



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA DE REDES Y
COMUNICACIONES**

Diseño de un sistema de monitoreo remoto basado en tecnología IoT para la optimización de las rutas de recolección de basura de los contenedores de los principales parques de San Isidro basado en el nuevo estándar lorawan ITU-T Y.4480

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero de Redes y Comunicaciones

AUTOR(ES)

Hurtado Arguedas, Giovanni Walter Rolando

0009-0003-4343-5813

ASESOR(ES)

Rodriguez Gutierrez, Alfredo Efrain

0000-0001-6246-049X

Lima, 16 de noviembre de 2023

DEDICATORIA

A mi esposa, ya que ella siempre creyó en mi y es así que gracias a su motivación, apoyo incondicional, sacrificio, tolerancia infinita, paciencia y amor pude culminar esta tesis que cierra una imborrable etapa de mi vida.

Gracias Karina, este día no existiría si no estuvieras tú en mi vida.

RESUMEN

Este proyecto aborda la gestión eficiente de residuos sólidos mediante la implementación de un sistema de monitoreo remoto en tiempo real. Actualmente, la recolección de basura se realiza de manera estática, lo que resulta en desperdicio de recursos, si los contenedores tienen poco o nada de contenido; y en problemas ambientales, si éstos se desbordan. La propuesta consiste en utilizar la tecnología LoRa para enviar pequeñas cantidades de datos sobre el nivel de basura en los contenedores. Este sistema permitirá monitorear y analizar el estado de los contenedores en tiempo real. La ventaja clave de esta solución es su capacidad para funcionar de manera autónoma, sin depender de la red eléctrica y a un bajo costo. La información recopilada se utilizará para optimizar la ruta de recolección, evitando el desperdicio de combustible y mano de obra cuando los contenedores tengan poco contenido, y previniendo el desbordamiento que contamina el medio ambiente cuando se llenan demasiado. En resumen, esta propuesta busca implementar un sistema eficiente y rentable de monitoreo remoto de contenedores de basura utilizando la tecnología LoRa para mejorar la gestión de residuos sólidos y contribuir a la preservación del medio ambiente.

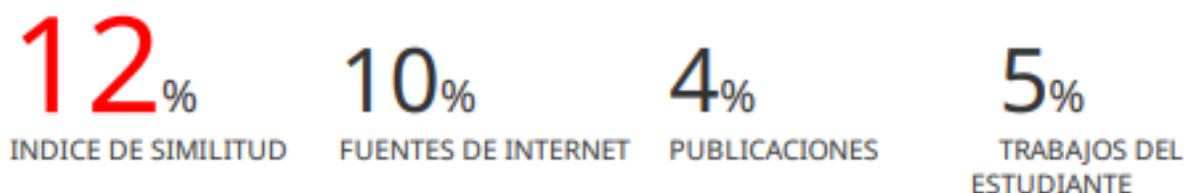
Palabras clave: LPWAN; LORA; LORAWAN; IOT

ABSTRACT

This project addresses the efficient management of solid waste through the implementation of a real-time remote monitoring system. Currently, garbage collection is carried out statically, resulting in resource wastage when containers have low content and environmental issues when they overflow. The proposal involves using LoRa technology to send small amounts of data about the garbage level in the containers. This system will allow monitoring and analyzing the status of the containers in real-time. The key advantage of this solution is its ability to operate autonomously, without relying on the electrical grid, and at a low cost. The collected information will be used to optimize the collection route, avoiding fuel and labor waste when containers have low content and preventing overflow that pollutes the environment when they are too full. In summary, the proposal aims to implement an efficient and cost-effective remote monitoring system for waste containers, using LoRa technology to enhance solid waste management and contribute to environmental preservation.

U820972_ARGUEDAS GIOVANNI WALTER ROLANDO
HURTADO_Diseño de un sistema de monitoreo remoto
basado en tecnología IoT para la optimización de las rutas de
recolección de basura de los contenedores de lo

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	repositorio.espe.edu.ec:8080 Fuente de Internet	1%
3	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Internacional de la Rioja Trabajo del estudiante	1%
5	www.2cigroup.com Fuente de Internet	1%
6	ria.utn.edu.ar Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad de Málaga - Tii Trabajo del estudiante	<1%

repositorio.espe.edu.ec

Keywords: LPWAN; LORA; LORAWAN; IOT

TABLA DE CONTENIDOS

1.	CAPÍTULO I.....	18
1.1	INTRODUCCIÓN	18
1.2	ORGANIZACIÓN OBJETIVO	20
1.2.1	Campo de Acción	20
1.3	IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	21
1.3.1	Situación Problemática	21
1.3.2	Problema a Resolver	24
1.4	OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.4.1	Objetivo General.....	24
1.4.2	Objetivos Específicos	24
1.4.3	Indicadores de Logro de los Objetivos	25
1.5	JUSTIFICACIÓN.....	26
1.6	ESTADO DEL ARTE	27
2.	CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	37
2.1	LPWAN.....	37
2.1.1	Características de LPWAN.....	39
2.1.2	Clasificación de LPWAN	39
2.1.3	Enfoques Tecnológicos de LPWAN.....	40
2.1.4	Tecnologías LPWAN para Sistemas IoT	42
2.2	LORA	45
2.2.1	Modelo de Referencia LoRa.....	46
2.2.2	Modulación LoRa	47

2.2.3	Parámetros Básicos.....	50
2.3	LORAWAN	53
2.3.1	Arquitectura de Red LoRaWAN	53
3.	CAPÍTULO III: ANÁLISIS DEL PROBLEMA	70
3.1	Problemática 1: Infraestructura Tecnológica	70
3.2	Problemática 2: Tecnología de Comunicación.....	71
3.3	Problemática 3: Plataforma de Visualización	72
4.	CAPÍTULO IV: DISEÑO DE LA SOLUCIÓN	74
4.1	Diseño del prototipo	74
4.1.1	Etapa de Energía.....	74
4.1.2	Etapa de Sensado	76
4.1.3	Etapa de Control.....	79
4.1.4	Etapa de Transmisión	80
4.2	Diseño de la arquitectura de red bajo la especificación LoRaWAN 1.0.4.....	84
4.2.1	Estándar o Especificación.....	85
4.2.2	Distancia de Cobertura	86
4.2.3	Frecuencia de Trabajo	87
4.2.4	Ancho de Banda de Canal	91
4.2.5	Factor de Ensanchamiento.....	91
4.2.6	Tasa de Codificación	92
4.2.7	Tasa de Transmisión de Datos.....	93
4.2.8	Potencia Efectiva Irradiada.....	94
4.2.10	Gateway LoRa.....	102
4.2.11	Pruebas de Envío de Información.....	103
4.3	Diseño del dashboard	149
4.3.1	Servidor de Alojamiento en Nube	149

4.3.2	Servidor de Base de Datos en Nube	154
4.3.3	Conexión a The Things Network (TTN)	155
4.3.4	Generación de la Ruta.....	157
5.	CAPÍTULO V:	158
5.1	Resultados de Calibración del Sensor de Nivel de Llenado.....	158
5.2	Resultados de Comparativas de las Pruebas de Envío de Información.....	163
5.3	Resultados del Monitoreo de la Información Enviada y Trazado de la Ruta Óptima	172
5.3.1	Medición de Nivel de Llenado	172
5.3.2	Medición de Polución Ambiental	173
5.3.3	Medición de Humedad Ambiental.....	175
5.3.4	Medición de Temperatura Ambiental.....	177
5.3.6	Medición de Radiación Solar	181
5.3.7	Generación de la Ruta Óptima.....	183
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	184
6.1	Conclusiones	184
6.2	Recomendaciones.....	184
7.	REFERENCIAS	186
8.	GLOSARIO	195
9.	SIGLARIO	196
	ANEXOS	197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Indicadores de logro	25
Tabla 2 Descripción del contenedor.....	69
Tabla 3 Comparación de rendimientos	100
Tabla 4 Especificaciones técnicas en prueba 1	105
Tabla 5 Especificaciones técnicas en prueba 2	110
Tabla 6 Especificaciones técnicas en prueba 3	115
Tabla 7 Especificaciones técnicas en prueba 4	120
Tabla 8 Especificaciones técnicas en prueba 5	125
Tabla 9 Especificaciones técnicas en prueba 6	130
Tabla 10 Especificaciones técnicas en prueba 7	132
Tabla 11 Especificaciones técnicas en prueba 8	137
Tabla 12 Especificaciones técnicas en prueba 9	142
Tabla 13 Especificaciones técnicas en prueba 10	147
Tabla 14 Matriz de selección de proveedor por almacenamiento.....	149
Tabla 15 Matriz de selección de proveedor por infraestructura de red.....	150
Tabla 16 Matriz de selección de proveedor por costo	151
Tabla 17 Matriz final de criterios de selección	153
Tabla 18 Cuadro comparativo de bases de datos	154
Tabla 19 Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 25,05 m.....	163
Tabla 20 Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 73,8 m.....	164
Tabla 21 Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 135,93 m.....	165

