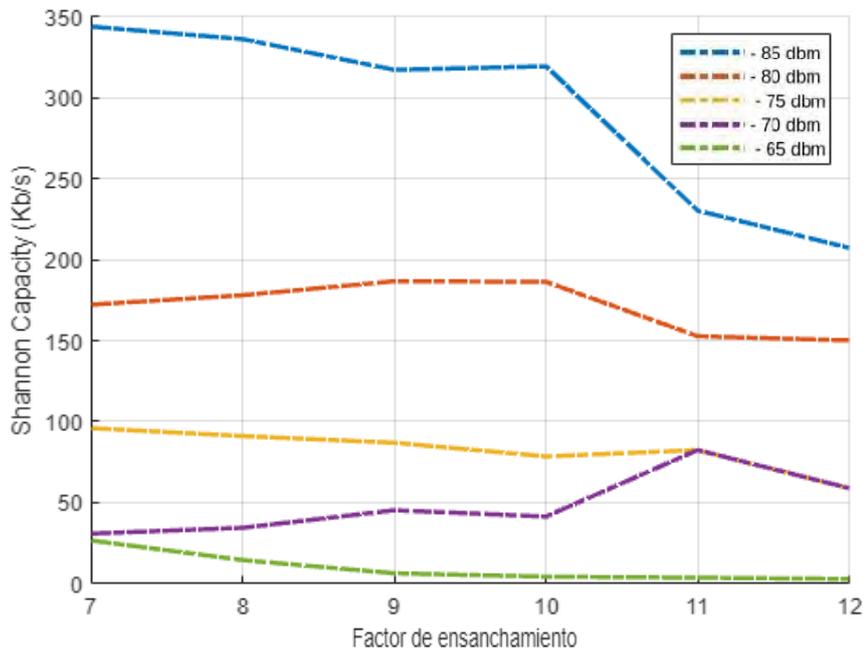


Figura 4.10 Capacidad de transferencia de datos según el nivel de interferencia para cada factor de ensanchamiento (Elaboración propia)



*-Figura 4.11 Capacidad de transferencia de datos según el a factor de ensanchamiento para cada nivel de interferencia (Elaboración propia)*

Al analizar la figura mostrada, se puede observar que a medida que el nivel de interferencia y el factor de ensanchamiento aumentan, la capacidad de transferencia de datos disminuye. Sin embargo, es importante destacar que cada factor de ensanchamiento presentó una capacidad de transferencia de datos diferente, dependiendo del nivel de interferencia al que estuvo expuesto, ya que está en proporción directa al ancho de banda y a la relación señal a ruido.

### 4.3. Pruebas experimentales con interferencia por canal adyacente

Para dar inicio a las pruebas experimentales, se revisó el concepto de interferencia por canal adyacente del marco teórico, en el cual indica que, para la existencia de interferencia por canal adyacente, parte de las señales producidas por transmisores diferentes invaden el canal de transmisión de otra señal.

Como el diseño experimental indica, se usó los 3 nodos LoRa, con dos canales de transmisión (922.1 MHz y 922.5 MHz), y frecuencia de transmisión para la señal interferente en los 922.25 MHz.

Asimismo, cada nodo LoRa fue configurado para que opere con un factor de ensanchamiento distinto y situado en la ubicación determinada en las pruebas de reconocimiento, la potencia del generador de ondas de RF fue establecido de manera que, la puerta de enlace LoRa tuviera un nivel de potencia de señal interferente de - 65dBm.

Para la realización de la prueba experimental, los dispositivos de la red estuvieron configurados de la siguiente manera.

<b>Configuración</b>	<b>Nodo LoRa 1</b>	<b>Nodo LoRa2</b>	<b>Nodo LoRa 3</b>
<b>Potencia de transmisión</b>	14dBm	14dBm	14dBm
<b>Canal de transmisión</b>	922.1 MHz, 922.5MHz	922.1 MHz y 922.5MHz	922.1 MHz, 922.5MHz
<b>Ubicación</b>	13°31'15"S y 71°57'37"W	13°31'18"S y 71°57'29"W	13°31'21"S y 71°57'27"W
<b>Distancia hacia la puerta de enlace</b>	381.21 metros	376.94 metros	181.25 metros
<b>Factor de ensanchamiento</b>	12	9	7
<b>Puerta de enlace expuesta a un nivel de interferencia de</b>	- 65 dBm	- 65 dBm	- 65 dBm

*Tabla 4.19 Configuración de los nodos LoRa para pruebas experimentales dentro del campus universitario (Elaboración propia)*

### 4.3.1. Resultados de las pruebas experimentales por interferencia por canal adyacente

Como resultado de las pruebas experimentales realizadas se obtuvo la siguiente imagen, que muestra el espectro del paquete LoRa enviado con un factor de ensanchamiento de 9 y el espectro de la señal interferente ocupando un canal de transmisión adyacente.

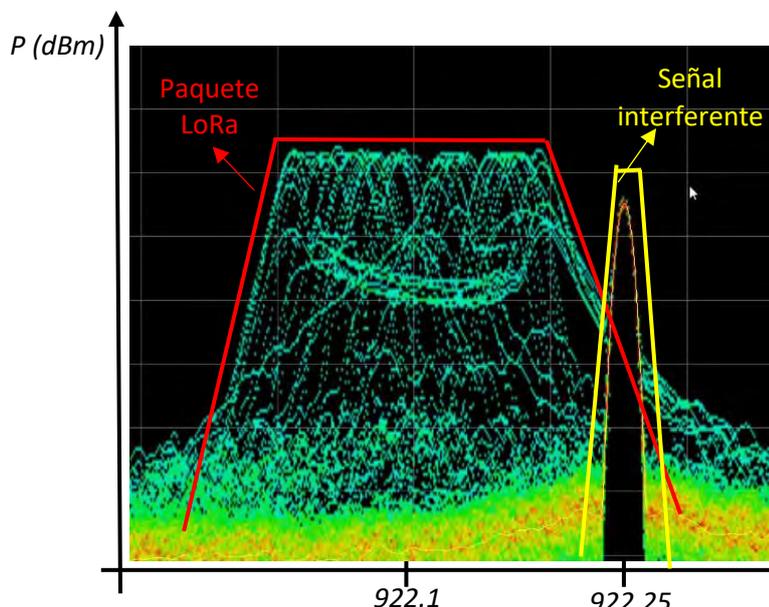


Figura 4.12 Espectro de la señal con interferencia por canal adyacente (Elaboración propia)

Del mismo modo, la siguiente imagen muestra el espectrograma del canal inalámbrico, donde se observa los paquetes LoRa enviados en los canales 922.1 MHz y 922.3 MHz en presencia de interferencia por canal adyacente.

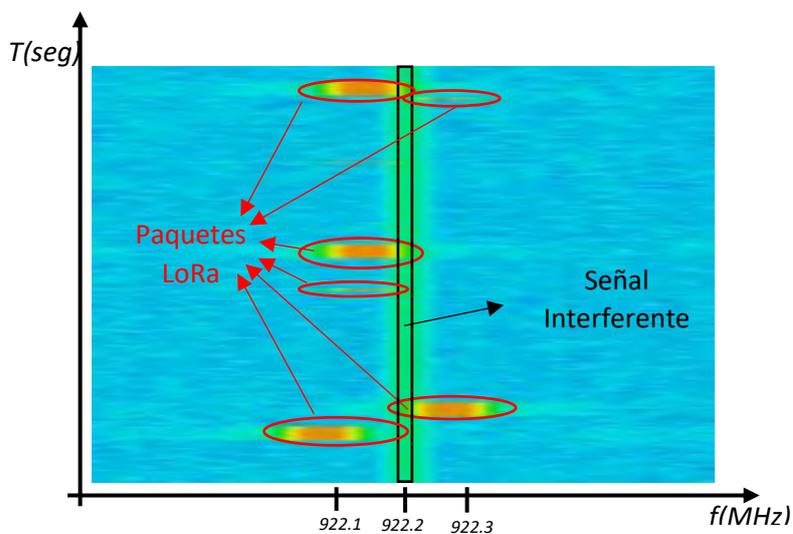


Figura 4.13 Espectrograma del canal en presencia de interferencia (Elaboración propia)

### 4.3.1.1. Análisis

Como resultado de las pruebas experimentales se realizó la siguiente gráfica para visualizar y explicar de mejor manera la interferencia por canal adyacente.

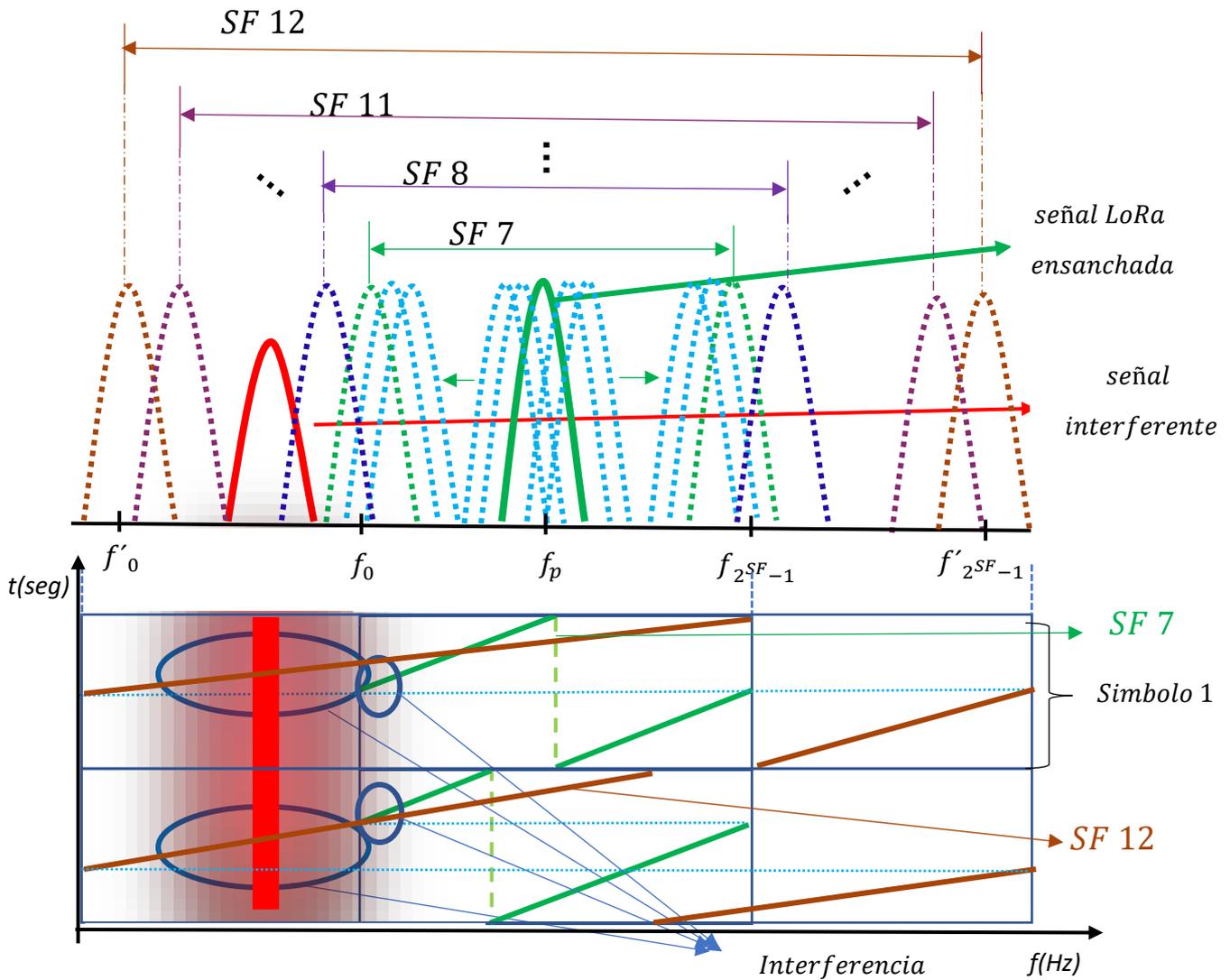


Figura 4.14 Señal LoRa en presencia de interferencia por canal adyacente (Elaboración propia)

La figura muestra un paquete LoRa con distintos factores de ensanchamiento, ya que este parámetro ejerce un impacto significativo en el canal de transmisión, dependiendo de su valor. Cuando el factor de ensanchamiento es mayor, el canal de transmisión se vuelve más amplio, lo que aumenta la vulnerabilidad de los paquetes transmitidos a la interferencia de señales cercanas. En otras palabras, a medida que el factor de ensanchamiento se

incrementa, la interferencia proveniente de canales adyacentes afecta en mayor medida la integridad de los paquetes transmitidos.