Tabla 22 Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 148,41 m.....	166
Tabla 23 Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 238,63 m.....	167
Tabla 24 Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 321,71 m.....	168
Tabla 25 Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 217,35 m.....	169
Tabla 26 Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 321,71 m.....	170
Tabla 27 Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 394,77 m.....	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Población de San Isidro	22
Figura 2 Ruta sin optimizar de un camión recolector de basura.....	23
Figura 3 Ruta optimizada de un camión recolector de basura.....	27
Figura 4 Comparación de velocidad de datos, consumo de energía y rango para tecnologías de comunicación inalámbrica	39
Figura 5 Ultra narrow band (UNB).....	41
Figura 6 Spread spectrum (SS)	42
Figura 7 Tecnologías de comunicación LPWAN para aplicaciones IoT.....	44
Figura 8 Comparación de tecnologías LPWAN para su uso en aplicaciones de IoT	44
Figura 9 Modelo de referencia LoRaWAN	47
Figura 10 Modulación LoRa.....	48
Figura 11 Factor de ensanchamiento vs ancho de banda del canal.....	49
Figura 12 Modulación / Demodulación LoRa	50
Figura 13 Anchos de banda utilizados por LoRa.....	52
Figura 14 Relación entre velocidad y distancia en LoRaWAN.....	53
Figura 15 Arquitectura de una red LoRaWAN.....	54
Figura 16 Clases de nodos	56
Figura 17 Flujo de solicitud de unión en LoRaWAN	58
Figura 18 Sensor HC-SR04	59
Figura 19 Principio de funcionamiento del sensor ultrasónico HC-SR04.....	59
Figura 20 Configuración de pines del HC-SR04	60

Figura 21 Sensor MQ-7	61
Figura 22 Configuración de pines del MQ-7	61
Figura 23 Sensor ML-8511	62
Figura 24 Configuración de pines del ML-8511	62
Figura 25 Sensor DHT-11	63
Figura 26 Configuración de pines del DHT-11	63
Figura 27 Sensor LM-393	64
Figura 28 Configuración de pines del LM-393	64
Figura 29 Configuración de pines del ESP32	65
Figura 30 Gateway interior RAK7246.....	66
Figura 31 Plataforma de mapeo de rutas de Google	68
Figura 32 Dimensiones del contenedor	69
Figura 33 Etapas del prototipo.....	74
Figura 34 Batería de litio	75
Figura 35 Convertidor de voltaje	75
Figura 36 Regulador reductor de voltaje	76
Figura 37 Sensores.....	77
Figura 38 Montaje del sensor ultrasónico de nivel de llenado HC-SR04.....	77
Figura 39 Microcontrolador ESP32.....	79
Figura 40 Muestra de líneas de código en IDE.....	80
Figura 41 Transceptor Dragino LoRa Bee.....	81
Figura 42 Circuito lógico	82
Figura 43 Circuito impreso	83

Figura 44 Diseño del prototipo	83
Figura 45 Arquitectura de red LoRa según la recomendación ITU-T Y.4480	84
Figura 46 Equivalencia de la norma	86
Figura 47 Distancia de cobertura.....	86
Figura 48 Parámetros regionales para LoRaWAN	87
Figura 49 Rango de frecuencias de uso libre en Perú.....	88
Figura 50 Preconfiguración del gateway RAK7246.....	89
Figura 51 Separación entre canales	89
Figura 52 Canales para la transmisión de datos.....	90
Figura 53 Ancho de banda de canal.....	91
Figura 54 Rango de factor de ensanchamiento	92
Figura 55 Tasa de codificación para el ancho de banda de canal	92
Figura 56 Valores de velocidad de transmisión de datos.....	93
Figura 57 Regulación de la máxima potencia de transmisión irradiada en Perú.....	94
Figura 58 LoRa modem calculator tool: Rendimiento con factor de ensanchamiento 10.....	96
Figura 59 LoRa modem calculator tool: Rendimiento con factor de ensanchamiento 9.....	97
Figura 60 LoRa modem calculator tool: Rendimiento con factor de ensanchamiento 8.....	98
Figura 61 LoRa modem calculator tool: Rendimiento con factor de ensanchamiento 7.....	99
Figura 62 Relación entre factor de ensanchamiento y sensibilidad.....	100
Figura 63 Gateway interior LoRaWAN RAK7246G	102
Figura 64 Niveles de sensibilidad del gateway RAK7246	103
Figura 65 Proceso de mediciones en campo.....	104
Figura 66 Panel del módulo de pruebas en The Things Network.....	104

Figura 67 Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 1	105
Figura 68 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 1.1.....	106
Figura 69 Información en la trama LoRaWAN en prueba 1.1	106
Figura 70 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 1.2.....	107
Figura 71 Información en la trama LoRaWAN en prueba 1.2	107
Figura 72 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 1.3.....	108
Figura 73 Información en la trama LoRaWAN en prueba 1.3	108
Figura 74 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 1.4.....	109
Figura 75 Información en la trama LoRaWAN en prueba 1.4	109
Figura 76 Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 2.....	110
Figura 77 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 2.1.....	111
Figura 78 Información en la trama LoRaWAN en prueba 2.1	111
Figura 79 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 2.2.....	112
Figura 80 Información en la trama LoRaWAN en prueba 2.2	112
Figura 81 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 2.3.....	113
Figura 82 Información en la trama LoRaWAN en prueba 2.3	113
Figura 83 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 2.4.....	114
Figura 84 Información en la trama LoRaWAN en prueba 2.4	114
Figura 85 Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 3.....	115
Figura 86 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 3.1.....	116
Figura 87 Información en la trama LoRaWAN en prueba 3.1	116
Figura 88 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 3.2.....	117
Figura 89 Información en la trama LoRaWAN en prueba 3.2	117

Figura 90 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 3.3.....	118
Figura 91 Información en la trama LoRaWAN en prueba 3.3	118
Figura 92 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 3.4.....	119
Figura 93 Información en la trama LoRaWAN en prueba 3.4	119
Figura 94 Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 4.....	120
Figura 95 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 4.1.....	121
Figura 96 Información en la trama LoRaWAN en prueba 4.1	121
Figura 97 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 4.2.....	122
Figura 98 Información en la trama LoRaWAN en prueba 4.2	122
Figura 99 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 4.3.....	123
Figura 100 Información en la trama LoRaWAN en prueba 4.3	123
Figura 101 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 4.4.....	124
Figura 102 Información en la trama LoRaWAN en prueba 4.4	124
Figura 103 Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 5.....	125
Figura 104 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 5.1.....	126
Figura 105 Información en la trama LoRaWAN en prueba 5.1	126
Figura 106 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 5.2.....	127
Figura 107 Información en la trama LoRaWAN en prueba 5.2	127
Figura 108 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 5.3.....	128
Figura 109 Información en la trama LoRaWAN en prueba 5.3	128
Figura 110 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 5.4.....	129
Figura 111 Información en la trama LoRaWAN en prueba 5.4	129
Figura 112 Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 6.....	130

Figura 113 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 6.1.....	131
Figura 114 Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 6.2.....	131
Figura 115 Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 6.3.....	131
Figura 116 Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 6.4.....	131
Figura 117 Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 7.....	132
Figura 118 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 7.1.....	133
Figura 119 Información en la trama LoRaWAN en prueba 7.1	133
Figura 120 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 7.2.....	134
Figura 121 Información en la trama LoRaWAN en prueba 7.2	134
Figura 122 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 7.3.....	135
Figura 123 Información en la trama LoRaWAN en prueba 7.3	135
Figura 124 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 7.4.....	136
Figura 125 Información en la trama LoRaWAN en prueba 7.4	136
Figura 126 Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 8.....	137
Figura 127 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 8.1.....	138
Figura 128 Información en la trama LoRaWAN en prueba 8.1	138
Figura 129 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 8.2.....	139
Figura 130 Información en la trama LoRaWAN en prueba 8.2	139
Figura 131 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 8.3.....	140
Figura 132 Información en la trama LoRaWAN en prueba 8.3	140
Figura 133 Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 8.4.....	141
Figura 134 Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 9.....	142
Figura 135 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 9.1.....	143

Figura 136 Información en la trama LoRaWAN en prueba 9.1	143
Figura 137 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 9.2.....	144
Figura 138 Información en la trama LoRaWAN en prueba 9.2	144
Figura 139 Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 9.3.....	145
Figura 140 Información en la trama LoRaWAN en prueba 9.3	145
Figura 141 Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 9.4.....	146
Figura 142 Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 10.....	147
Figura 143 Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 10.1.....	148
Figura 144 Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 10.2.....	148
Figura 145 Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 10.3.....	148
Figura 146 Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 10.4.....	149
Figura 147 Servidor de base de datos en Google Cloud	154
Figura 148 Plataforma de The Things Network	155
Figura 149 ID del gateway.....	156
Figura 150 Llaves a almacenarse en el prototipo	156
Figura 151 Muestra de programación de API.....	157
Figura 152 Prototipo de transmisión LoRa	158
Figura 153 Contenedor de basura simulado	159
Figura 154 Etapa de energía con batería autónoma	159
Figura 155 Resultado de simulación de un contenedor vacío de 1,2 m.....	160
Figura 156 Resultado de simulación de un contenedor casi lleno	161
Figura 157 Resultado de simulación de un contenedor lleno	162
Figura 158 Monitoreo del nivel de llenado en el dashboard.....	172

Figura 159 Monitoreo de la polución ambiental en el dashboard.....	173
Figura 160 Índice de calidad del aire	174
Figura 161 Monitoreo de la humedad ambiental en el dashboard.....	175
Figura 162 Rango óptimo de humedad relativa.....	176
Figura 163 Monitoreo de la temperatura ambiental en el dashboard.....	177
Figura 164 Criterio de clasificación climática.....	178
Figura 165 Monitoreo de la luminosidad ambiental en el dashboard	179
Figura 166 Niveles de iluminancia	180
Figura 167 Monitoreo de la radiación solar en el dashboard.....	181
Figura 168 Categorías de exposición a la radiación UV	182
Figura 169 Generación de la ruta óptima en el dashboard.....	183

1. CAPÍTULO I

TEMA

Smart Cities: Tecnología IoT sobre una red inalámbrica LPWAN

TÍTULO DEL PROYECTO

Diseño de un sistema de monitoreo remoto basado en tecnología IoT para la optimización del recojo de la basura por los camiones recolectores en los principales parques de San Isidro basado en la especificación LoRaWAN 1.0.4.