#### 4.3.1.2. Comportamiento del RSSI

Como resultado de las pruebas experimentales con interferencia por canal adyacente, se obtuvieron los siguientes datos, los cuales se presentan en las siguientes tablas, cuyos valores fueron calculados sumando todos los valores de RSSI de los paquetes LoRa recibidos y divididos entre el número de paquetes recibidos.

$$RSSI_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n RSSI_{i(\text{paquetes recibidos})}}{n}$$

La siguiente tabla expresa el RSSI sin presencia de interferencia

Nodo lora	Ubicación	Canal de transmisión	RSSI promedio	Factor de ensanchamiento	Distancia a la puerta de enlace
Nº1	13°31'15"S y 71°57'37"W	922.1 MHz	-98.24 dBm	12	381.21 metros
		922.5 MHz	-98.11 dBm		
Nº2	13°31'18"S y 71°57'29"W	922.1 MHz	-82.86 dBm	9	376.94 metros
		922.5 MHz	-83.03 dBm		
Nº3	13°31'21"s y 71°57'27"w	922.1 MHz	-78.53 dBm	7	181.25 metros
		922.5 MHz	-77.89 dBm		

Tabla 4.20 Resultados del comportamiento del RSSI para pruebas por interferencia por canal adyacente sin presencia de interferencia (Elaboración propia)

Nodo lora	Ubicación	Canal de transmisión	RSSI promedio	Factor de ensanchamiento	Distancia a la puerta de enlace
Nº1	13°31'15"S y 71°57'37"W	922.1 MHz	-99.26 dBm	12	381.21 metros
		922.5 MHz	-97.91 dBm		
Nº2	13°31'18"S y 71°57'29"W	922.1 MHz	-82.18 dBm	9	376.94 metros
		922.5 MHz	-83.86 dBm		
Nº3	13°31'21"s y 71°57'27"w	922.1 MHz	-78.35 dBm	7	181.25 metros
		922.5 MHz	-77.15 dBm		

Tabla 4.21 Resultados del comportamiento del RSSI para pruebas por interferencia por canal adyacente en presencia de interferencia (Elaboración propia)

Las anteriores tablas muestran el comportamiento del valor del RSSI promedio obtenidos, donde se observa que no sufren alteraciones significativas en sus valores, lo que nos permite afirmar que este parámetro LoRa no se ve afectado por la interferencia.

#### 4.3.1.3. Comportamiento de la relación señal a ruido (SNR)

De la prueba experimental realizada se obtuvo los siguientes resultados.

Nodo lora	Distancia a la puerta de enlace	Canal de transmisión	SNR promedio sin interferencia	Factor de ensanchamiento	Nivel de interferencia
N°1	381.21 metros	922.1 MHz	1.14 dB	12	-65dBm
		922.5 MHz	1.52 dB		
N°2	376.94 metros	922.1 MHz	8.78 dB	9	-65dBm
		922.5 MHz	9.04dB		
N°3	181.25 metros	922.1 MHz	10.51dB	7	-65dBm
		922.5 MHz	10.99 dB		

*Tabla 4.22 Resultados del comportamiento del SNR para pruebas experimentales por interferencia por canal adyacente sin presencia de interferencia (Elaboración propia)*

Nodo lora	Distancia a la puerta de enlace	Canal de transmisión	SNR promedio con interferencia	Factor de ensanchamiento	Nivel de interferencia
N°1	381.21 metros	922.1 MHz	-2.39dB	12	-65dBm
		922.5 MHz	-0.64 dB		
N°2	376.94 metros	922.1 MHz	7.97 dB	9	-65dBm
		922.5 MHz	8.54dB		
N°3	181.25 metros	922.1 MHz	10.410 dB	7	-65dBm
		922.5 MHz	10.95 dB		

*Tabla 4.23 Resultados del comportamiento del SNR para pruebas experimentales por interferencia por canal adyacente en presencia de interferencia (Elaboración propia)*

Los resultados de la prueba experimental revelan que, a medida que se incrementó el factor de ensanchamiento, la relación señal a ruido promedio obtenido mostró diferencias significativas en presencia de interferencia. Estas diferencias se debieron al aumento del ancho de banda del canal en relación con su factor de ensanchamiento usado.

Durante la prueba experimental, los canales de transmisión 922.1 MHz y 922.5 MHz estuvieron expuestos a interferencia proveniente de un canal adyacente. Se observó que el canal 922.1 MHz fue afectado en mayor medida por la señal interferente en comparación al canal 922.5 MHz. Esto se debió a que la señal interferente se encontraba en el canal 922.25 MHz

#### 4.4. Pruebas experimentales complementarias

Se hicieron pruebas experimentales fuera del campus universitario, con la finalidad de poner a prueba los cambios de canal que hace la red LoRaWAN al momento de transmitir los paquetes LoRa. En esta prueba experimental se usó todos los canales de transmisión de la banda KR 920, asimismo los nodos LoRa tuvieron enlaces mayores a 500 metros y con las siguientes configuraciones.

Configuración	Nodo LoRa 1	Nodo LoRa 2	Generador de ondas
Potencia de transmisión	14dBm	14dBm	12 dBm
Canal de transmisión	922.1 MHz, 922.3 MHz y 922.5MHz	922.1 MHz, 922.3 MHz y 922.5MHz	922.3 MHz
Ubicación	13°30'53.7"S 71°57'56.3"W	13°31'09.1"S / 71°57'46.9"W	13°31'15"S 71°57'26"W
Distancia hacia la puerta de enlace	1171.71 metros	699.5 metros	35.6 metros
Factor de ensanchamiento	7,9,12	7,9,12	-
Puerta de enlace expuesta a un nivel de interferencia	-65 dBm	-65 dBm	-

*Tabla 4.24 Configuración de los nodos LoRa para pruebas experimentales complementarias*

En esta prueba experimental todos los canales estuvieron expuestos a interferencia.

- Los canales de 922.1 MHz y 922.5 MHz estuvieron expuestos a interferencia por canal adyacente.
- El canal de 922.3 MHz estuvo expuesto a interferencia por co-canal.

#### 4.4.1. Resultados de las pruebas experimentales realizadas

Como resultado de las pruebas experimentales realizadas se obtuvieron los siguientes datos.

##### Comportamiento de RSSI y SNR

LoRaWAN como protocolo de comunicación usa varios canales de transmisión, donde la elección del canal de transmisión una vez asignada la banda de operación se realiza de manera aleatoria.

En las tablas 4.25 y 4.26 se muestran los valores de RSSI, SNR y porcentaje de paquetes recibidos obtenidos, para cada factor de ensanchamiento puesto a prueba en relación a su distancia a la puerta de enlace.

Nodo lora	Canal de transmisión	Porcentaje de paquetes recibidos	RSSI promedio (dBm)	SNR promedio (dB)	Factor de ensanchamiento	Distancia a la puerta de enlace
N°1	922.1 MHz	100 %	-94.58	-9.05	7	1171.71 metros
	922.5 MHz	100 %	-93.43	-7.76		
	922.1 MHz	100 %	-94.235	-9.20	9	
	922.5 MHz	100 %	-94.058	-8.87		
	922.1 MHz	100 %	-92.1	-7.11	12	
	922.5 MHz	100 %	-92.5	-7.58		
N°2	922.1 MHz	100 %	-84.3	1.03	7	699.5 metros
	922.5 MHz	100 %	-82.11	3.24		
	922.1 MHz	100 %	-82.4	2.35	9	
	922.5 MHz	100 %	-84	1.178		
	922.1 MHz	100 %	-81.125	-0.875	12	
	922.5 MHz	100 %	-81.125	-1.085		

*Tabla 4.25 Resultados del comportamiento del RSSI Y SNR para pruebas experimentales con interferencia por canal adyacente fuera del campus universitario (Elaboración propia)*

Al analizar la tabla N°4.25, se observa que los valores de RSSI (intensidad de fuerza de señal recibida) y SNR (relación señal a ruido) para los canales de transmisión de 922.1 MHz y 922.5 MHz, expuestos a interferencia por canal adyacente, presentaron valores cercanos con un 100% de paquetes recibidos.

<b>Nodo lora</b>	<b>Canal de transmisión</b>	<b>Porcentaje de paquetes recibidos</b>	<b>RSSI promedio (dBm)</b>	<b>SNR promedio (dB)</b>	<b>Factor de ensanchamiento</b>	<b>Distancia a la puerta de enlace</b>
<b>N°1</b>	922.3 MHz	0 %	-	-	7	1171.71 metros
	922.3 MHz	0 %	-	-	9	
	922.3 MHz	0 %	-	-	12	
<b>N°2</b>	922.3 MHz	0 %	-	-	7	699.5 metros
	922.3 MHz	0 %	-	-	9	
	922.3 MHz	0 %	-	-	12	

*Tabla 4.26 Resultados del comportamiento del RSSI Y SNR para pruebas experimentales con interferencia co-canal fuera del campus universitario (Elaboración propia)*

De la tabla 4.26 se observa que canal de 922.3 MHz, expuesto a interferencia co-canal, se registró una pérdida total de paquetes LoRa, debido al elevado nivel de interferencia existente sobre el receptor en comparación con los otros canales.

La prueba experimental realizada evidencia que la implementación de saltos de canal durante la transmisión, contribuyen a la eficiencia energética y a la mitigación de los efectos de la interferencia co-canal, que conlleva a la pérdida total de paquetes LoRa. A pesar de este beneficio, existe la posibilidad de experimentar interferencia proveniente de canales adyacentes, ya que puede haber otros dispositivos transmisores operando en canales cercanos. Esta circunstancia podría resultar en una degradación en la calidad de la señal debido al ensanchamiento del espectro.

Estos hallazgos respaldan la viabilidad y eficiencia del uso de las redes LoRaWAN en entornos con posibles fuentes de interferencia, lo que abre nuevas oportunidades para aplicaciones en áreas con alta densidad de señales inalámbricas o entornos industriales complejos.

## CONCLUSIONES

De la presente investigación se pueden extraer las siguientes conclusiones.

- La red LoRaWAN tuvo un buen desempeño frente a las interferencias electromagnéticas, debido a la robustez de su modulación y protocolos usados al momento de los enlaces de transmisión.
- Los valores de RSSI obtenidos en las pruebas experimentales se mantuvieron constantes y no fueron afectados por la interferencia de ondas electromagnéticas, debido a que es un parámetro que indica la intensidad de la señal recibida y no la calidad.
- Los valores de SNR obtenidos en las pruebas experimentales se vieron afectados según el tipo y nivel de interferencia electromagnética al cual estuvieron expuestos, teniendo como límite los valores SNR admitidos por LoRaWAN para cada factor de ensanchamiento.
- El uso de un mayor factor de ensanchamiento ayuda a mitigar la interferencia co-canal producto a los cambios continuos de frecuencia y canal de transmisión, mientras que el uso de un menor factor de ensanchamiento ayuda a mitigar la interferencia por canal adyacente, debido a un menor uso de ancho de canal de transmisión.
- A medida que aumenta el nivel de interferencia electromagnética, la capacidad de transferencia de datos disminuye en proporción del factor de ensanchamiento utilizado.
- Los resultados respaldan la viabilidad y eficiencia de LoRaWAN en entornos con posibles fuentes de interferencia, lo que abre nuevas oportunidades para aplicaciones en áreas con alta densidad de señales inalámbricas o entornos industriales complejos.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda que, al momento de programar cualquier módulo de nodo LoRa para construir una red LoRaWAN, tener actualizadas las librerías puesto que ayudan a tener un mejor enlace de red.
- Se recomienda que, al momento de implementar una red LoRaWAN tener activo los saltos de canal usados por protocolo, ya que ayudan a mitigar la interferencia co-canal.
- Se recomienda usar puertas de enlace con varios canales de recepción puesto que ayudara a no saturar un solo canal de recepción.
- Se recomienda que, cuando los enlaces inalámbricos para una red de LoRaWAN superen los 1000 metros de distancia entre transmisor y receptor, incrementar la potencia de transmisión de los elementos que conformen la red puesto que ayudaran la capacidad de transferencia de datos.
- Se recomienda usar redes de LoRaWAN en entornos ruidosos o entornos con presencia de interferencia, puesto que sus parámetros de transmisión son más robustos frente a interferencia.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. A. A. Orion, «On the Error Rate of the LoRa Modulation With Interference,» *IEEE*, vol. 19, nº 2, pp. 1292-1304, 2020.
- [2] R. Sáenz Esteban, «Estudio de los parámetros principales de la tecnología Lora para el despliegue de redes e implementación de servicios IOT en la CAV-EAE,» 30 Octubre 2018. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10810/29372>. [Último acceso: 27 Diciembre 2020].
- [3] A. A. Vazquez, «Experimental evaluation of the PHY layer of WSN focused on smart city applications,» 09 Septiembre 2013. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10803/125717>. [Último acceso: 28 Diciembre 2020].
- [4] J. C. S. Asto, «Implementación de una metodología para la medición de la interferencia inalámbrica en la banda ISM en zonas exteriores urbanas para garantizar la comunicación de una red inalámbrica de sensores,» 14 Octubre 2017. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9512>. [Último acceso: 27 Diciembre 2020].
- [5] «Universidad de las Palmas de Gran Canaria,» [En línea]. Available: <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/27/27199/propagacion.pdf>. [Último acceso: 2023 Agosto 9].
- [6] Cinvestav, «El espectro electromagnético,» [En línea]. Available: <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/el-espectro-electromagnetico-los-efectos-de-la-radiacion-no-ionizante-y-como-prevenirlos/>. [Último acceso: 10 Agosto 2023].
- [7] OSIPTEL, «Estado del espectro radioeléctrico en el Perú y recomendaciones para,» OSIPTEL, 2019. [En línea]. Available: <https://www.osiptel.gob.pe/media/g4zh4gcn/dt-43-estado-espectro-radioelectrico-peru.pdf>. [Último acceso: 5 Enero 2021].
- [8] ITU, «Radio Interference,» ITU, Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/radio-interference.aspx>. [Último acceso: 10 Marzo 2021].
- [9] V. I. Campoverde, «Medición, modelamiento y determinación de la disponibilidad de canales de TV analógica de la banda UHF (512 MHz – 698 MHz) en un escenario indoor en un edificio en el norte de la ciudad de Guayaquil,» 05 Mayo 2017. [En línea]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/38551>. [Último acceso: 30 Diciembre 2020].
- [10] SAS, «Transformación digital, qué es y para qué es importante,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.sas.com/es\\_pe/insights/big-data/internet-of-things.html](https://www.sas.com/es_pe/insights/big-data/internet-of-things.html). [Último acceso: 2 Enero 2021].
- [11] L. NACION, «Megalópolis: en 2050, dos de cada tres personas vivirán en ciudades,» 11 Julio 2014. [En línea]. Available: <https://www.lanacion.com.ar/sociedad/megalopolis-en-2050-dos-de-cada-tres-personas-viviran-en-ciudades-nid1708896/>. [Último acceso: 11 Julio 2021].
- [12] S. F. González Martín, «Smart Cities, la evolución de las ciudades,» 2017. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/10901/11207>. [Último acceso: 9 Enero 2021].
- [13] E. Solera, «Modulación LoRa: Long Range Modulation,» 27 AGOSTO 2018. [En línea]. Available: <https://medium.com/pruebas-de-laboratorio-de-la-modulaci%C3%B3n-lora/modulaci%C3%B3n-lora-4ad74cabd59e>. [Último acceso: 06 JUNIO 2022].
- [14] L. Alliance, «LoRaWAN,» Noviembre 2015. [En línea]. Available: [https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a\\_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf). [Último acceso: 4 Enero 2021].
- [15] MTC, «DECRETO SUPREMO,» 2013. [En línea]. Available: [http://transparencia.mtc.gob.pe/idm\\_docs/normas\\_legales/1\\_0\\_4485.pdf](http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_4485.pdf). [Último acceso: 30 Diciembre 2020].