1.1 INTRODUCCIÓN

Una ciudad inteligente (Smart City), también llamada ciudad eficiente, implica el uso intenso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), y en particular del Internet de las Cosas (IoT), para la prestación de servicios públicos de alta calidad, productividad e innovación para lograr un desarrollo sostenible de la misma.

Las ciudades inteligentes son una combinación de varios sistemas de Internet de las cosas (IoT) que hacen que la vida humana sea más cómoda y segura en todos los aspectos.

El concepto de Smart City se basa en la recopilación de datos sobre entornos urbanos tanto construidos como naturales. Los datos se recopilan principalmente de sensores inteligentes, que utilizan la tecnología de Internet de las Cosas para medir parámetros físicos, así como para almacenar, analizar y comunicar datos con otros sistemas. La monitorización inteligente de sistemas urbanos como agua, energía, alumbrado público, transporte y recogida de residuos, se realiza generalmente mediante sensores alimentados por baterías y sistemas de comunicación que transmiten poca cantidad de datos.

Las ciudades inteligentes, según la definición estándar, utilizan las TIC para mejorar el rendimiento de sus activos y brindar interactividad a sus servicios. Sus servicios

aprovechan la infraestructura de las TIC para tomar decisiones inteligentes para ahorrar costos y reducir el tiempo necesario para servicios específicos. La recolección y disposición de residuos sólidos es uno de los servicios que se prestan en las ciudades de todo el mundo.

Con la creciente popularidad del Internet de las Cosas (IoT) y la disponibilidad de actuadores y sensores de bajo costo, los beneficios de estas tecnologías se pueden utilizar para resolver los problemas que enfrentan los métodos actuales de gestión de residuos en las ciudades.

Los desarrollos tecnológicos en el diseño de sensores, el avance en los protocolos de comunicación y los métodos de monitoreo remoto pueden brindar soluciones efectivas para el monitoreo en tiempo real de los contenedores de basura en áreas urbanas.

La versatilidad de los sensores inalámbricos y su uso diverso los convierte en una parte integral de la infraestructura inteligente de la ciudad. Los sensores de tráfico se pueden utilizar para ayudar en las decisiones de abrir y cerrar carriles para aliviar la congestión. Los sensores de audio pueden ayudar a reducir el área de disparo para rodear a los culpables. Los sensores de ubicación pueden comunicar la ubicación exacta de los desastres y accidentes a los hospitales más cercanos. Del mismo modo, los contenedores de residuos que cuentan con sensores de nivel pueden ofrecer datos importantes para la planificación y selección de rutas, además de determinar la cantidad de vehículos y trabajadores requeridos para la recolección y eliminación de basura.

En conclusión, una ciudad inteligente pretende convertir su infraestructura existente en bienes inteligentes que sean capaces de proporcionar suficiente información para tomar decisiones de manera más eficiente en tiempo real. Para lograr este objetivo, millones de

sensores en todo el mundo necesitan una tecnología eficiente, de largo alcance y de bajo consumo de energía.

1.2 ORGANIZACIÓN OBJETIVO

Innova Ambiental S.A. es una compañía de carácter privado con amplia experiencia en la administración de residuos sólidos urbanos, brindando soluciones y prestando servicios tanto a entidades públicas como a empresas privadas. En su cartera de empresas públicas, trabaja para varias municipalidades distritales de Lima Metropolitana, brindándoles servicios como: limpieza y barrido, lavado de avenidas, recolección y transporte, mantenimiento de áreas verdes, planta de transferencia, rellenos sanitarios, entre otros. Para ello, continuamente invierte en la modernización e innovación tecnológica de sus procesos e infraestructura, siendo los primeros en realizar operaciones automatizadas en su flota, utilizando novedosas herramientas y maquinarias (Innova Ambiental, 2023).

1.2.1 Campo de Acción

La gestión de residuos sólidos en San Isidro se desglosa en cuatro etapas: prerecogida, recogida, transporte y tratamiento. La fase de prerecogida es fundamental para el adecuado funcionamiento de todas las demás etapas, y que además ha experimentado mejoras y adaptaciones significativas en los últimos años.

En este proyecto, nos enfocaremos en la fase de prerecogida, la cual incluye la instalación de contenedores mediante el despliegue de sensores en los contenedores de basura en los principales parques de San Isidro. Asimismo, este proyecto se enfoca en los contenedores medianos de 240 L de capacidad, sobre los cuales se contempla el despliegue de una red de sensores IoT. Por otro lado, este proyecto no contempla la recolección de basura domiciliaria ni de la basura reciclable, ya que son procesos completamente distintos.

De igual manera, no se considera a los contenedores grandes (maleza) y chicos (tachos); así como tampoco a los contenedores de excretas de mascotas.

1.3 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 Situación Problemática

En la actualidad, uno de los principales desafíos que enfrentan las ciudades en expansión es la acumulación y gestión de residuos, ya que a medida que aumenta la población, se produce una mayor cantidad de basura, lo que a su vez implica un incremento en los costos asociados con la recolección de residuos sólidos. Además, este problema expone a la población a riesgos de enfermedades que pueden tener un impacto negativo en su calidad de vida y salud. Por otro lado, el auge económico experimentado en los últimos años también contribuye a la generación de mayores volúmenes de basura debido al aumento en el consumo.

Los residuos sólidos municipales, más conocidos como basura o desperdicios, es una fuente potencial primaria de contaminación; sin embargo, es un subproducto inevitable de la actividad humana. La gestión de residuos sólidos municipales sigue siendo un gran desafío en las zonas urbanas, lo que genera graves problemas ambientales y de salud. Según un informe sobre gestión de residuos (Banco Mundial, 2018), se estima que anualmente se producen aproximadamente 1.300 millones de toneladas de residuos sólidos en áreas urbanas a nivel global; y se proyecta que para el año 2050, esta cifra se incrementará en un 70%.

Asimismo, según informe defensorial (Defensoría del Pueblo, 2019), se destaca que el Perú produce, anualmente, una cantidad superior a los 7 millones de toneladas de basura,

lo que representa aproximadamente 20,000 toneladas diarias y alrededor de 1,000 toneladas por hora. Además, resalta que el 70% de estos desechos se origina en los hogares.

Por otro lado, San Isidro, distrito de clase socioeconómica alta y con un rápido crecimiento en las áreas residenciales, financieras y comerciales; cuenta con una población de casi 61,000 habitantes (Municipalidad de San Isidro, 2022) lo que ha dado lugar a una mayor concurrencia en los principales parques para disfrutar de sus compras, trotar o hacer ejercicios, jugar con los niños, pasear a los adultos mayores, sacar a las mascotas o simplemente para distraerse; y en consecuencia, se ha incrementado, e incluso algunas veces desbordado, la capacidad de los contenedores instalados, dejando la basura en los alrededores y ésta esparciéndose por el área, ocasionando la contaminación del ambiente con olores desagradables, causando molestias al público, poniendo en riesgo la salud de los vecinos; así como, la afectación en el ornato de la ciudad.

Figura 1

Población de San Isidro

Número de Habitantes

DESCRIPCIÓN	1993	2007	2017	Proy. 2022
HOMBRE	27,100	25,184	26,906	31,573
MUJER	35,904	32,872	33,829	37,836
TOTAL	63,004	58,056	60,735	69,409

Nota. Información al 2022. De "Compendio estadístico 2022", por Municipalidad de San Isidro, 2022

(https://www.munisanisidro.gob.pe/Transparencia/Tema02/Compendio_Estadistico_2022.pdf).

Por otra parte, la planificación de las rutas de los vehículos de recolección de residuos se lleva a cabo de manera estática y se fundamenta únicamente en la cercanía de los parques. La Figura 2 muestra el ejemplo de una ruta sin optimizar en Google (s.f. -a); en la que los camiones transitan muchas veces por ubicaciones en donde no hay la necesidad de recolección y no brindan atención en otros puntos con mayor urgencia; por lo que se convierte en un despilfarro de recursos cuando se recogen contenedores que se llenan parcialmente o casi nada. El problema se acentúa debido a los altos costos de operación de la flota por la manera ineficiente en que las rutas se planifican; malgastando recursos como: combustible, tiempo, personal, etc.

Figura 2

Ruta sin optimizar de un camión recolector de basura



Nota. Adaptado de “[Ubicación de contenedores en algunos parques de San Isidro]”, por Google, s.f.-a (<https://www.google.com/maps/@-12.0997133,-77.0252686,16z?authuser=0&entry=ttu>).

Por último, la ausencia de datos actualizados sobre la ubicación y la cantidad de uso de los contenedores de basura impide la planificación de una ruta de recolección eficiente.

1.3.2 Problema a Resolver

Ineficiente recojo de la basura por los camiones recolectores en el distrito de San Isidro.

1.4 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de monitoreo remoto basado en tecnología IoT para la optimización del recojo de la basura por los camiones recolectores en los principales parques de San Isidro basado en la especificación LoRaWAN 1.0.4.

1.4.2 Objetivos Específicos

Diseñar un prototipo que permita la transmisión de los datos de nivel de llenado y de otros sensores IoT.

Diseñar la arquitectura de red que permita el envío de la información bajo la especificación LoRaWAN 1.0.4.

Diseñar un dashboard que muestre la información de los diversos parámetros obtenidos; además del trazado de la ruta óptima.

1.4.3 Indicadores de Logro de los Objetivos

Tabla 1*Indicadores de logro*

Objetivo Específico	Indicador de Logro	Métrica
Diseñar un prototipo que permita la transmisión de los datos de nivel de llenado y de otros sensores IoT.	Nivel de llenado	m
Diseñar la arquitectura de red que permita el envío de la información bajo la especificación LoRaWAN 1.0.4.	Distancia de cobertura Frecuencia de trabajo Ancho de banda de canal Factor de ensanchamiento Tasa de codificación Tasa de transmisión de datos Potencia efectiva irradiada Nivel de recepción Pérdidas en la trayectoria	m MHz kHz SF CR bps dBm dBm dB
Diseñar un dashboard que muestre la información de los diversos parámetros obtenidos; además del trazado de la ruta óptima.	Nivel de llenado Polución ambiental Humedad ambiental Temperatura ambiental Luminosidad ambiental Radiación solar	% ppm % °C lx mW/cm ²

1.5 JUSTIFICACIÓN

Con el fin de gestionar los residuos sólidos de manera eficiente, el municipio o las empresas de gestión de residuos instalan contenedores de basura en muchos lugares; así mismo, operan camiones para recolectar los residuos diariamente. En la práctica actual, se toma una ruta definida y se detiene en cada ubicación de los contenedores de basura. Si los contenedores de basura tienen poco contenido, se desperdicia combustible y mano de obra. Por otro lado, si los desechos sólidos están programados para recolectarse una vez por semana, los contenedores de basura pueden desbordarse, esparciendo los desechos por el área, contaminando el medio ambiente y causando enfermedades al público.

Por lo tanto, existe la necesidad de un sistema de monitoreo remoto en tiempo real que pueda alertar al municipio, o a la empresa de gestión de residuos, sobre el nivel de basura en los contenedores instalados. Al implementarse un sistema que pueda transmitir el estado actual de los contenedores, se podrán monitorear, analizar y; sobre todo, utilizar dichos valores de parámetros para optimizar el proceso de recolección y utilizar de manera eficiente los recursos disponibles.

Para ello, este proyecto propone una solución que permita el envío de muy pequeñas cantidades de información a grandes distancias, con total autonomía a la red eléctrica y de bajo costo; y esto es posible gracias a los últimos avances tecnológicos en comunicaciones, como lo es la nueva tecnología de conectividad inalámbrica LoRa, la cual es óptima para casos de uso que demandan conectividad a larga distancia, un consumo de energía reducido y nodos de sensores inalámbricos distribuidos. Adicionalmente, la simplicidad de su implementación y administración permitirá brindar información a una plataforma que, finalmente, generará una ruta óptima para el servicio de recolección de basura.

sistema automático de recojo, basureros inteligentes, entre otros; así como, el uso de nuevas tecnologías en diversas aplicaciones.

La tesis *Optimización de recolección de residuos con IoT*, Ricatti (2017), tiene como objetivo principal evaluar la viabilidad de mejorar la recopilación de desechos de contenedores ubicados en áreas públicas mediante el uso de Internet de las Cosas (IoT). Para lograr esto, se desarrolló un sistema web que facilita la visualización de rutas de recolección de basura más eficientes y la generación de informes sobre contenedores individuales basados en datos recolectados por sensores conectados. El enfoque de la tesis abarca la planificación, instalación, mantenimiento y servicio de contenedores públicos en colaboración con una entidad vinculada al gobierno local en la ciudad de Dublín, Irlanda. Además, se presenta una propuesta de solución y se detalla la implementación de un prototipo de sensor conectado para evaluar la viabilidad de incorporar IoT en la gestión de residuos.

La tesis *Desarrollo de una red IoT con tecnología LoRa para detección de automóviles*, Buestán (2019), persigue la exploración de una alternativa innovadora para integrar las redes inalámbricas con el Internet de las Cosas (IoT). El enfoque central de este trabajo es mejorar la eficiencia en la recopilación, transmisión y recepción de datos en tiempo real, facilitando la visualización de la información almacenada en una base de datos y la generación de informes históricos. Este enfoque resulta especialmente útil para monitorear vehículos en movimiento a lo largo de rutas de difícil acceso en el ámbito de la conectividad. La propuesta se basa en la implementación de un gateway para recopilar datos provenientes de sensores básicos instalados en un automóvil. Estos sensores capturan información vital como temperatura, velocidad, nivel de gasolina, nivel de agua y ubicación

GPS. La estrategia implica el uso de la tecnología LoRa, junto con los dispositivos necesarios, para establecer restricciones o mejoras específicas en su aplicación, enfocándose particularmente en una autopista principal en Quito, Ecuador. A través de esta red IoT, se busca realizar un monitoreo continuo de las variables adquiridas dentro de un vehículo en movimiento, garantizando la integridad de los datos sin interrupciones en la conexión.

La tesis *Implementación de una red de sensores inalámbricos LPWAN mediante módulos LoRa para el monitoreo de la calidad del agua en 2 ríos*, Burbano (2017), aborda el diseño y desarrollo de una red de sensores inalámbricos destinada a medir parámetros asociados a la calidad del agua en dos ríos situados en Bogotá, Colombia. Este proyecto se fundamenta en la utilización de componentes económicos y se respalda en módulos LoRa para facilitar la comunicación entre los diferentes nodos de la red. La iniciativa incluye la creación de dos nodos sensores encargados de vigilar parámetros cruciales como el pH, la conductividad eléctrica y la temperatura del agua. Se lleva a cabo tanto el diseño como la construcción de los propios sensores, así como la elaboración de circuitos de acondicionamiento de señales. Adicionalmente, se desarrolla un nodo receptor conectado a una computadora, que visualiza los datos a través de una interfaz gráfica. La implementación de esta red de sensores tiene como objetivo prescindir de la necesidad de que el personal realice mediciones in situ de forma continua, permitiendo así la recopilación constante de datos.

La tesis *Modelo para la gestión de residuos aprovechables incorporando tecnología IoT y servicios en la nube*, Pastrán y López (2021), presenta un enfoque innovador para la gestión de residuos que integra tecnología IoT y servicios en la nube. Esta solución ofrece a las empresas la capacidad de monitorear, en tiempo real, la cantidad de residuos

recolectados en sus contenedores mediante el uso de dispositivos electrónicos. Además, se encarga de generar rutas de recolección dinámicas que son asignadas a los colaboradores del sistema de recolección local.

El artículo publicado por la IEEE *Implementation of an smart waste management system using IoT*, Haribabu et al. (2017), propone un sistema que utiliza una aplicación móvil vinculada a un contenedor de basura inteligente con el objetivo de reducir la intervención humana, al mismo tiempo que contribuye a una perspectiva de ciudad inteligente. La implementación a gran escala de estos contenedores inteligentes, en sustitución de los tradicionales, se plantea como una medida para gestionar los residuos de manera eficiente, evitando la acumulación innecesaria de basura en las vías públicas.

El artículo *IoT based solid waste management system for smart city*, Nirde et al. (2017), hace referencia a que la gestión integral de los residuos, desde su origen hasta su eliminación, representa uno de los desafíos fundamentales para las autoridades municipales en todo el mundo. En respuesta a esta problemática, se propone la implementación de un sistema inalámbrico de gestión de desechos sólidos diseñado para ciudades inteligentes. Este sistema permite a las autoridades municipales supervisar de manera remota el estado de los contenedores de basura a través de un servidor web, contribuyendo así a mantener las ciudades limpias de manera eficiente al optimizar costos y tiempos asociados. Cuando un contenedor alcanza su capacidad máxima, el departamento de gestión de residuos recibe una alerta por SMS a través de un módulo incorporado en el contenedor, lo que facilita el envío del camión recolector de residuos a la ubicación correspondiente para la recolección oportuna de la basura.