- [16 M. d. C. Carrión González, «Desarrollo de una pasarela LORA y evaluación de prestaciones,» 29 Noviembre 2017.  
] [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/91597/CARRI%c3%93N%20-%20Desarrollo%20de%20una%20pasarela%20LORA%20y%20evaluaci%c3%b3n%20de%20prestaciones.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 12 Enero 2021].
- [17 SEMTECH, «LoRa & LoRaWAN,» 2 Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>. [Último acceso: 28 Mayo 2022].
- [18 2. GROUP, «Conceptos de actualidad: LoRa y LoRaWan,» 22 MARZO 2021. [En línea]. Available:  
] <https://www.2cigroup.com/es/conceptos-de-actualidad-lora-y-lorawan/>. [Último acceso: 29 MAYO 2022].
- [19 MOBILEFISH, «LoRaWAN,» [En línea]. Available:  
] [https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan\\_quickguide\\_tutorial.html](https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html). [Último acceso: 30 MAYO 2022].
- [20 LoRa Alliance, «About the LoRaWAN® Standards,» [En línea]. Available: <https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers/>. [Último acceso: 30 Diciembre 2020].
- [21 LoRa Alliance, «What is LoRaWAN® Specification,» [En línea]. Available: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>.  
] [Último acceso: 12 Diciembre 2020].
- [22 SEMTECH, «Semtech SX1276,» [En línea]. Available:  
] [https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R000001Rbr/6EfVZUorrpoKffvaF\\_Fkpgp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE](https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R000001Rbr/6EfVZUorrpoKffvaF_Fkpgp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE). [Último acceso: 31 MAYO 2022].
- [23 Significados.com, «Onda electromagnética,» [En línea]. Available: <https://www.significados.com/onda-electromagnetica/>. [Último acceso: 5 JUNIO 2022].
- [24 Wikipedia, «Radiación electromagnética,» [En línea]. Available:  
] [https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n\\_electromagn%C3%A9tica](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica). [Último acceso: 06 JUNIO 2022].
- [25 K. Academy, «La luz: ondas electromagnéticas, espectro electromagnético y fotones,» [En línea]. Available:  
] <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>. [Último acceso: 06 JUNIO 2022].
- [26 B. UDLAP, «Propagacion de ondas electromagneticas,» [En línea]. Available:  
] [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/vila\\_b\\_ca/capitulo1.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/vila_b_ca/capitulo1.pdf). [Último acceso: 06 JUNIO 2022].
- [27 gotthardp, «lorawan-server,» [En línea]. Available: <https://github.com/gotthardp/lorawan-server>. [Último acceso:  
] 06 JUNIO 2022].
- [28 Gotthardp, «LoRaWAN-SERVER,» [En línea]. Available: <https://github.com/gotthardp/lorawan-server/blob/master/doc/Installation.md>. [Último acceso: 01 DICIEMBRE 2021].
- [29 U. d. I. P. d. G. Canaria. [En línea]. Available:  
] <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/27/27199/propagacion.pdf>. [Último acceso: 9 Agosto 2023].

## ANEXOS

### ANEXO 1- Datos de las pruebas experimentales

A continuación, se muestra un pequeño extracto de los datos recopilados durante las pruebas experimentales.

- Valores de RSSI Y SNR sin presencia de interferencia para pruebas experimentales por interferencia co-canal.

Freq.	RSSI	SNR	SF	DevAddr
922.3	-79.49	10.05	7	260C5EF9
922.3	-79.57	10.00	7	260C5EF9
922.3	-79.93	10.20	7	260C5EF9
922.3	-79.56	10.37	7	260C5EF9
922.3	-79.48	10.25	7	260C5EF9
922.3	-79.83	10.18	7	260C5EF9
922.3	-79.77	9.59	8	260C5EF9
922.3	-80	9.87	8	260C5EF9
922.3	-79.12	9.87	8	260C5EF9
922.3	-79.43	9.85	8	260C5EF9
922.3	-79.81	9.83	8	260C5EF9
922.3	-79.58	9.99	8	260C5EF9
922.3	-79.53	9.73	9	260C5EF9
922.3	-79.18	9.76	9	260C5EF9
922.3	-79.81	9.63	9	260C5EF9
922.3	-79.64	9.77	9	260C5EF9
922.3	-79.87	9.75	9	260C5EF9
922.3	-79.82	9.71	9	260C5EF9
922.3	-79.21	9.45	10	260C5EF9
922.3	-79.54	9.31	10	260C5EF9
922.3	-79.14	9.52	10	260C5EF9
922.3	-79.45	9.45	10	260C5EF9
922.3	-79.35	9.34	10	260C5EF9
922.3	-79.69	9.46	10	260C5EF9
922.3	-79.21	8.60	11	260C5EF9
922.3	-79.91	8.83	11	260C5EF9
922.3	-79.38	8.82	11	260C5EF9
922.3	-79.2	8.69	11	260C5EF9
922.3	-79.78	8.78	11	260C5EF9
922.3	-79.12	8.80	11	260C5EF9
922.3	-79.19	8.41	12	260C5EF9
922.3	-79.34	8.45	12	260C5EF9
922.3	-79.94	8.46	12	260C5EF9
922.3	-79.23	8.38	12	260C5EF9
922.3	-79.51	8.43	12	260C5EF9
922.3	-79.2	8.42	12	260C5EF9

- Valores de RSSI Y SNR en presencia de interferencia co-canal.

Freq.	RSSI	SNR	SF	DevAddr
922.3	-74	8.6	7	260C5EF9
922.3	-78	8.5	7	260C5EF9
922.3	-78	8	7	260C5EF9
922.3	-79	8	7	260C5EF9
922.3	-80	7.8	7	260C5EF9
922.3	-78	7.5	7	260C5EF9
922.3	-80	7.5	7	260C5EF9
922.3	-78	7.3	7	260C5EF9
922.3	-79	7	7	260C5EF9
922.3	-80	7	7	260C5EF9
922.3	-79	6.8	7	260C5EF9
922.3	-81	6.8	7	260C5EF9
922.3	-76	5	7	260C5EF9
922.3	-78	3.3	7	260C5EF9
922.3	-78	2.8	7	260C5EF9
922.3	-78	2.5	7	260C5EF9
922.3	-78	2.5	7	260C5EF9
922.3	-79	2.3	7	260C5EF9
922.3	-79	2.5	7	260C5EF9
922.3	-79	1.5	7	260C5EF9
922.3	-80	1.5	7	260C5EF9
922.3	-75	0.5	7	260C5EF9
922.3	-78	-0.3	7	260C5EF9
922.3	-78	-0.3	7	260C5EF9
922.3	-78	-0.3	7	260C5EF9
922.3	-82	-0.5	7	260C5EF9
922.3	-82	-0.8	7	260C5EF9
922.3	-78	-1.3	7	260C5EF9
922.3	-77	-1.8	7	260C5EF9
922.3	-79	-1.8	7	260C5EF9
922.3	-78	-2	7	260C5EF9
922.3	-79	-2.3	7	260C5EF9
922.3	-81	-3.3	7	260C5EF9
922.3	-81	-4	7	260C5EF9
922.3	-79	-6	7	260C5EF9
922.3	-79	-6.5	7	260C5EF9
922.3	-79	-6.8	7	260C5EF9
922.3	-79	-7	7	260C5EF9
922.3	-80	-7.3	7	260C5EF9
922.3	-80	-8	7	260C5EF9
922.3	-82	-9.5	7	260C5EF9
922.3	-74	9.8	8	260C5EF9
922.3	-78	8.8	8	260C5EF9
922.3	-78	8.3	8	260C5EF9
922.3	-81	8	8	260C5EF9
922.3	-80	7.5	8	260C5EF9

922.3	-81	7.3	8	260C5EF9
922.3	-80	7.3	8	260C5EF9
922.3	-73	7	8	260C5EF9
922.3	-80	7	8	260C5EF9
922.3	-75	6.5	8	260C5EF9
922.3	-80	6	8	260C5EF9
922.3	-82	6	8	260C5EF9
922.3	-76	5.5	8	260C5EF9
922.3	-82	5	8	260C5EF9
922.3	-77	4.3	8	260C5EF9
922.3	-79	2.8	8	260C5EF9
922.3	-79	2.5	8	260C5EF9
922.3	-79	2.5	8	260C5EF9
922.3	-79	2	8	260C5EF9
922.3	-80	2	8	260C5EF9
922.3	-80	2.1	8	260C5EF9
922.3	-80	1.8	8	260C5EF9
922.3	-76	0.5	8	260C5EF9
922.3	-78	-0.8	8	260C5EF9
922.3	-78	-0.8	8	260C5EF9
922.3	-78	-0.8	8	260C5EF9
922.3	-77	-1.5	8	260C5EF9
922.3	-77	-1.8	8	260C5EF9
922.3	-78	-2.3	8	260C5EF9
922.3	-78	-2.5	8	260C5EF9
922.3	-78	-2.8	8	260C5EF9
922.3	-77	-3.5	8	260C5EF9
922.3	-79	-3.5	8	260C5EF9
922.3	-80	-3.8	8	260C5EF9
922.3	-78	-4	8	260C5EF9
922.3	-77	-4.8	8	260C5EF9
922.3	-78	-5	8	260C5EF9
922.3	-78	-5	8	260C5EF9
922.3	-80	-6.3	8	260C5EF9
922.3	-79	-6.5	8	260C5EF9
922.3	-80	-7.3	8	260C5EF9
922.3	-81	-8.5	8	260C5EF9
922.3	-83	-9.8	8	260C5EF9
922.3	-75	-10.8	8	260C5EF9
922.3	-87	-13.8	8	260C5EF9
922.3	-77	9.3	9	260C5EF9
922.3	-77	8	9	260C5EF9
922.3	-78	7.3	9	260C5EF9
922.3	-78	7.1	9	260C5EF9
922.3	-79	7	9	260C5EF9
922.3	-78	6.8	9	260C5EF9
922.3	-80	6.8	9	260C5EF9

922.3	-78	6.5	9	260C5EF9
922.3	-79	6.5	9	260C5EF9
922.3	-79	6.3	9	260C5EF9
922.3	-75	5.8	9	260C5EF9
922.3	-78	4.8	9	260C5EF9
922.3	-77	3.8	9	260C5EF9
922.3	-82	3.8	9	260C5EF9
922.3	-78	3.5	9	260C5EF9
922.3	-78	3.5	9	260C5EF9
922.3	-79	3.3	9	260C5EF9
922.3	-76	3	9	260C5EF9
922.3	-78	3	9	260C5EF9
922.3	-81	1.3	9	260C5EF9
922.3	-82	1	9	260C5EF9
922.3	-82	1	9	260C5EF9
922.3	-80	0.8	9	260C5EF9
922.3	-79	0	9	260C5EF9
922.3	-81	0.1	9	260C5EF9
922.3	-75	-0.3	9	260C5EF9
922.3	-83	-0.3	9	260C5EF9
922.3	-77	-0.8	9	260C5EF9
922.3	-79	-1.3	9	260C5EF9
922.3	-80	-1.3	9	260C5EF9
922.3	-78	-1.8	9	260C5EF9
922.3	-79	-1.8	9	260C5EF9
922.3	-75	-2	9	260C5EF9
922.3	-79	-2	9	260C5EF9
922.3	-78	-2.1	9	260C5EF9
922.3	-78	-2	9	260C5EF9
922.3	-79	-1.9	9	260C5EF9
922.3	-79	-2.3	9	260C5EF9
922.3	-78	-2.3	9	260C5EF9
922.3	-78	-2.2	9	260C5EF9
922.3	-78	-2.8	9	260C5EF9
922.3	-79	-2.8	9	260C5EF9
922.3	-76	-3.5	9	260C5EF9
922.3	-77	-3.8	9	260C5EF9
922.3	-77	-4	9	260C5EF9
922.3	-77	-4.3	9	260C5EF9
922.3	-80	-4.5	9	260C5EF9
922.3	-79	-5.8	9	260C5EF9
922.3	-80	-6.5	9	260C5EF9
922.3	-80	-7.5	9	260C5EF9
922.3	-81	-7.8	9	260C5EF9
922.3	-83	-9.3	9	260C5EF9
922.3	-75	-11	9	260C5EF9
922.3	-76	-11.5	9	260C5EF9