El artículo *A LoRaWAN IoT-enabled trash bin level monitoring system*, Jino et al. (2021), destaca la necesidad de un sistema de monitoreo en tiempo real que informe sobre el nivel de basura en los contenedores al municipio o a una empresa de gestión de residuos. Con el objetivo de gestionar eficientemente los residuos sólidos municipales, este artículo presenta el diseño y la validación de un sistema de monitoreo de nivel de contenedor de basura basado en Internet de las Cosas (IoT). Los nodos finales del sistema IoT propuesto se ubican en cada contenedor de basura que requiere supervisión, registrando el nivel de llenado y la ubicación geográfica del contenedor. Estos nodos procesan los datos y los transmiten a través de una puerta de enlace LoRaWAN, que a su vez, envía los datos a un servidor de monitoreo de nivel de basura de IoT. Este servidor permite visualizar y analizar el estado de cada contenedor, así como su ubicación, mediante una interfaz gráfica de usuario inteligente.

El artículo *IoT based smart garbage monitoring & collection system using wemos & ultrasonic sensors*, Memon et al. (2019), tiene como propósito crear un sistema basado en IoT, de bajo costo, capaz de realizar un seguimiento en tiempo real de los desechos diarios mediante el uso de tecnología inteligente y sensores ultrasónicos. El propósito es optimizar los bajos recursos económicos de las autoridades encargadas de la gestión de residuos. Los resultados obtenidos confirman la capacidad del sistema para llevar a cabo un monitoreo preciso y en tiempo real del nivel de basura en los contenedores.

El artículo *A comprehensive study of the use of LoRa in the development of smart cities*, Andrade y Yoo (2019), ofrece una investigación exhaustiva sobre el progreso de ciudades inteligentes utilizando tecnología de comunicación de largo alcance. Este estudio pone énfasis en los sistemas de Internet de las Cosas (IoT) implementados mediante el

protocolo de red LoRaWAN, destacando su idoneidad para aplicaciones que requieren conectividad a larga distancia, eficiencia energética y la distribución de nodos de sensores inalámbricos.

El artículo *Smart solutions for smart cities: Using wireless sensor network for smart dumpster management*, Idwan et al. (2016), sugiere que las ciudades inteligentes pueden mejorar la gestión de servicios mediante el aprovechamiento de tecnologías de la información y la comunicación, especialmente las redes inalámbricas de sensores. El enfoque principal de este artículo se centra en la aplicación de tecnologías de redes inalámbricas para optimizar la gestión de residuos sólidos, mediante la introducción de contenedores de basura inteligentes equipados con sensores de nivel de residuos. Estos sensores son capaces de medir y clasificar el nivel de desperdicios en categorías como bajo, medio o alto. Además, se propone la planificación y el enrutamiento de rutas para minimizar tanto el tiempo como el consumo de combustible necesario. El artículo también aborda el desarrollo de un modelo de simulación diseñado para optimizar el consumo de combustible y tiempo de horas de trabajo.

El artículo *Arduino-based smart garbage monitoring system: Analysis requirement and implementation*, Muyunda e Ibrahim (2017), plantea un sistema inteligente de monitoreo de basura diseñado para abordar los problemas asociados con los contenedores de residuos. Este sistema tiene como objetivo facilitar a las autoridades urbanas una gestión más eficiente de los recursos destinados a la recolección de residuos. Proporciona una plataforma que posibilita la implementación de un sistema de recolección de basura efectivo, disminuyendo la acumulación de residuos en áreas específicas y previniendo la propagación de enfermedades entre los residentes, al mismo tiempo que mejora la calidad

del entorno. En este estudio, se emplea un Arduino como componente central y la comunicación se realiza mediante tecnología Wi-Fi.

La tesis *Desarrollo de una pasarela LoRa y evaluación de prestaciones*, Carrión (2017), se centra en la tecnología emergente LoRa/LoRaWAN, destacando especialmente sus características de largo alcance y bajo consumo de energía. El documento detalla la función clave desempeñada por un gateway en estas redes, subrayando su sencilla implementación para lograr una cobertura extensa en distancias considerables. Además, la tesis ofrece una clasificación de los dispositivos finales que pueden integrarse en una red LoRaWAN, considerando las aplicaciones disponibles y los requisitos de comunicación específicos.

La tesis *Estudio en detalle de LoRaWAN. Comparación con otras tecnologías LPWAN considerando diferentes patrones de tráfico*, Hernández (2020), enfatiza que la tecnología LPWAN (Low Power Wide Area Network) se destaca por optimizar el alcance, la duración de la batería y los costos de producción a cambio de una menor frecuencia de transmisión de datos. Esto la convierte en un estándar ideal para aplicaciones en el Internet de las Cosas.

El artículo *Redes LoRaWAN: Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT*, Manrique et al. (2019), tiene como objetivo principal llevar a cabo una revisión exhaustiva y detallada de las características esenciales de los componentes funcionales de la tecnología LoRa y del protocolo LoRaWAN.

La tesis *Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos*, Moya (2018), realiza un análisis exhaustivo de la tecnología LoRa/LoRaWAN, abordando la arquitectura de esta tecnología, su capacidad y explorando los factores que influyen en su

rendimiento en entornos urbanos. La tesis también proporciona detalles sobre los diversos tipos de dispositivos finales que pueden emplearse en esta red, al tiempo que examina los métodos de acceso a la misma.

El artículo *LPWAN technologies for IoT systems: Choice between ultra narrow band and spread spectrum*, Naik (2018), aborda la elección entre UNB y SS al examinar factores críticos que influyen en el rendimiento de las tecnologías LPWAN, como interferencia, capacidad, presupuesto de enlace y coexistencia. Además, evalúa las tecnologías LPWAN más destacadas basadas en UNB, como Sigfox y Telensa, y las basadas en SS, como LoRa y RPMA, analizando sus fortalezas y limitaciones en el contexto de las aplicaciones de IoT.

El artículo *A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments*, Ferreira et al. (2020), estudia la propagación de señales LoRa en entornos forestales, urbanos y suburbanos. Además de considerar entornos con condiciones de propagación variables, el estudio también evalúa escenarios que implican movilidad de nodos.

Por otro lado, es importante mencionar a las entidades internacionales quienes dictan normas técnicas desarrolladas para el sector de radiocomunicaciones como lo es la Unión Internacional de Telecomunicaciones, que es el ente supranacional cuya función principal es proporcionar pautas generales en el ámbito de las telecomunicaciones. Estas directrices suelen ser aceptadas y aplicadas por las autoridades de telecomunicaciones de los diferentes países miembros. En nuestro contexto, el MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones) y OSIPTEL (Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones) son las entidades responsables de adoptar y ejecutar estas políticas recomendadas por la UIT. La UIT, a través de su sector de Radiocomunicaciones,

desempeña un papel fundamental como organismo especializado en el ámbito de las tecnologías de la información y la comunicación, siendo su misión principal la asignación a nivel global del espectro radioeléctrico y las órbitas de satélite. Además, se encarga de la elaboración de normas técnicas que aseguran la continua interconexión de las redes y tecnologías, promoviendo así la eficiencia y la interoperabilidad en el ámbito de las comunicaciones a nivel mundial.

Mencionar además a la IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, bajo cuyo estándar IEEE 802.15.4w define el protocolo y la interconexión compatible para dispositivos de comunicación de datos que utilizan baja velocidad de datos, baja potencia y gran cobertura (Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 2020). La tarea de este grupo de trabajo es la de definir una extensión de red de área amplia de baja potencia (LPWAN) para cubrir radios de celda de red de típicamente 10-15 km en áreas rurales y penetración profunda en edificios en áreas urbanas.

Es fundamental para este proyecto mencionar a la LoRa Alliance, una asociación global que ha alcanzado un destacado crecimiento desde su creación en el 2015, convirtiéndose en una de las alianzas más grandes y de más rápido crecimiento en el campo tecnológico. Los miembros de esta alianza trabajan en estrecha colaboración y comparten sus experiencias con el objetivo de fomentar y respaldar el éxito del estándar LoRaWAN. Este estándar se posiciona como el principal estándar global abierto para la conectividad segura de dispositivos en redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) dentro del Internet de las Cosas (IoT). Es igualmente relevante destacar a The Things Network, una red global pública dentro del ámbito del IoT, altamente segura y colaborativa que se dedica a construir redes, dispositivos y soluciones utilizando la tecnología LoRaWAN.

Finalmente, mencionar a las entidades nacionales que dictan normas, políticas y regulaciones del sector de comunicaciones, como el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, a través de la Dirección General de Regulación y Asuntos Internacionales de Comunicaciones, mediante normativas como el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, el cual establece las asignaciones de frecuencias para diversos servicios de telecomunicaciones en el Perú (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2023). Este plan asegura que cada servicio opere en las bandas de frecuencia previamente designadas, con el objetivo de garantizar su funcionamiento sin interferencias y facilitar, cuando sea necesario, la coexistencia de servicios en una misma banda de frecuencia. Además, este plan incluye las frecuencias de uso libre destinadas a radioaficionados y/o las bandas ICM (Industriales, Científicas y Médicas). En el contexto de este proyecto, estas frecuencias se encuentran en el rango de 915-928 MHz.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 LPWAN

Significa red de área amplia de baja potencia y este tipo de comunicación inalámbrica está diseñada para enviar pequeños paquetes de datos a largas distancias funcionando con batería. Hay una serie de tecnologías compitiendo en el espacio LPWAN tales como: NB-IoT, Sigfox, LoRa, entre otros. Bluetooth y Wi-Fi tienen coberturas claramente cortas en comparación con las comunicaciones celular y LPWAN, pero la tecnología 3G/4G usa mucha más potencia de transmisión en comparación con LoRa. El rango entre el emisor y el receptor depende del entorno en el que opera. Un alcance máximo se puede lograr con una línea de vista directa, siempre que no haya obstáculos dentro de la zona de Fresnel. La cobertura interior depende en gran medida del tipo de material de construcción utilizado.

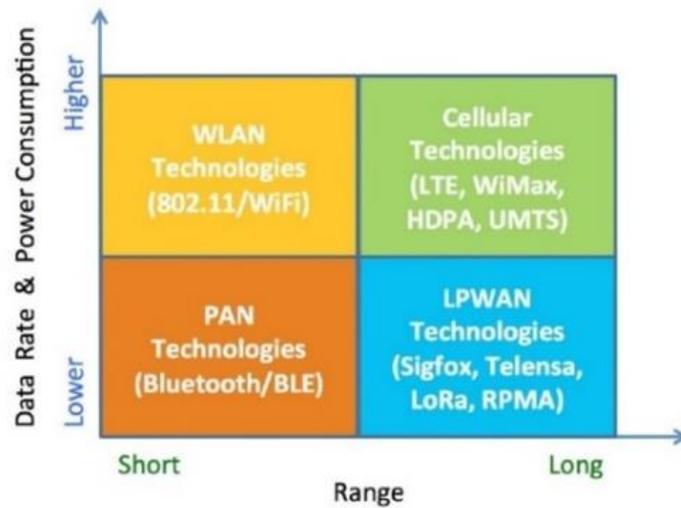
En su artículo *Redes LoRaWAN: Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT*, Manrique et al. (2019), señalan que las tecnologías actuales se centran en transmitir grandes volúmenes de datos a altas velocidades, lo que implica un consumo de energía elevado y limitaciones en cuanto a la cantidad de dispositivos que pueden estar conectados. Esto revela que el ámbito de las comunicaciones no estaba preparado para la aparición de tendencias como el Internet de las Cosas (IoT). Como respuesta a esta carencia, surgió una nueva generación de tecnologías conocidas como redes LPWAN (Redes de Área Amplia de Baja Potencia), las que representan una evolución clara de las redes de comunicación orientadas a los dispositivos IoT, diseñadas para conectar eficientemente una gran cantidad de dispositivos con un alcance superior a las tecnologías convencionales, utilizando recursos mínimos pero sacrificando velocidad de transmisión. Estas redes resultan

ideales para la interconexión de sensores y dispositivos de baja velocidad, aunque no son eficientes para la transmisión de datos en tiempo real como señal de video.

Asimismo, en su artículo *LPWAN technologies for IoT systems: Choice between ultra narrow band and spread spectrum*, Naik (2018), señala que aunque LPWAN no constituye una tecnología única, engloba diversas tecnologías empleadas para enlazar dispositivos de baja potencia en el ámbito de las comunicaciones del Internet de las Cosas (IoT), las que pueden funcionar tanto en el espectro licenciado como en el no licenciado. Asimismo, Naik enfatiza que algunas tecnologías de comunicación inalámbrica ofrecen velocidades de datos más altas y un largo alcance, pero con un mayor consumo de energía como LTE o WiMax. Otras brindan tasas de datos más bajas, un alcance más corto y un menor requerimiento de energía como Bluetooth o BLE, mientras que otras proporcionan velocidades de datos más altas, un alcance más corto y un mayor consumo de energía como Wi-Fi. Aunque la mayoría de las soluciones IoT buscan una red de sensores inalámbricos que ofrezca velocidades de datos más bajas, un alcance más extenso y una demanda de energía reducida para lograr una mayor duración de la batería, algunas de ellas no quedan completamente satisfechas con las tecnologías de comunicación inalámbrica existentes. Las tecnologías LPWAN han sido diseñadas específicamente para cumplir con estos requisitos, ya que fueron creadas con el objetivo de conectar eficientemente numerosos dispositivos, ofreciendo un alcance superior a las tecnologías convencionales y empleando recursos mínimos. Aunque se comprometen en términos de velocidad de transmisión, se perfilan como la mejor opción para la creciente tendencia de interconectar sensores y dispositivos de baja velocidad, demostrando además un rendimiento sólido en entornos con obstrucciones como las zonas urbanas.

Figura 4

Comparación de velocidad de datos, consumo de energía y rango para tecnologías de comunicación inalámbrica



Nota. De "LPWAN technologies for IoT systems: Choice between ultra narrow band and spread spectrum", por Naik, 2018 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8544414>).

2.1.1 Características de LPWAN

- Largo alcance de comunicación.
- Consumo de energía reducido.
- Velocidad de datos baja.
- Dispositivos e implementación de bajo costo.
- Topología e implementación de red simplificada.
- Penetración en interiores y exteriores mejorada para una buena cobertura.

2.1.2 Clasificación de LPWAN

Cuando se trata de comunicaciones en el ámbito de IoT, la selección de una tecnología LPWAN está condicionada a su aplicación en particular y sus necesidades específicas, como la velocidad de transmisión de datos, alcance, presupuesto de potencia,

banda de frecuencia, capacidad de transmisión en ambas direcciones, costos de red, capacidad de expansión y seguridad. Si bien existen muchas tecnologías LPWAN, se pueden clasificar ampliamente en dos categorías: tecnologías LPWAN con licencia (NB-IoT, LTE-M-IoT) y tecnologías LPWAN sin licencia (Sigfox, Telensa, LoRa y RPMA).

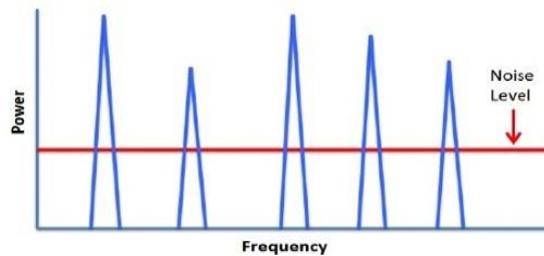
2.1.3 Enfoques Tecnológicos de LPWAN

La mayoría de estas tecnologías LPWAN utilizan dos enfoques alternativos principales para soportar las comunicaciones de capa física: Ultra Narrow Band (UNB) y Spread Spectrum (SS). Además de elegir LPWAN con licencia y sin licencia, es crucial comprender las ventajas y desventajas de UNB y SS al seleccionar cuál cumple con los requerimientos para una aplicación IoT específica.

2.1.3.1 Ultra Narrow Band (UNB)

En su artículo *LPWAN technologies for IoT systems: Choice between ultra narrow band and spread spectrum*, Naik (2018), señala sobre este enfoque que utiliza un canal de espectro sumamente estrecho (<1 kHz), para establecer conexiones de ultra larga distancia entre el transmisor y el receptor. Presenta un excelente presupuesto de enlace gracias a la concentración de potencia en una banda de frecuencia estrecha y al bajo nivel de ruido en la recepción dentro de esa banda. Como resultado, posibilita una cobertura de largo alcance con un consumo de energía reducido (debido a la menor potencia de transmisión), convirtiéndola en la técnica LPWAN más idónea para sistemas industriales de IoT que requieren baterías de larga duración. Además, su elevada densidad espectral de potencia proporciona resistencia contra interferencias e interceptaciones, permitiendo una coexistencia amigable de la tecnología UNB en bandas de frecuencia compartidas.

Figura 5
Ultra narrow band (UNB)



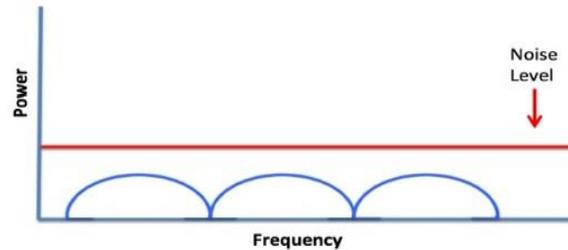
Nota. De "LPWAN technologies for IoT systems: Choice between ultra narrow band and spread spectrum", por Naik, 2018 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8544414>).

2.1.3.2 Spread Spectrum (SS)

Por otro lado, Naik (2018), señala sobre este otro enfoque que emerge como una alternativa a la técnica UNB en sistemas IoT industriales, utilizando bandas anchas con señales que se asemejan al ruido para la transmisión de datos. En este enfoque, la señal de datos se difunde a lo largo de un ancho de banda considerablemente mayor que el de la señal de datos real. A diferencia de la transmisión en banda estrecha, donde los datos fluyen a través de una única banda de RF, en Spread Spectrum, los datos se transmiten alterando sus frecuencias portadoras o modificando continuamente el patrón de datos. Los transmisores Spread Spectrum operan a niveles de potencia de transmisión similares a los de los transmisores de banda estrecha. Esto se debe a que las señales Spread Spectrum son amplias y, por lo tanto, pueden transmitir con una menor densidad de potencia espectral (W/Hz) en comparación con los transmisores de banda estrecha. Esta característica constituye una de las principales ventajas de Spread Spectrum, lo que contribuye a su popularidad en dispositivos IoT de bajo consumo. Además, las señales Spread Spectrum son difíciles de detectar, interceptar, demodular e interferir. Dentro de la técnica Spread Spectrum, se

pueden clasificar varias categorías, como Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) y Chirp Spread Spectrum (CSS).