922.3	-76	-11.8	9	260C5EF9
922.3	-77	-13	9	260C5EF9
922.3	-78	-14	9	260C5EF9
922.3	-92	-14.8	9	260C5EF9
922.3	-80	-15	9	260C5EF9
922.3	-79	-15.3	9	260C5EF9
922.3	-79	-15.3	9	260C5EF9
922.3	-79	-15.3	9	260C5EF9
922.3	-79	-15.5	9	260C5EF9
922.3	-80	-16	9	260C5EF9
922.3	-80	-16.2	9	260C5EF9
922.3	-81	-16	9	260C5EF9
922.3	-81	-17.3	9	260C5EF9
922.3	-77	7.3	10	260C5EF9
922.3	-79	7.3	10	260C5EF9
922.3	-77	7	10	260C5EF9
922.3	-78	7.1	10	260C5EF9
922.3	-77	7	10	260C5EF9
922.3	-78	7.5	10	260C5EF9
922.3	-77	6.8	10	260C5EF9
922.3	-78	6.8	10	260C5EF9
922.3	-77	6.5	10	260C5EF9
922.3	-78	6.6	10	260C5EF9
922.3	-79	6.7	10	260C5EF9
922.3	-77	4	10	260C5EF9
922.3	-78	3.5	10	260C5EF9
922.3	-78	3.3	10	260C5EF9
922.3	-80	2.8	10	260C5EF9
922.3	-80	2.5	10	260C5EF9
922.3	-79	2.3	10	260C5EF9
922.3	-79	2.3	10	260C5EF9
922.3	-80	2.2	10	260C5EF9
922.3	-80	2	10	260C5EF9
922.3	-81	2	10	260C5EF9
922.3	-81	1.3	10	260C5EF9
922.3	-76	0	10	260C5EF9
922.3	-76	-0.5	10	260C5EF9
922.3	-78	-1.3	10	260C5EF9
922.3	-74	-1.8	10	260C5EF9
922.3	-74	-2	10	260C5EF9
922.3	-75	-2.3	10	260C5EF9
922.3	-74	-2.5	10	260C5EF9
922.3	-79	-2.5	10	260C5EF9
922.3	-75	-2.8	10	260C5EF9
922.3	-79	-2.8	10	260C5EF9
922.3	-80	-3	10	260C5EF9
922.3	-79	-3.5	10	260C5EF9

922.3	-80	-3.5	10	260C5EF9
922.3	-80	-3.8	10	260C5EF9
922.3	-80	-3.8	10	260C5EF9
922.3	-77	-4	10	260C5EF9
922.3	-81	-4.3	10	260C5EF9
922.3	-78	-5.3	10	260C5EF9
922.3	-80	-8	10	260C5EF9
922.3	-82	-8.8	10	260C5EF9
922.3	-84	-12.3	10	260C5EF9
922.3	-79	-15	10	260C5EF9
922.3	-87	-15	10	260C5EF9
922.3	-80	-15.3	10	260C5EF9
922.3	-80	-16	10	260C5EF9
922.3	-80	-16.5	10	260C5EF9
922.3	-80	-16.2	10	260C5EF9
922.3	-80	-16.3	10	260C5EF9
922.3	-81	-16.5	10	260C5EF9
922.3	-81	-16.8	10	260C5EF9
922.3	-83	-18	10	260C5EF9
922.3	-79	5	11	260C5EF9
922.3	-80	5	11	260C5EF9
922.3	-80	5	11	260C5EF9
922.3	-78	4.8	11	260C5EF9
922.3	-80	4.8	11	260C5EF9
922.3	-80	4.5	11	260C5EF9
922.3	-79	4.3	11	260C5EF9
922.3	-81	3.5	11	260C5EF9
922.3	-82	3	11	260C5EF9
922.3	-84	3	11	260C5EF9
922.3	-77	2.8	11	260C5EF9
922.3	-76	2.5	11	260C5EF9
922.3	-77	2.5	11	260C5EF9
922.3	-83	2.6	11	260C5EF9
922.3	-77	2.3	11	260C5EF9
922.3	-77	2	11	260C5EF9
922.3	-77	2	11	260C5EF9
922.3	-76	1.8	11	260C5EF9
922.3	-79	1.5	11	260C5EF9
922.3	-80	0.8	11	260C5EF9
922.3	-82	0	11	260C5EF9
922.3	-77	-1	11	260C5EF9
922.3	-77	0.9	11	260C5EF9
922.3	-77	-1.5	11	260C5EF9
922.3	-78	-1.8	11	260C5EF9
922.3	-78	-2.3	11	260C5EF9
922.3	-74	-2.5	11	260C5EF9
922.3	-79	-2.4	11	260C5EF9

922.3	-74	-2.8	11	260C5EF9
922.3	-79	-2.7	11	260C5EF9
922.3	-79	-2.8	11	260C5EF9
922.3	-79	-2.8	11	260C5EF9
922.3	-75	-3	11	260C5EF9
922.3	-75	-3.3	11	260C5EF9
922.3	-75	-3.1	11	260C5EF9
922.3	-75	-3.3	11	260C5EF9
922.3	-80	-3.3	11	260C5EF9
922.3	-75	-3.5	11	260C5EF9
922.3	-80	-4.3	11	260C5EF9
922.3	-76	-4.5	11	260C5EF9
922.3	-85	-4.5	11	260C5EF9
922.3	-76	-4.8	11	260C5EF9
922.3	-79	-6.8	11	260C5EF9
922.3	-83	-9.8	11	260C5EF9
922.3	-82	-10.3	11	260C5EF9
922.3	-77	-12.5	11	260C5EF9
922.3	-78	-13.8	11	260C5EF9
922.3	-79	-14.3	11	260C5EF9
922.3	-79	-14.5	11	260C5EF9
922.3	-80	-15	11	260C5EF9
922.3	-82	-17.5	11	260C5EF9
922.3	-82	-18	11	260C5EF9
922.3	-83	-19.3	11	260C5EF9
922.3	-83	-19.8	11	260C5EF9
922.3	-93	-20.3	11	260C5EF9
922.3	-90	-25	11	260C5EF9
922.3	-79	5	12	260C5EF9
922.3	-79	4.3	12	260C5EF9
922.3	-79	3.8	12	260C5EF9
922.3	-79	3.3	12	260C5EF9
922.3	-79	2.9	12	260C5EF9
922.3	-80	3	12	260C5EF9
922.3	-79	3.7	12	260C5EF9
922.3	-78	3	12	260C5EF9
922.3	-80	3	12	260C5EF9
922.3	-80	2.8	12	260C5EF9
922.3	-80	2.5	12	260C5EF9
922.3	-77	2.3	12	260C5EF9
922.3	-78	2	12	260C5EF9
922.3	-77	1.8	12	260C5EF9
922.3	-80	1.3	12	260C5EF9
922.3	-80	1.7	12	260C5EF9
922.3	-80	1.4	12	260C5EF9
922.3	-80	1.2	12	260C5EF9
922.3	-80	1	12	260C5EF9

922.3	-81	0.5	12	260C5EF9
922.3	-81	0.3	12	260C5EF9
922.3	-80	0	12	260C5EF9
922.3	-76	-0.5	12	260C5EF9
922.3	-75	-2.8	12	260C5EF9
922.3	-75	-2.8	12	260C5EF9
922.3	-79	-3	12	260C5EF9
922.3	-79	-3	12	260C5EF9
922.3	-76	-3.5	12	260C5EF9
922.3	-79	-3.8	12	260C5EF9
922.3	-79	-3.8	12	260C5EF9
922.3	-79	-4	12	260C5EF9
922.3	-76	-4.3	12	260C5EF9
922.3	-80	-4.3	12	260C5EF9
922.3	-77	-4.5	12	260C5EF9
922.3	-78	-4.5	12	260C5EF9
922.3	-80	-4.8	12	260C5EF9
922.3	-81	-4.8	12	260C5EF9
922.3	-78	-5.3	12	260C5EF9
922.3	-81	-5.3	12	260C5EF9
922.3	-78	-5.8	12	260C5EF9
922.3	-78	-5.8	12	260C5EF9
922.3	-79	-6	12	260C5EF9
922.3	-80	-6.8	12	260C5EF9
922.3	-84	-8.3	12	260C5EF9
922.3	-85	-9.3	12	260C5EF9
922.3	-78	-13.3	12	260C5EF9
922.3	-78	-13.5	12	260C5EF9
922.3	-87	-13.8	12	260C5EF9
922.3	-79	-14.3	12	260C5EF9
922.3	-80	-15.3	12	260C5EF9
922.3	-82	-17.3	12	260C5EF9
922.3	-82	-17.5	12	260C5EF9
922.3	-82	-17.8	12	260C5EF9
922.3	-84	-19.5	12	260C5EF9
922.3	-87	-24.5	12	260C5EF9
922.3	-91	-28	12	260C5EF9

- Valores de RSSI Y SNR sin presencia de interferencia para pruebas experimentales por interferencia por canal adyacente.

Freq.	RSSI	SNR	SF	DevAddr
922.1	-78.56	10.58	7	260C6342
922.1	-77.9	10.64	7	260C6342
922.1	-78.42	10.49	7	260C6342
922.1	-78.14	10.20	7	260C6342
922.1	-78.05	10.12	7	260C6342
922.1	-78.28	10.04	7	260C6342
922.1	-77.96	10.20	7	260C6342
922.1	-77.75	10.66	7	260C6342
922.1	-78.38	10.50	7	260C6342
922.1	-78	10.99	7	260C6342
922.5	-78.18	10.92	7	260C6342
922.5	-77.94	10.81	7	260C6342
922.5	-78.7	10.67	7	260C6342
922.5	-77.93	10.20	7	260C6342
922.5	-78.38	10.41	7	260C6342
922.5	-77.86	10.91	7	260C6342
922.5	-77.87	10.91	7	260C6342
922.5	-78.34	10.83	7	260C6342
922.5	-78.6	10.73	7	260C6342
922.5	-78.34	10.30	7	260C6342
922.1	-83.09	8.92	9	260C5EF9
922.1	-83.44	9.08	9	260C5EF9
922.1	-82.79	8.62	9	260C5EF9
922.1	-83.16	8.70	9	260C5EF9
922.1	-82.57	9.13	9	260C5EF9
922.1	-83.46	8.98	9	260C5EF9
922.1	-83.23	9.06	9	260C5EF9
922.1	-83.1	9.19	9	260C5EF9
922.1	-83.28	8.84	9	260C5EF9
922.5	-82.85	9.28	9	260C5EF9
922.5	-83.22	9.20	9	260C5EF9
922.5	-82.99	9.26	9	260C5EF9
922.5	-82.6	8.53	9	260C5EF9
922.5	-83.05	9.14	9	260C5EF9
922.5	-83.47	8.70	9	260C5EF9
922.5	-82.97	8.87	9	260C5EF9
922.5	-82.72	8.89	9	260C5EF9
922.5	-82.87	9.03	9	260C5EF9
922.5	-83.05	9.00	9	260C5EF9
922.5	-82.86	8.63	9	260C5EF9
922.1	-78.52	1.52	12	260C8512
922.1	-78.2	1.02	12	260C8512
922.1	-77.9	1.17	12	260C8512
922.1	-78.74	1.31	12	260C8512
922.1	-77.98	1.37	12	260C8512
922.1	-78.48	1.25	12	260C8512
922.1	-77.84	1.35	12	260C8512
922.1	-78.78	1.16	12	260C8512
922.1	-78.64	1.06	12	260C8512
922.1	-78.71	1.45	12	260C8512
922.5	-77.91	1.12	12	260C8512
922.5	-78.36	1.03	12	260C8512
922.5	-77.91	1.33	12	260C8512
922.5	-78.26	1.33	12	260C8512
922.5	-78.69	1.58	12	260C8512
922.5	-78.43	1.36	12	260C8512
922.5	-78.61	1.38	12	260C8512
922.5	-78.08	1.45	12	260C8512
922.5	-77.7	1.04	12	260C8512
922.5	-78.43	1.46	12	260C8512
922.5	-78.33	1.43	12	260C8512
922.5	-78.03	1.42	12	260C8512

- Valores de RSSI Y SNR en presencia de interferencia por canal adyacente.

Freq.	RSSI	SNR	SF	DevAddr
922.1	-78.6	10.36	7	260C6342
922.1	-78.56	10.33	7	260C6342
922.1	-78.34	10.34	7	260C6342
922.1	-78.22	10.63	7	260C6342
922.1	-78.35	10.96	7	260C6342
922.1	-78.33	10.20	7	260C6342
922.1	-77.95	10.48	7	260C6342
922.1	-78.02	10.00	7	260C6342
922.1	-78.12	10.82	7	260C6342
922.1	-78.3	10.68	7	260C6342
922.5	-77.77	10.50	7	260C6342
922.5	-78.49	10.57	7	260C6342
922.5	-77.91	10.95	7	260C6342
922.5	-78.38	10.85	7	260C6342
922.5	-77.86	10.03	7	260C6342
922.5	-78.18	10.73	7	260C6342
922.5	-78.65	10.77	7	260C6342
922.5	-78.62	10.60	7	260C6342
922.5	-77.94	10.38	7	260C6342
922.5	-78.18	10.67	7	260C6342
922.1	-83.14	7.48	9	260C5EF9
922.1	-82.98	7.81	9	260C5EF9
922.1	-82.96	7.95	9	260C5EF9
922.1	-83.25	8.00	9	260C5EF9
922.1	-83	8.03	9	260C5EF9
922.1	-83.07	8.00	9	260C5EF9
922.1	-83.33	7.93	9	260C5EF9
922.1	-82.53	7.88	9	260C5EF9
922.1	-83.27	7.39	9	260C5EF9
922.5	-82.62	7.75	9	260C5EF9
922.5	-83.18	8.74	9	260C5EF9
922.5	-83.12	8.48	9	260C5EF9
922.5	-83.44	8.84	9	260C5EF9
922.5	-82.96	8.30	9	260C5EF9
922.5	-82.5	8.78	9	260C5EF9
922.5	-83.49	8.33	9	260C5EF9
922.5	-82.97	8.50	9	260C5EF9
922.5	-82.58	8.49	9	260C5EF9
922.5	-83.4	8.25	9	260C5EF9
922.5	-83.03	8.40	9	260C5EF9
922.1	-78.07	-1.48	12	260C8512
922.1	-78.13	-0.94	12	260C8512
922.1	-77.97	-2.70	12	260C8512
922.1	-78.59	-0.92	12	260C8512
922.1	-78.15	-1.03	12	260C8512
922.1	-78.19	-0.94	12	260C8512
922.1	-78.51	-1.73	12	260C8512
922.1	-78.48	-1.82	12	260C8512
922.1	-78.46	-2.03	12	260C8512
922.1	-78.72	-1.52	12	260C8512
922.5	-78.6	-2.39	12	260C8512
922.5	-78.63	-2.70	12	260C8512
922.5	-78	-0.17	12	260C8512
922.5	-78.14	-0.74	12	260C8512
922.5	-78.7	-0.21	12	260C8512
922.5	-78.79	-0.35	12	260C8512
922.5	-78.4	-0.33	12	260C8512
922.5	-78.55	-0.11	12	260C8512
922.5	-77.87	-0.48	12	260C8512
922.5	-77.77	-0.47	12	260C8512
922.5	-78.54	-0.46	12	260C8512
922.5	-78.43	-0.57	12	260C8512

- Valores de SNR y RSSI de las pruebas experimentales complementarias con interferencia por canal adyacente en la curva de la avenida Collasuyo.

Freq.	RSSI	SNR	SF	DevAddr
922.1	-84.01	0.58	7	260C5EF9
922.1	-84.92	1.21	7	260C6342
922.1	-82.66	0.82	7	260C5EF9
922.1	-83.79	0.59	7	260C6342
922.1	-83.54	1.08	7	260C5EF9
922.1	-83.22	0.51	7	260C8512
922.1	-82.92	0.86	7	260C5EF9
922.5	-83.51	3.36	7	260C6342
922.5	-84.01	3.19	7	260C6342
922.5	-83.37	2.53	7	260C6342
922.5	-82.34	2.72	7	260C6342
922.5	-84.58	3.08	7	260C5EF9
922.5	-83.07	3.31	7	260C6342
922.5	-84.02	3.21	7	260C8512
922.1	-84.71	3.49	7	260C6342
922.1	-82.12	2.39	9	260C6342
922.1	-83.96	2.5	9	260C5EF9
922.1	-82.86	2.3	9	260C5EF9
922.1	-83.35	2.84	9	260C8512
922.1	-82.22	2.21	9	260C6342
922.1	-82.04	2.95	9	260C8512
922.5	-82.95	2.45	9	260C8512
922.5	-83.96	2.25	9	260C5EF9
922.5	-82.99	1.41	9	260C5EF9
922.5	-82	1.04	9	260C6342
922.5	-83.79	1.08	9	260C6342
922.5	-83.25	1.5	9	260C5EF9
922.5	-83.38	1.16	9	260C8512
922.5	-83.53	1	9	260C8512
922.5	-83.28	1.04	9	260C6342
922.1	-81.53	-0.25	12	260C6342
922.1	-81.2	-0.49	12	260C5EF9
922.1	-81.81	-0.33	12	260C6342
922.1	-81.04	-0.92	12	260C6342
922.1	-81.49	-0.98	12	260C5EF9
922.1	-81.93	-0.22	12	260C6342
922.1	-81.63	-0.22	12	260C6342
922.5	-81.02	-1.48	12	260C5EF9
922.5	-81.9	-1.26	12	260C5EF9
922.5	-81.66	-1.02	12	260C6342
922.5	-81.05	-1.42	12	260C6342
922.5	-81.98	-1.01	12	260C8512
922.5	-81.67	-1.12	12	260C5EF9
922.5	-81.19	-1.1	12	260C8512

- Valores de SNR y RSSI de las pruebas experimentales complementarias con interferencia por canal adyacente en el mirador Tete Qapa-Munay Senqa.

Freq.	RSSI	SNR	SF	DevAddr
922.1	-94.52	-9.21	7	260C5EF9
922.1	-94.02	-9.29	7	260C6342
922.1	-94.04	-9.02	7	260C5EF9
922.1	-93.44	-9.14	7	260C6342
922.1	-93.61	-9.22	7	260C5EF9
922.1	-93.2	-9.3	7	260C8512
922.1	-94.69	-9.16	7	260C5EF9
922.5	-93.59	-7.13	7	260C6342
922.5	-93.92	-7.98	7	260C6342
922.5	-94.64	-7.35	7	260C6342
922.5	-93.74	-7.16	7	260C6342
922.5	-94.08	-7.31	7	260C5EF9
922.5	-93.35	-7.02	7	260C6342
922.5	-94.79	-7.7	7	260C8512
922.1	-93.55	-7.87	7	260C6342
922.1	-94.87	-9.26	9	260C6342
922.1	-94.83	-9.17	9	260C5EF9
922.1	-94.72	-8.86	9	260C5EF9
922.1	-94.86	-9.32	9	260C8512
922.1	-94.02	-8.71	9	260C6342
922.1	-94.97	-9.08	9	260C8512
922.5	-94.62	-8.72	9	260C8512
922.5	-94.24	-8.61	9	260C5EF9
922.5	-94.58	-8.71	9	260C5EF9
922.5	-94.67	-8.72	9	260C6342
922.5	-94.33	-9	9	260C6342
922.5	-94.5	-8.63	9	260C5EF9
922.5	-94.15	-8.62	9	260C8512
922.5	-94.69	-8.96	9	260C8512
922.5	-92.43	-8.73	9	260C6342
922.1	-92.3	-7.21	12	260C6342
922.1	-92.56	-7.23	12	260C5EF9
922.1	-92.03	-7.49	12	260C6342
922.1	-92.29	-7.22	12	260C6342
922.1	-92.02	-7.02	12	260C5EF9
922.1	-92.77	-7.06	12	260C6342
922.1	-92.58	-7.77	12	260C6342
922.5	-92.71	-7.53	12	260C5EF9
922.5	-92.64	-7.92	12	260C5EF9
922.5	-92.2	-7.74	12	260C6342
922.5	-92.91	-7.58	12	260C6342
922.5	-92.77	-7.67	12	260C8512
922.5	-92.47	-7.51	12	260C5EF9
922.5	-92.85	-7.99	12	260C8512

- Valores de SNR y RSSI de las pruebas experimentales complementarias con interferencia co-canal en la curva de la AV. Collasuyo y mirador Tete Qapa-Munay Senqa.

Freq.	RSSI	SNR	SF	DevAddr
922.3	-	-	7	260C5EF9
922.3	-	-	7	260C6342
922.3	-	-	7	260C5EF9
922.3	-	-	7	260C6342
922.3	-	-	7	260C5EF9
922.3	-	-	7	260C8512
922.3	-	-	7	260C5EF9
922.3	-	-	7	260C6342
922.3	-	-	7	260C6342
922.3	-	-	7	260C6342
922.3	-	-	7	260C6342
922.3	-	-	7	260C5EF9
922.3	-	-	7	260C6342
922.3	-	-	7	260C8512
922.3	-	-	7	260C6342
922.3	-	-	9	260C6342
922.3	-	-	9	260C5EF9
922.3	-	-	9	260C5EF9
922.3	-	-	9	260C8512
922.3	-	-	9	260C6342
922.3	-	-	9	260C8512
922.3	-	-	9	260C8512
922.3	-	-	9	260C5EF9
922.3	-	-	9	260C5EF9
922.3	-	-	9	260C6342
922.3	-	-	9	260C6342
922.3	-	-	9	260C5EF9
922.3	-	-	9	260C8512
922.3	-	-	9	260C8512
922.3	-	-	9	260C6342
922.3	-	-	12	260C6342
922.3	-	-	12	260C5EF9
922.3	-	-	12	260C6342
922.3	-	-	12	260C6342
922.3	-	-	12	260C5EF9
922.3	-	-	12	260C6342
922.3	-	-	12	260C6342
922.3	-	-	12	260C6342
922.3	-	-	12	260C5EF9
922.3	-	-	12	260C5EF9
922.3	-	-	12	260C6342
922.3	-	-	12	260C6342
922.3	-	-	12	260C8512
922.3	-	-	12	260C5EF9
922.3	-	-	12	260C8512

## ANEXO 2- Hoja de datos de la puerta de enlace

# RAK7268 WisGate Edge Lite 2 Datasheet

## Overview

### Description

The RAK7268 WisGate Edge Lite 2 is a full 8-channel indoor gateway, based on the LoRaWAN protocol, with built-in Ethernet connectivity for a straightforward setup. There is an onboard Wi-Fi setup (supporting 2.4 GHz Wi-Fi) that allows it to be easily configured via the default Wi-Fi AP mode. Additionally, the gateway supports LTE uplink communication connections (optional).

As with the other RAKwireless Industrial Gateways, it also supports MQTT Bridge mode, with the option for TLS authentication.

Power-over-Ethernet (PoE) is supported to serve cases where wall or ceiling mounting is required without the need to install additional power lines.

The open-source software for the management and configuration of this gateway device is based on OpenWRT. It has a built-in LoRa packet forwarder and a graphical user interface, allowing for a quick setup without giving up the freedom of a fully customized solution.

RAK7268 also supports the MQTT Bridge function, can use the MQTT integrated to third-party platforms.

RAK7268 is especially suitable for small and medium-sized deployment scenarios in industry applications, saving the additional cost for server and R&D investment, and has the advantages of high execution efficiency.

### Features

- Full LoRaWAN Stack support (V 1.0.3) with Semtech SX1302
- Supports 2.4 GHz Wi-Fi AP for configuration
- 100M Base-T Ethernet with PoE
- Multi back-haul with Ethernet, Wi-Fi, Cellular
- OpenWRT software supports Web UI for easy configuration and monitoring
- Can integrate with both private (ChirpStack) and public (TTN) network servers
- TF card for log backup and LoRa frame buffering (in case of backhaul failover)
- Built-in Network Server for easy deployment of applications and integration of gateways
- LTE Cat 4 network (optional)

## Specifications

### Overview

The overview presents the block diagram for the RAK7268 that shows the internal architecture of the board.

### Block Diagram

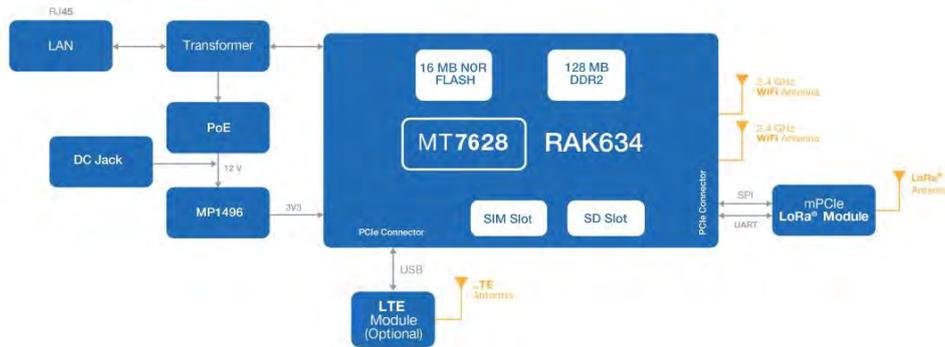


Figure 1: WisGate Edge Lite 2 Block Diagram

## Hardware

The hardware specification covers only the interfacing of the RAK7268 and its corresponding functionalities. It also presents the parameters and the standard values of the board.

## Interfaces

The hardware interfaces of RAK7268 gateway include DC 12 V, ETH interface, Console interface, Reset key, TF Card slot, Status indicator LEDs, LoRa Antenna connector, etc.



Figure 2: WisGate Edge Lite 2 Interfaces

## Reset Key Functions

The function of the Reset key is as follows:

- **Short press:** Restart the gateway.
- **Long press** (5 sec and above): Restore factory settings.