Figura 6
Spread spectrum (SS)



Nota. De "LPWAN technologies for IoT systems: Choice between ultra narrow band and spread spectrum", por Naik, 2018 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8544414>).

2.1.4 Tecnologías LPWAN para Sistemas IoT

Sigfox: Es una tecnología LPWAN desarrollada por la empresa francesa Sigfox, basada en la modulación UNB. Diseñada para proporcionar conectividad en el Internet de las Cosas (IoT), esta tecnología utiliza el espectro sin licencia y se caracteriza por transmitir únicamente una cantidad limitada de datos. Sigfox destaca por su eficacia en las comunicaciones ascendentes (uplink), que van desde los dispositivos finales hasta las estaciones base. Sin embargo, muestra una eficiencia relativamente menor en las comunicaciones descendentes (downlink). Actualmente, Sigfox está disponible en más de 25 países alrededor del mundo.

LoRa: Es otra tecnología LPWAN que se fundamenta en la modulación Spread Spectrum (SS) y fue desarrollada por Semtech, la cual integra la tecnología LoRa en chips que posteriormente se utilizan para desarrollar productos para el Internet de las Cosas (IoT). LoRa proporciona a empresas y particulares la capacidad de implementar su propia

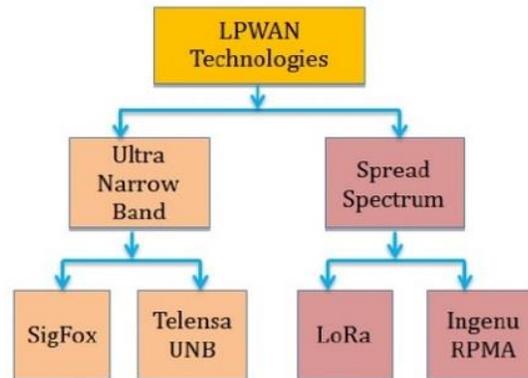
infraestructura de IoT aprovechando el espectro sin licencia. La LoRa Alliance desempeña un papel crucial al desarrollar la especificación del protocolo basada en la tecnología LoRa, denominada LoRaWAN. Operando en más de 100 países, la LoRa Alliance se dedica al desarrollo y promoción de esta tecnología, facilitando así la creación de redes IoT eficientes y escalables.

Telensa: Es otra tecnología LPWAN basada en UNB desarrollada por Telensa. Utiliza espectro sin licencia para la conectividad IoT y se caracteriza por transmitir volúmenes muy reducidos de datos. Telensa PLANet es el sistema de gestión central (CMS) más popular para alumbrado público inteligente utilizado en muchos países. Telensa está presente en la actualidad en más de 30 países en todo el mundo.

RPMA: Random Phase Multiple Access (RPMA) es otra tecnología LPWAN que se basa en la modulación Spread Spectrum (SS) y fue desarrollada por la compañía Ingenu. Utiliza banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) sin licencia y ofrece comunicaciones seguras mediante encriptación AES de 128 bits. Ingenu y U-Blox están trabajando juntos para ofrecer RPMA para aplicaciones IoT, donde U-Blox está creando módulos compatibles con la tecnología RPMA. RPMA está disponible en más de 25 países en todo el mundo.

Figura 7

Tecnologías de comunicación LPWAN para aplicaciones IoT



Nota. De "LPWAN technologies for IoT systems: Choice between ultra narrow band and spread spectrum", por Naik, 2018 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8544414>).

La tabla muestra el análisis comparativo de las cuatro tecnologías LPWAN: Sigfox, Telensa, LoRa y RPMA.

Figura 8

Comparación de tecnologías LPWAN para su uso en aplicaciones de IoT

Criteria	Sigfox	Telensa	LoRa	RPMA
1. Transmission Range	<13km (Approximately)	<10km (Approximately)	<15km (Approximately)	<15km (Approximately)
2. Maximum Coupling Loss / Coverage	149dB	154dB	157dB	177dB
3. Licensing	Unlicensed	Unlicensed	Unlicensed	Unlicensed
4. Model	Proprietary	Proprietary	Alliance	Proprietary
5. Spectrum / Frequency Band	Sub-GHz ISM/ TV-White Spaces	Sub-GHz ISM/TV-White Spaces	Sub-GHz ISM	ISM 2.4GHz
6. Bandwidth	100Hz / 900MHz, 100Hz	868MHz, 915MHz	125kHz / 900MHz, <500kHz	1MHz / 2.4GHz
7. Capacity/ Connections	50,000/cell	500,000/server	40,000/cell	500,000/cell
8. Battery Life	10years+	10years+	10years+	10years+
9. Data Rate	<100bps	<100bps	<10kbps	<624kbps
10. Modulation	UNB/ BPSK(UL)/ GFSK(DL)	UNB 2-FSK	CSS	RPMA-DSSS(UL), CDMA(DL)
11. Bi-directional	No	Yes	Dependent on the Class	Yes
12. Handover/Handoff	No	Yes	No	Yes
13. Global Ecosystem	Weak	Weak	Fragmented by Region	Worldwide Network
14. Location Support	No	No	Yes	No/Requires GPS
15. IoT Applications	Smart Cities, Smart Alarms, Smart Meters	Smart Cities, Smart Lighting, Smart Parking	Smart Cities, Smart building, Smart Meters	Smart Cities, Smart Meters, Smart Grid, Smart Lighting

Nota. De "LPWAN technologies for IoT systems: Choice between ultra narrow band and spread spectrum", por Naik, 2018 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8544414>).

2.2 LORA

Según la documentación de Semtech (2023), LoRa es una tecnología de comunicación de radio de baja potencia diseñada para su implementación en el Internet de las Cosas (IoT). Su principal objetivo es establecer conexiones a larga distancia. Estas comunicaciones se enfocan en dispositivos IoT de pequeño tamaño que necesitan transmitir cantidades muy reducidas de información, lo que significa que no requieren velocidades de transmisión elevadas, siendo la prioridad el minimizar el consumo de energía para prolongar la vida útil de las baterías de estos dispositivos.

La implementación de una red de nodos que emplee la tecnología LoRa es viable debido a su bajo costo, rápida implementación, amplia cobertura y eficiencia en el consumo de energía. Estos nodos se encargarán de recopilar y enviar datos relacionados con diversas variables, como nivel, humedad, temperatura, entre otros.

La tecnología inalámbrica LoRa, de las siglas Long Range, fue desarrollada por una start-up francesa llamada Cycleo, la cual desarrolló la tecnología de modulación LoRa; pero fue adquirida por Semtech Corporation en el 2012. La parte de radio y modulación de LoRa está patentada y su fuente cerrada, pero ofrece la licencia de su propiedad intelectual a otros fabricantes de chips como: Microchip, HopeRF, Dorji, etc. Asimismo, la palabra LoRa es una marca registrada por la corporación desde el 2015.

LoRa es una tecnología inalámbrica en donde un emisor de baja potencia transmite pequeños paquetes de datos a un receptor a una gran distancia. LoRa no se puede utilizar

para enviar video o audio, sólo para enviar paquetes de datos muy pequeños como los datos de sensores a larga distancia y a una potencia de transmisión muy baja, en promedio 20 mW.

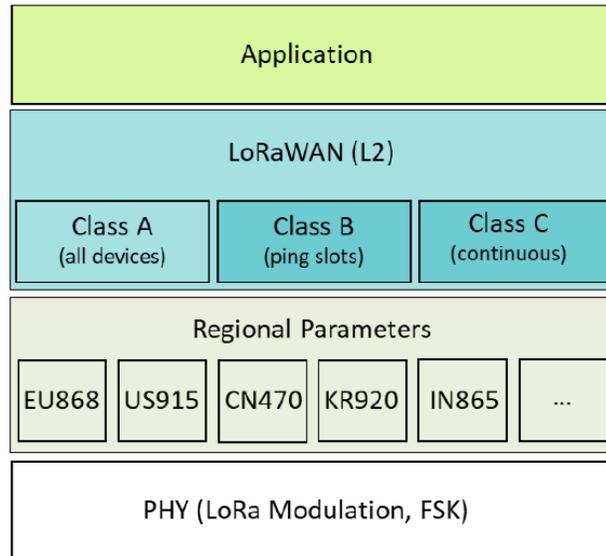
Entre las razones que hacen que LoRa sea único encontramos: consumo de potencia ultra baja, gran cobertura y penetración interior, uso del espectro libre de licencia, geolocalización por lo que la red puede determinar la localización de sus dispositivos, despliegue de redes públicas y privadas utilizando los mismos dispositivos y software, seguridad punto a punto integrada al protocolo LoRaWAN; así como, actualizaciones de firmware en línea.

Entre los casos de uso encontramos: smart utilities, como el monitoreo del nivel del agua; salud e higiene, como la supervisión y gestión de residuos en los contenedores; seguridad, como el monitoreo del nivel de radioactividad; eficiencia, como el seguimiento y gestión de flotas de camiones; agricultura, como el monitoreo de las condiciones de crecimiento de las plantas; entre las principales.