## LED Indicators

LEDs	Status Indication Description
PWR LED	Power indicator - The LED is on when device power is on
Breathing LED	Breathing after system up
	ON - Linkup
ETH LED	OFF - Linkdown
	Flicker - Data transmitting and receiving
	ON - LoRa is working
LoRa LED	OFF - LoRa is not working
	Flicker - Indicate LoRa Packet receiving and sending
	AP Mode:
	-ON - The AP is up
	-OFF - The AP is down
	-Flicker - Data receiving and sending
WLAN LED	STA Mode:
	-Slow flicker (1 Hz) - Disconnected
	-ON - Connected
	-Flicker - Data receiving and sending
	Slow Flicker (1800 ms High / 200 ms Low) - Network searching
LTE LED	Slow flicker (200 ms High / 1800 ms Low) - Idle
	Fast flicker (125 ms High / 125 ms Low) - Ongoing data transfer

## Main Specifications

Feature	Specifications
Computing	MT7628, DDR2 RAM 128 MB
Wi-Fi feature	Frequency: 2.4 GHz (802.11b/g/n)
	RX Sensitivity: -95 dBm (Min)
	TX Power: 20 dBm (Max)
	Operation channels: 2.4 GHz: 1-13
LoRa feature	SX1302 Mini PCIe card
	8 Channels
	RX Sensitivity: -139 dBm (Min)
	TX Power: 27 dBm (Max)
	Frequency: EU433/CN470/EU868/US915/AS923/AU915/IN865/KR920
	Supports Quectel EG95-E/EG95-NA (IoT/M2M -optimized LTE Cat 4 Module)
	EG95-E for EMEA Region
	- LTE FDD: B1/B3/B7/B8/B20/B28A
	- WCDMA: B1/B8
	- GSM/EDGE: B3/B8
Cellular	EG95-NA for North America Region
	- LTE FDD: B2/B4/B5/B12/B13
	- WCDMA: B2/B4/B5
	<b>Optional supports other PCIe LTE module for Global Region</b>
Power supply	DC 12 V - 1 A
	PoE (IEEE 802.3 af), 36~57 V <sub>DC</sub>
Power consumption	12 W (typical)
ETH	RJ45 (10/100 M)
Console	Type-C USB

Feature	Specifications
Antenna	LoRa: RP-SMA female connector
	LTE: Internal antenna
	Wi-Fi: Internal antenna
LEDs	POWER LED
	Breathing LED (Top side)
	ETH LED (On ETH connector)
	LoRa LED
	WLAN LED
	LTE LED
Ingress protection	IP30
Enclosure material	Plastic
Weight	0.3 kg
Dimension	166x127x36 mm
Operating temperature	-10 to 55 °C
Installation method	Wall mounting

## RF Specifications

### Wi-Fi Radio Specifications

Feature	Specifications
Wireless Standard	IEEE 802.11b/g/n
Operating Frequency	ISM band: 2.412~2.472 GHz
Operation Channels	2.4 GHz: 1-13
Transmit Power (The max power maybe different depending on local regulations) - per chain	802.11b
	19 dBm @1 Mbps
	19 dBm @11 Mbps
	802.11g
	18 dBm @6 Mbps
	16 dBm @54 Mbps
	802.11n (2.4G)
	18 dBm @MCS0 (HT20)
	16 dBm @MCS7 (HT20)
	17 dBm @MCS0 (HT40)
	15 dBm @MCS7 (HT40)
	Receiver Sensitivity (Typical)
-95 dBm @1 Mbps	
-88 dBm @11 Mbps	
802.11g	
-90 dBm @6 Mbps	
-75 dBm @54 Mbps	
802.11n (2.4G)	
-89 dBm @MCS0 (HT20)	
-72 dBm @MCS7 (HT20)	
-86 dBm @MCS0 (HT40)	

Feature	Specifications
	-68 dBm @MCS7 (HT40)

## LoRa Radio Specifications

Feature	Specifications
Operating Frequency	EU433/CN470/EU868/US915/AS923/AU915/IN865/KR920
Transmit Power	27 dBm (Max)
Receiver Sensitivity	-139 dBm (Min)

## LTE Radio Specifications

Feature	Specification
EG95-E for EMEA Region	LTE FDD: B1/B3/B7/B8/B20/B28A WCDMA: B1/B8 GSM/EDGE: B3/B8
EG95-NA for North America Region	LTE FDD: B2/B4/B5/B12/B13 WCDMA: B2/B4/B5 Optional supports other PCIE LTE module for Global Region

## Electrical Requirements

The Gateway comes with a 12 V-1 A power adaptor. It is also fully compatible with PoE (IEEE 802.3af), 36~57 V<sub>DC</sub>.

The typical power consumption is 12 W.

## Environmental Requirements

The casing is IP30 rated and is made of plastic. There are holes for a mounting bracket on the back, in order to simplify wall mounting. The enclosure, while robust, is not meant for outdoor deployment and should be kept away from moisture.

Parameter	Value
Dimensions	66x127x36 mm
Weight	0.3 kg
Operating temperature	-10 to 55 °C

## Firmware

The firmware sits on OpenWRT, which makes it possible to customize it. There is a Web UI for easy configuration and management of the device, as well as the possibility for SSH2 management.

Model	Firmware Version	Source
RAK7268 WisGate Edge Lite 2	WisGateOS V1.3.8	<a href="#">Download</a>

## Software

### Software Features

LoRaWAN	Network	Management
Supports class A, C	Wi-Fi AP mode	WEB management
LoRa package forward	Uplink backup	SSH2
Country code setup	802.1q	Firmware update
TX Power setup	DHCP Server/Client	NTP
Data logger	Router module NAT	Configuring the LoRa Packet Forwarder
Statistics	Firewall	Build-in Server
Location setup	LTE APN setup	OpenVPN, Ping Watch Dog
Server address and Port setup		MQTT Bridge

### Certification



### FCC Caution

Any changes or modifications not expressly approved by the party responsible for compliance could void the user's authority to operate the equipment.

This device complies with part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions: (1) This device may not cause harmful interference, and (2) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

**NOTE:**

This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class B digital device, according to part 15 of the FCC Rules. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference in a residential installation. This equipment generates, uses, and can radiate radio frequency energy and, if not installed and used following the instructions, may cause harmful interference to radio communications. However, there is no guarantee that interference will not occur in a particular installation. If this equipment does cause harmful interference to radio or television reception, which can be determined by turning the equipment off and on, the user is encouraged to try to correct the interference by one or more of the following measures:

1. Reorient or relocate the receiving antenna.
2. Increase the separation between the equipment and receiver.
3. Connect the equipment into an outlet on a circuit different from that to which the receiver is connected.
4. Consult the dealer or an experienced radio/TV technician for help.

## FCC Radiation Exposure Statement

This equipment complies with FCC radiation exposure limits set forth for an uncontrolled environment. This equipment should be installed and operated with a minimum distance of 20 cm between the radiator and your body.

## ISED Warning

This device complies with Innovation, Science, and Economic Development Canada licence-exempt RSS standard(s). Operation is subject to the following two conditions:

1. This device may not cause interference;
2. This device must accept any interference, including interference that may cause undesired operation of the device.

Le présent appareil est conforme aux CNR d'Innovation, Sciences et Développement économique Canada applicables aux appareils radio exempts de licence. L'exploitation est autorisée aux deux conditions suivantes :

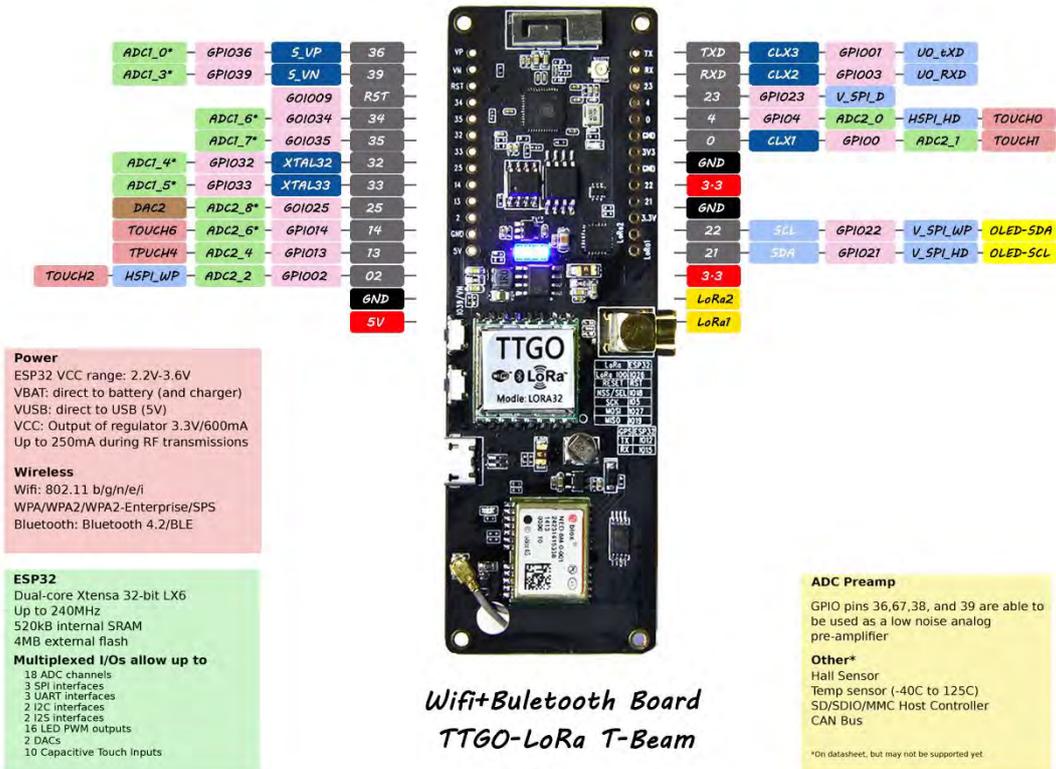
1. l'appareil ne doit pas produire de brouillage, et
2. l'utilisateur de l'appareil doit accepter tout brouillage radioélectrique subi, même si le brouillage est susceptible d'en compromettre le fonctionnement.

The device complies with RF exposure guidelines, users can obtain Canadian information on RF exposure and compliance. The minimum distance from the body to use the device is 20 cm.

Le présent appareil est conforme. Après examen de ce matériel aux normes de conformité ou aux limites d'intensité de champ RF, les utilisateurs peuvent sur l'exposition aux radiofréquences et la conformité and compliance d'acquiescer les informations correspondantes. La distance minimale du corps à utiliser le dispositif est de 20 cm.

Last Updated: 5/24/2023, 9:49:58 AM

## ANEXO 3- Hoja de datos del nodo lora





**ERASynth Micro: USB-Powered, Low-Priced,  
Open Source, RF Signal Generator**

**DATASHEET**



## GENERAL DESCRIPTION

ERASynth Micro is an open source analog RF signal generator featuring an Arduino Micro micro-controller and a touch display. ERASynth Micro uses advanced PLL/VCO technology, coupled with an internal ultra-low phase noise frequency reference to form a programmable analog signal generator capable of generating a low phase noise signals up to 6.4 GHz. ERASynth Micro provides fast frequency switching and fine-tuning resolution using a dual loop PLL architecture. ERASynth Micro also offers frequency, amplitude and pulse modulation capabilities. The frequency tuning and control commands are loaded into the instrument via the serial interface or via Touch Display or Windows GUI.



## FEATURES

**Architecture:** Dual loop Fractional-N PLL driven by a 10 MHz reference.

**Frequency Range:** 12.5 MHz to 6.4 GHz

**Amplitude Range:** -50 to +15 dBm

**Phase Noise:** -115 dBc/Hz @ 1 GHz output and 10 kHz offset

**Frequency Switching Time:** <1ms

**Reference:** Ultra-low noise 50 MHz VCXO locked to a  $\pm 500$  ppb TCXO

**MCU:** ATMEGA32U4-MU (same as in the Arduino Micro board)

### Interfaces:

- Touch Display Module (3.2" Nextion NX4024T032)
- Micro-USB for power input and serial access
- REF IN (SMA) for external reference input
- REF Out (SMA) for 10 MHz reference output
- RF Out (SMA)
- Expansion connector: External trigger input, external modulation input, microphone input, GPIO (I2C) and SPI

**Dimensions:** 57 mm x 118 mm x 23 mm

**Weight:** 120g

**Power Input:** 5V

**Power Consumption:** 2W

**Enclosure:** Injection molded plastic case

**Open Source:** Schematics, embedded Arduino code, LCD screen source code and RS-232 command set

**Modulation:** AM, FM, Pulse (Internal and external)



## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

	Minimum	Typical	Maximum
Supply Voltage	4.5 V	5 V	5.2 V
Supply Current		400 mA	
Supply Current, RF Out Muted		200 mA	
Minimum Output Power		-50 dBm	
Maximum Output Power		15 dBm	
Output Level Accuracy		± 1.5 dB	
Output Power Resolution		1 dB	
Frequency Resolution	1 Hz		
Frequency Accuracy		±500 ppb	
Minimum Dwell Time*	1 ms		
External Reference Input Level	-10 dBm	0 dBm	+10 dBm
External Reference Locking Range		10 MHz ± 30 ppm	
External Trigger Low Level Input Voltage	0 V		0.7 V
External Trigger High Level Input Voltage	2 V		3.3 V
External Modulation Input Voltage Level			± 2.5 V
RF Output Impedance		50 Ohm	

\* Dwell time: Duration of each signal point in a sweep sequence set by user.

## THERMAL CHARACTERISTICS

**Operating temperature range:** 0 to +50 °C

**Non-operating temperature range:** -40 to +85 °C

**Warm-up time:** 10 minutes

## EXPANSION CONNECTOR PINOUT

Description	Type	Row1	Row2	Type	Description
Master Input Slave Output	Input/Output	MISO	5V	Output	Filtered 5V Output
Clock	Input/Output	CLK	MOSI	Input/Output	Master Output Slave Input
Reset	Input/Output	RST	GND	Power	Ground
Ground	Power	GND	IO2	Input/Output	General Purpose IO2
Ground	Power	GND	VIN	Input	Voltage Input (5V typ.)
Ground	Power	GND	MOD	Input	Ext. Modulation Input
Ground	Power	GND	MIC	Input	Microphone (Electret) Input
Ground	Power	GND	TRIG	Input	Trigger Input (Sweep&Pulse)
Ground	Power	GND	3V3	Output	Regulated 3V3 Output
Ground	Power	GND	IO1	Input/Output	General Purpose IO1

## TYPICAL PERFORMANCE

### 1) Output Power

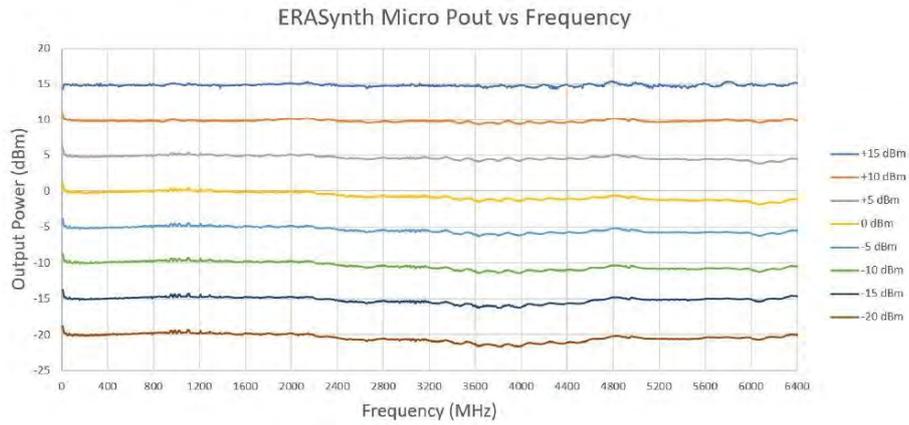


Figure 2: ERASynth Micro Power Output vs Frequency

## 2) Spectral Purity

### Broadband Non-Harmonic Spurious Emissions

Frequency	dBc (typical) at 0 dBm specified output power
12.5 MHz – 6.4 GHz	-48 dBc

### Harmonics (2nd or 3rd harmonics, whichever is worse)

Frequency	dBc (typical) at 0 dBm specified output power
100 MHz	-13 dBc
1 GHz	-16 dBc
2 GHz	-26 dBc
3 GHz	-36 dBc
6 GHz	-43 dBc

### Sub-Harmonics (1/2 or 1/3 harmonics, whichever is worse)

Frequency	dBc (typical) at 0 dBm specified output power
30 MHz	-86 dBc
100 MHz	-67 dBc
1 GHz	-59 dBc
3 GHz	-70 dBc
6 GHz	-68 dBc

### 3) Phase Noise

Frequency Offset (@ 1GHz output)	dBc (typical)
100 Hz	-74 dBc/Hz
1 kHz	-105 dBc/Hz
10 kHz	-123 dBc/Hz
100 kHz	-128 dBc/Hz
1 MHz	-142 dBc/Hz
10 MHz	-143 dBc/Hz
100 MHz	-143 dBc/Hz

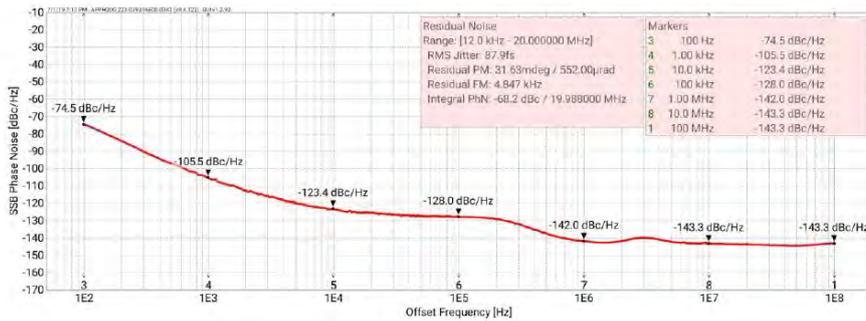


Figure 3: Phase Noise @ 1GHz output

## 4) Modulation

### Amplitude Modulation (AM)

Modulation Depth	28 dB (typ) (*)
Maximum Depth (Linear)	99%
Depth resolution	1%
Internal Modulation Waveforms	Sine, Triangle, Ramp, Square
Maximum Internal Modulation Frequency	15 kHz (typ)
Maximum External Modulation Frequency	20 kHz (typ)
External Input (MOD Input)	± 2.5 V (typ)
External Input (MOD Input) Impedance	10 kΩ (typ)
*Measured with power set at max. amplitude range. AM is clipped when available power (min. or max.) is reached.	

### Frequency Modulation (FM)

Maximum Deviation	12.5-25 MHz	10 kHz
	25-50 MHz	25 kHz
	50-100 MHz	50 kHz
	100-200 MHz	100 kHz
	200-400 MHz	200 kHz
	400-800 MHz	400 kHz
	800-1600 MHz	800 kHz
	1600-3200 MHz	1600 kHz
	3200-6400 MHz	3200 kHz
Internal Modulation Waveforms	Sine, Triangle, Ramp, Square	
Maximum Internal Modulation Frequency	15 kHz (typ)	
Maximum External Modulation Frequency	20 kHz (typ)	
External Input (MOD Input)	± 2.5 V (typ)	
External Input (MOD Input) Impedance	10 kΩ (typ)	

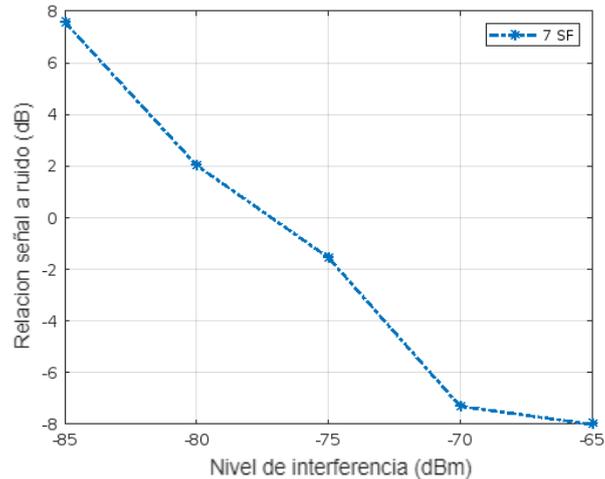
### Pulse Modulation

On/Off Ratio	100 MHz	49 dB (typ)
	1 GHz	50 dB (typ)
	3 GHz	57 dB (typ)
	6 GHz	48 dB (typ)
Minimum Pulse Width	50 us (typ)	
Minimum Pulse Period	100 us (typ)	
Maximum Pulse Period	999 s	
Rise Time (10 to 90%)	15 us (typ)	
Fall Time (10 to 90%)	5 us (typ)	
External Input (TRIG Input)	+3.3 V = RF ON, 0 V = RF OFF	
External Input (TRIG Input) Impedance	5 k $\Omega$ (typ)	

## ANEXO 5- Procesamiento de datos en matlab

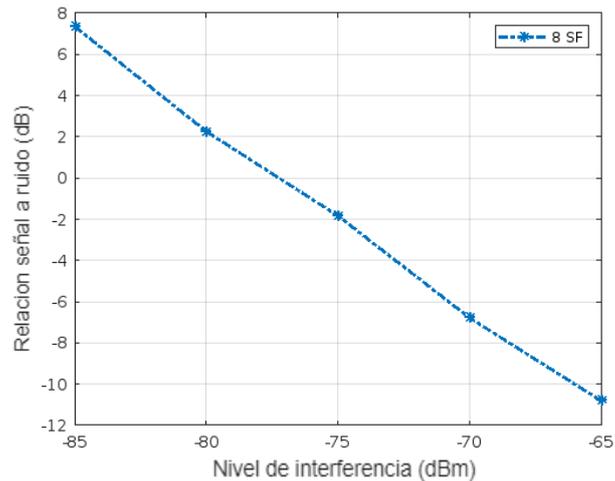
SNR en relación a niveles de interferencia para SF de 7

```
dato01 = readtable("datos para procesar/9sfvsinterferencia.csv");  
figure()  
plot(dato01.Potencia,dato01.SNR,'-.*','LineWidth',2)  
xlabel('Nivel de interferencia (dBm)')  
ylabel('Relación señal a ruido (dB)')  
grid  
legend('7 SF')
```



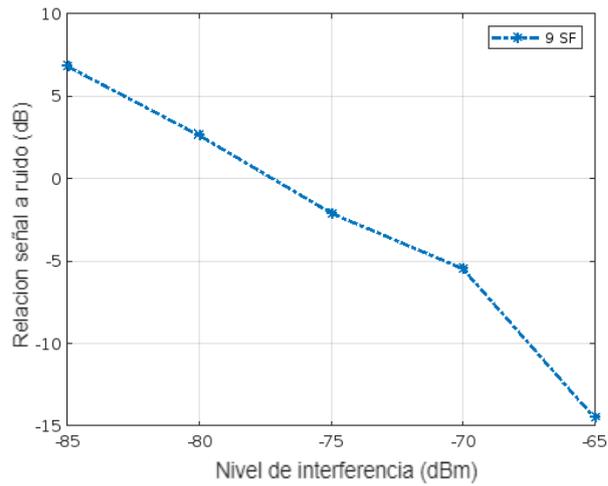
SNR en relación a niveles de interferencia para SF de 8

```
dato02 = readtable("datos para procesar/9sfvsinterferencia.csv");  
figure()  
plot(dato02.Potencia,dato02.SNR,'-.*','LineWidth',2)  
xlabel('Nivel de interferencia (dBm)')  
ylabel('Relación señal a ruido (dB)')  
grid  
legend('8 SF')
```



SNR en relación a niveles de interferencia para SF de 9

```
dato03 = readtable("datos para procesar/9sfvsinterferencia.csv");  
figure()  
plot(dato03.Potencia,dato03.SNR,'-.*','LineWidth',2)  
xlabel('Nivel de interferencia (dBm)')  
ylabel('Relación señal a ruido (dB)')  
grid  
legend('9 SF')
```

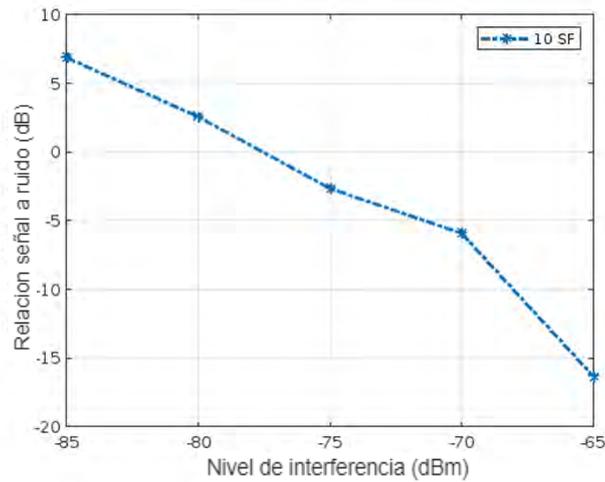


SNR en relación a niveles de interferencia para SF de 10

```

dato04 = readtable("datos para procesar/10sfvsinterferencia.csv");
figure()
plot(dato04.Potencia,dato04.SNR,'-.*','LineWidth',2)
xlabel('Nivel de interferencia (dBm)')
ylabel('Relación señal a ruido (dB)')
grid
legend('10 SF')

```

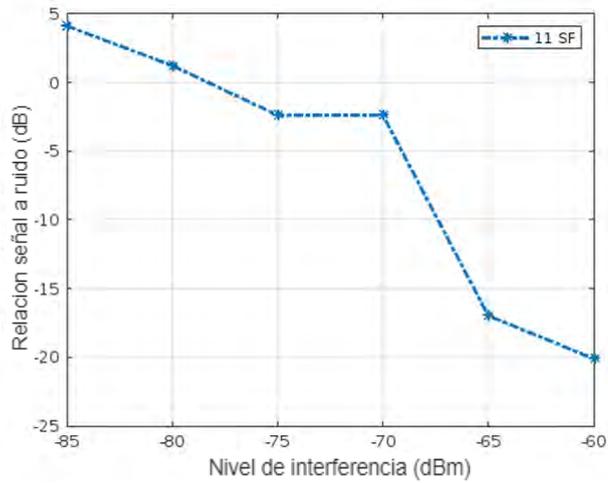


SNR en relación a niveles de interferencia para SF de 11

```

dato05 = readtable("datos para procesar/11sfvsinterferencia.csv");
figure()
plot(dato05.Potencia,dato05.SNR,'-.*','LineWidth',2)
xlabel('Nivel de interferencia (dBm)')
ylabel('Relación señal a ruido (dB)')
grid
legend('11 SF')

```

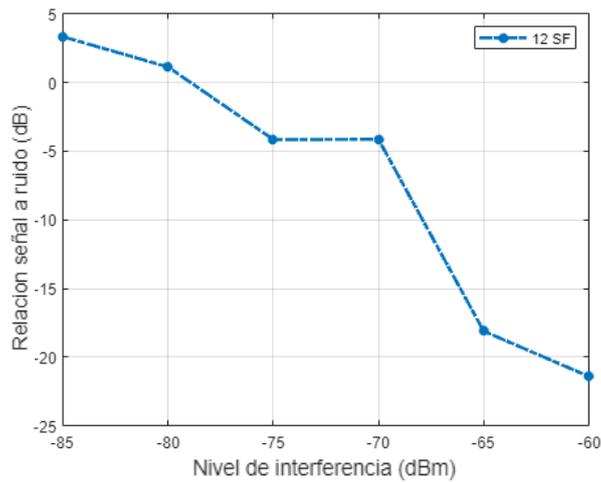


SNR en relación a niveles de interferencia para SF de 12

```

dato06 = readtable("datos para procesar/12sfvsinterferencia.csv");
figure()
plot(dato06.Potencia,dato06.SNR,'-.', 'LineWidth',2)
xlabel('Nivel de interferencia (dBm)')
ylabel('Relación señal a ruido (dB)')
grid
legend('12 SF');

```

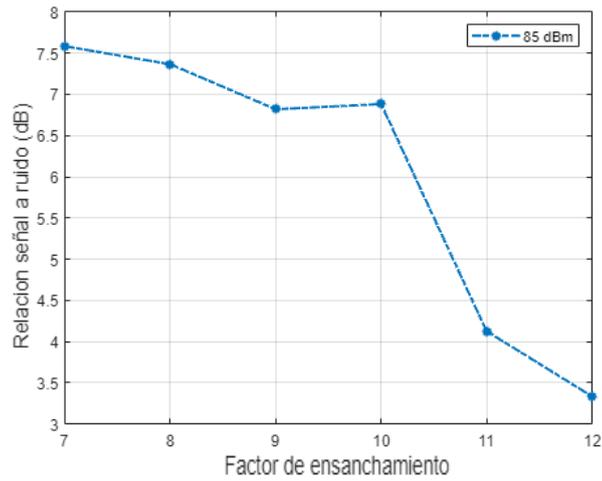


SNR en relación al spreading factor (85 dBm)

```

dato1 = readtable("datos para procesar/85dbm.csv");
figure()
plot(dato1.DataRate,dato1.SNR,'-.*', 'LineWidth',1.5)
xlabel('Factor de ensanchamiento')
ylabel(['Relación señal a ruido (dB)'])
grid
legend('85 dBm')

```

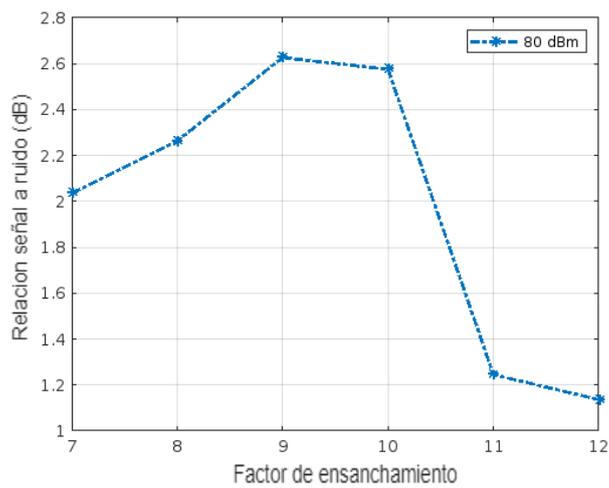


SNR en relación al spreading factor (80 dBm)

```

dato2 = readtable("datos para procesar/80dbm.csv");
figure()
plot(dato2.DataRate,dato2.SNR,'-.*','LineWidth',2)
xlabel('Factor de ensanchamiento')
ylabel('Relación señal a ruido (dB)')
grid
legend('80 dBm')

```

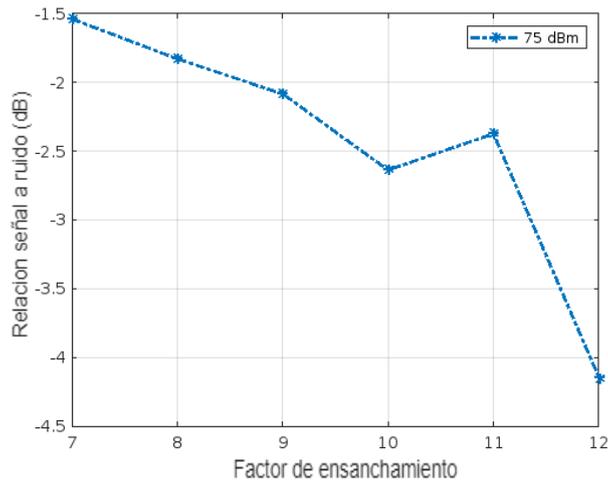


SNR en relación al spreading factor (75 dBm)

```

dato3 = readtable("datos para procesar/75dbm.csv");
figure()
plot(dato3.DataRate,dato3.SNR,'-.*','LineWidth',2)
xlabel('Factor de ensanchamiento')
ylabel('Relación señal a ruido (dB)')
grid
legend('75 dBm')

```



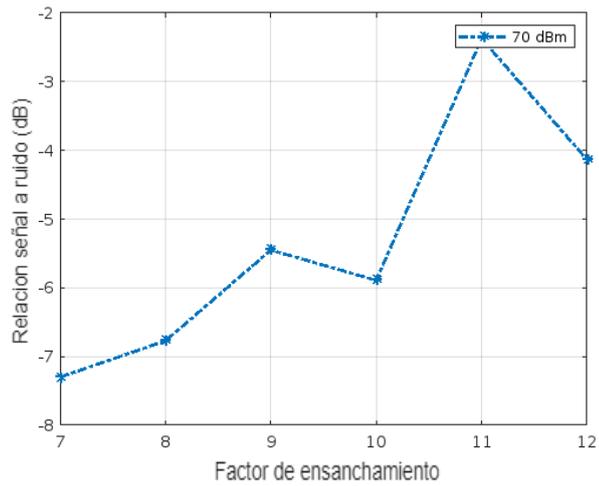
SNR en relación al spreading factor (70 dBm)

```

dato4 = readtable("datos para procesar/70dbm.csv");
figure()
plot(dato4.DataRate,dato4.SNR,'-.*','LineWidth',2)
xlabel('Factor de ensanchamiento')
ylabel('Relación señal a ruido (dB)')
grid
legend('70 dBm')

```

-



## ANEXO 6- Código de programación de los nodos LoRa

```
// incluir las siguientes librerias
#include <lmic.h>
#include <hal/hal.h>
#include <SPI.h>
#ifdef COMPILER_REGRESSION_TEST
#define FILLMEIN 0
#else
#define FILLMEIN (#dont edit this, edit the lines that use FILLMEIN)
#endif

// llave de acceso a la red LoRaWAN creada
static const PROGMEM ul_t NWKSKEY[16] = { 0xBC, 0x22, 0x15, 0xF9, 0x77, 0x11, 0x1D, 0xEF, 0x71, 0xBE, 0xBE, 0x32, 0xBF, 0x68, 0x45, 0xA3};

//llave de acceso a la aplicacion
static const ul_t PROGMEM APPSKEY[16] = { 0xB7, 0xE0, 0x85, 0x69, 0xA8, 0xE9, 0x69, 0xDB, 0x46, 0xD1, 0x56, 0xD6, 0x04, 0x60, 0x78, 0xED};

static const u4_t DEVADDR = 0x260C5EF9; // <-- Change this address for every node!

// Estas devoluciones de llamada solo se usan en activación inalámbrica, por lo que son
// se deja vacio aqui (no podemos omitirlos por completo a menos que
// DISABLE_JOIN está configurado en arduino-lmic/project_config/lmic_project_config.h,
// de lo contrario el enlazador se quejará).
void os_getArtEui (ul_t* buf) { }
void os_getDevEui (ul_t* buf) { }
void os_getDevKey (ul_t* buf) { }

static uint8_t mydata[] = "Hello, world!";
static osjob_t sendjob;

// Programe TX cada tantos segundos (puede alargarse debido al deber)
// limitaciones del ciclo).
const unsigned TX_INTERVAL = 0.500;

// codigo para configurar los pines del codulo
const lmic_pinmap lmic_pins = {
  .nss = 18, // chip del modulo usado
  .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
  .rst = 23, // pin de reinicio
  .dio = {26, 33,32}, // puentes externos del modulo
};
// codigo para eventos
void onEvent (ev_t ev) {
  Serial.print(os_getTime());
  Serial.print(" ");
  switch(ev) {
    case EV_SCAN_TIMEOUT:
      Serial.println(F("EV_SCAN_TIMEOUT"));
      break;
    case EV_BEACON_FOUND:
      Serial.println(F("EV_BEACON_FOUND"));
      break;
    case EV_BEACON_MISSED:
      Serial.println(F("EV_BEACON_MISSED"));
      break;
    case EV_BEACON_TRACKED:
      Serial.println(F("EV_BEACON_TRACKED"));
      break;
    case EV_JOINING:
      Serial.println(F("EV_JOINING"));
      break;
    case EV_JOINED:
      Serial.println(F("EV_JOINED"));
      break;
    case EV_JOIN_FAILED:
      Serial.println(F("EV_JOIN_FAILED"));
      break;
    case EV_REJOIN_FAILED:
      Serial.println(F("EV_REJOIN_FAILED"));
      break;
    case EV_TXCOMPLETE:
      Serial.println(F("EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)"));
      if (LMIC.txrxFlags & TXRX_ACK)
        Serial.println(F("Received ack"));
      if (LMIC.dataLen) {
        Serial.println(F("Received "));
        Serial.println(LMIC.dataLen);
        Serial.println(F(" bytes of payload"));
      }
      // Para programar la próxima transmisión
      os_setTimedCallback(&sendjob, os_getTime()+sec2osticks(TX_INTERVAL), do_send);
      break;
    case EV_LOST_TSYNC:
      Serial.println(F("EV_LOST_TSYNC"));
      break;
    case EV_RESET:
      Serial.println(F("EV_RESET"));
      break;
    case EV_RXCOMPLETE:
      Serial.println(F("EV_RXCOMPLETE"));
  }
}
```

```

        break;
    case EV_LINK_DEAD:
        Serial.println(F("EV_LINK_DEAD"));
        break;
    case EV_LINK_ALIVE:
        Serial.println(F("EV_LINK_ALIVE"));
        break;

    case EV_TXSTART:
        Serial.println(F("EV_TXSTART"));
        break;
    case EV_TXCANCELED:
        Serial.println(F("EV_TXCANCELED"));
        break;
    case EV_RXSTART:
        break;
    case EV_JOIN_TXCOMPLETE:
        Serial.println(F("EV_JOIN_TXCOMPLETE: no JoinAccept"));
        break;
    default:
        Serial.print(F("Unknown event: "));
        Serial.println((unsigned) ev);
        break;
    }
}

void do_send(osjob_t* j){
    // Código para comprobar si no hay un trabajo TX/RX actual en ejecución
    if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND) {
        Serial.println(F("OP_TXRXPEND, not sending"));
    } else {
        // Preparar la transmisión de datos ascendentes en el próximo momento posible.
        LMIC_setTxData2(1, mydata, sizeof(mydata)-1, 0);
        Serial.println(F("Packet queued"));
    }
    // El próximo Transmisión está programado después del evento TX_COMPLETE.
}

void setup() {
    // pinMode(13, OUTPUT);
    while (!Serial); // espera a que se inicialice Serial
    Serial.begin(115200);
    delay(100); // por código de muestra en la prueba RF_95
    Serial.println(F("Starting"));

    pinMode(VCC_ENABLE, OUTPUT);
    digitalWrite(VCC_ENABLE, HIGH);
    delay(1000);
    #endif

    os_init();

    LMIC_reset();

    #ifdef PROGRAM

    uint8_t appskey[sizeof(APPSKEY)];
    uint8_t nwkskey[sizeof(NWKSKEY)];
    memcpy_P(appskey, APPSKEY, sizeof(APPSKEY));
    memcpy_P(nwkskey, NWKSKEY, sizeof(NWKSKEY));
    LMIC_setSession (0x13, DEVADDR, nwkskey, appskey);
    #else
    // Si no ejecuta un AVR con PROGRAM, simplemente use las matrices directamente
    LMIC_setSession (0x13, DEVADDR, NWKSKEY, APPSKEY);
    #endif

    // se elige la banda Kr 920 para las pruebas.
    #if defined(CFG_kr920)

    #else
    # error Region not supported
    #endif

    // Deshabilitar la validación de verificación de enlaces
    LMIC_setLinkCheckMode(0);

    // Factor de ensanchamiento usado para recibir los datos de la puerta de enlace
    LMIC.dn2Dr = DR_SF9;

    // Establece la velocidad de datos y la potencia de transmisión para el enlace ascendente
    LMIC_setDrTxpow(DR_SF7,14);

    // inicio de trabajo
    do_send(&sendjob);
}

void loop() {
    unsigned long now;
    now = millis();
    if ((now & 512) != 0) {

        void loop() {
            unsigned long now;
            now = millis();
            if ((now & 512) != 0) {
                digitalWrite(13, HIGH);
            }
            else {
                digitalWrite(13, LOW);
            }
        }

        os_runloop_once();
    }
}

```

## ANEXO 6- Configuración de la puerta de enlace

Para la configuración de la puerta de enlace, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones.

- **Acceso a la interfaz web.**

El acceso a la interfaz web se logró mediante el navegador web, digitando la dirección IP asignada a la puerta de enlace e introduciendo la respectiva contraseña.



- **Plan de frecuencia**

El plan de frecuencia de la puerta de enlace LoRa, fue establecida según las características de transmisión de los nodos LoRa, los cuales se situaron en la banda KR920.



- **Frecuencia de recepción**

Para la configuración de los canales de recepción se tomó en cuenta en plan de frecuencias de la banda KR 920, donde las frecuencias de los canales de recepción para la puerta de enlace fueron establecidas en las frecuencias de 922.1 MHz, 922.30 MHz y 922.50 MHz.

Chan. ID	MultiSF 0	MultiSF 1	MultiSF 2
Enable	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Radio	Radio 0 ▾	Radio 0 ▾	Radio 0 ▾
If	-200000	0	200000
Freq.	922.5MHz	922.3MHz	922.1MHz

- **Ancho de banda del canal de recepción**

Para la configuración del ancho de banda de la señal LoRa se tomó en consideración el establecido por protocolo.

Freq.	922.5MHz	922.3MHz	922.1MHz
Bandwidth	125 KHz	125 KHz	125 KHz

- **Factor de ensanchamiento**

Cada canal de recepción de la puerta de enlace, fue establecido para que pueda recibir todos los factores de ensanchamiento admitidos por LoRaWAN en razón de las distintas pruebas experimentales a realizar.

Freq.	922.5MHz	922.3MHz	922.1MHz
Bandwidth	125 KHz	125 KHz	125 KHz
DataRate	All SF	All SF	All SF

- **Clases**

La puerta de enlace para canal establecido, por defecto admite las clases A y C, por lo que no fue necesario la configuración del mismo.

- Pruebas de operatividad.