2.2.1 Modelo de Referencia LoRa

El artículo *Redes LoRaWAN: Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT*, Manrique et al. (2019), destaca el desafío significativo de establecer un modelo de referencia para Internet de las Cosas (IoT), ya que el actual modelo OSI es obsoleto frente a la gama de tecnologías LPWAN. Ante ello, en la Figura 9, se detallan las capas que constituyen el modelo de comunicación propuesto por la LoRa Alliance. Como se mencionó previamente, Semtech se encarga de los componentes físicos de LoRa, mientras que la comunidad LoRa Alliance gestiona los componentes lógicos. Estos últimos engloban la estructura de los distintos protocolos de comunicación que deben actuar como base para las aplicaciones de la capa final.

Figura 9
Modelo de referencia LoRaWAN



Nota. De "TS001-1.0.4 LoRaWAN L2 1.0.4 specification", por LoRa Alliance, 2023b (<https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification>).

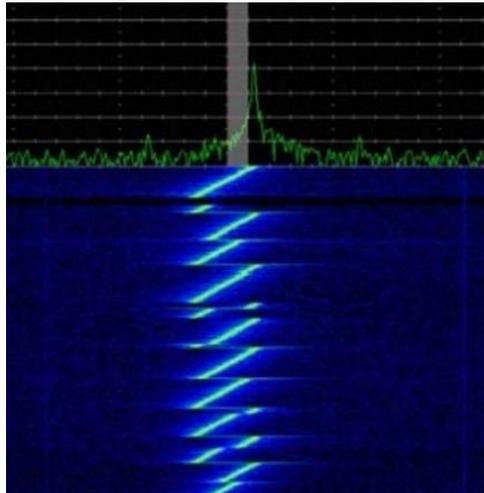
Aquí podemos ver la diferencia entre LoRa y LoRaWAN. LoRa se refiere a la capa física, es decir, la parte de radio, frecuencias y modulación; y, por otro lado, LoRaWAN abarca las capas de control de acceso al medio, que especifica las clases A, B y C, y la capa de aplicación. El protocolo LoRaWAN no soporta comunicación directa entre dispositivos finales.

2.2.2 Modulación LoRa

Asimismo, Manrique et al. (2019), en relación con la modulación LoRa, subrayan que esta tecnología se basa en una técnica de comunicación denominada modulación de espectro expandido (Spread Spectrum). La tecnología LoRa presenta características destacadas, como la capacidad de cambiar aleatoriamente de frecuencia para permitir

transmisiones simultáneas, la reducción significativa del consumo de energía mediante el uso de un amplio espectro, y la operación sin costos asociados en la banda ISM sin licencia. Facilita la comunicación bidireccional entre dispositivos mediante la técnica CSS (Chirp Spread Spectrum Modulation), que proporciona inmunidad al ruido, minimiza la interferencia y reduce el consumo de energía. Adicionalmente, este sistema ofrece la capacidad de ajustar la tasa de datos a través del factor de ensanchamiento o SF (Spreading Factor).

Figura 10
Modulación LoRa



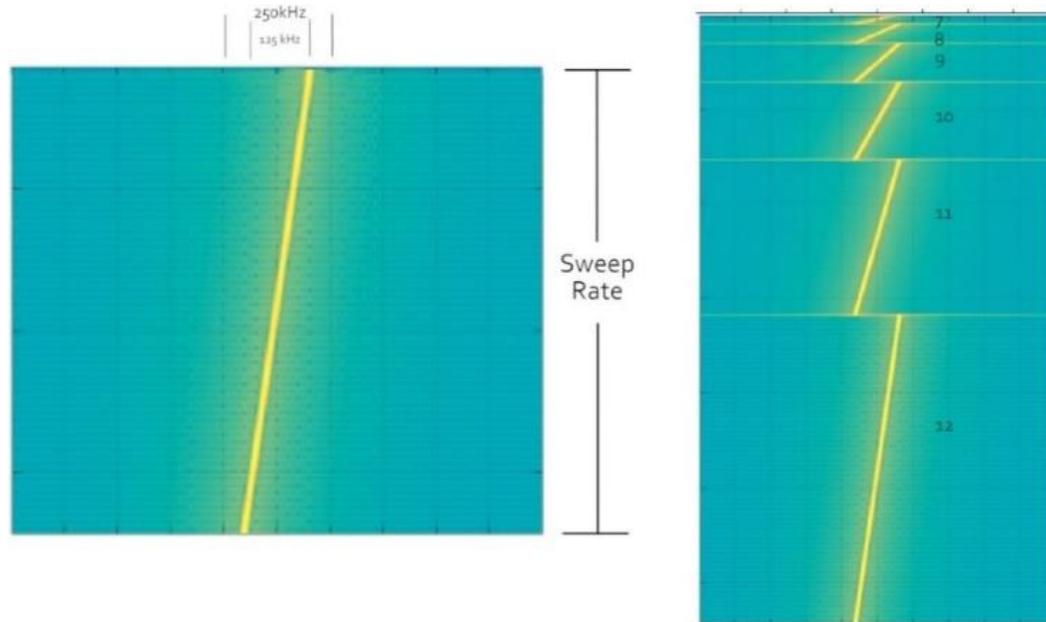
Nota. De "Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT", por Manrique et al., 2019 (<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22411>).

Asimismo, los autores precisan que LoRa emplea seis factores distintos (SF7 a SF12), y a medida que este factor aumenta, se amplía el alcance mientras disminuye la velocidad de transferencia de datos, y viceversa. La velocidad de transmisión de datos varía entre 300 bps y 50 kbps, dependiendo del factor de ensanchamiento y del ancho de banda

del canal. Es importante señalar que una misma estación base tiene la capacidad de recibir simultáneamente múltiples transmisiones con diferentes factores de ensanchamiento.

Figura 11

Factor de ensanchamiento vs ancho de banda del canal

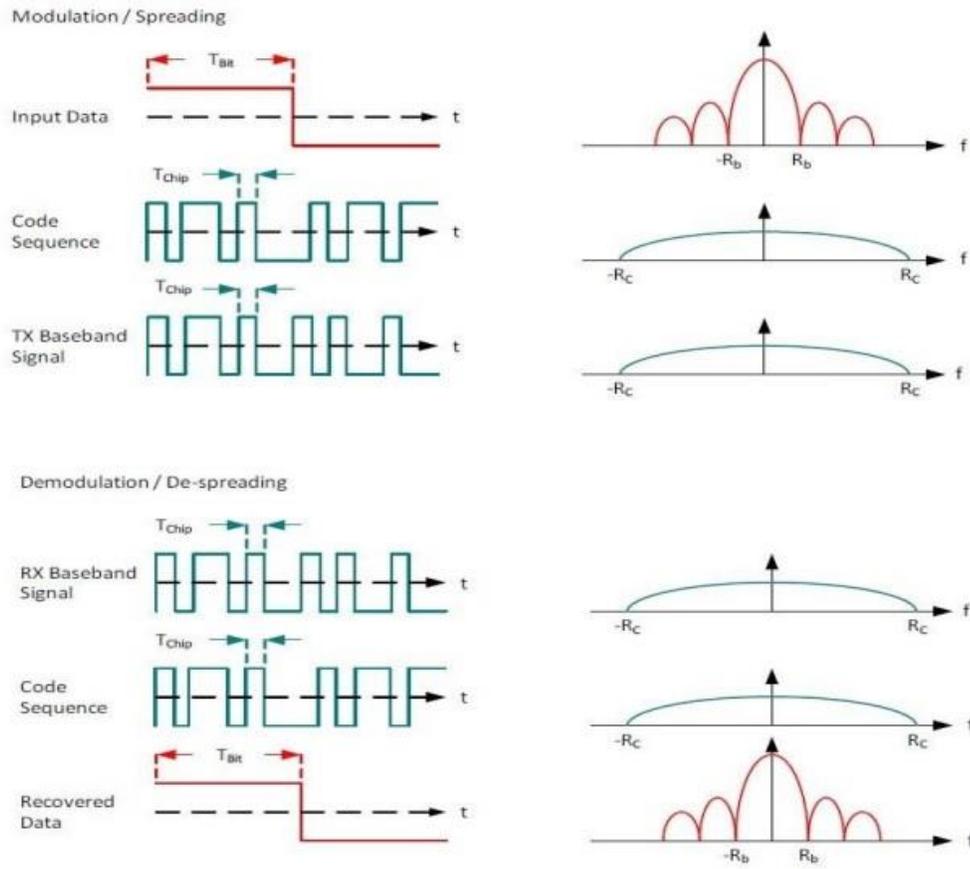


Nota. De "Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT", por Manrique et al., 2019 (<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22411>).

Adicionalmente, señalan que la técnica Chirp Spread Spectrum (CSS) se basa en el principio de espectro expandido por secuencia directa (DSSS). En este enfoque, el transmisor ensancha el ancho de banda por cada bit transmitido, permitiendo al canal de comunicación ajustar de forma continua el ancho de banda a una frecuencia constante, lo cual previene toda interferencia. Desarrollada en la década de 1940 para aplicaciones de radar, la tecnología CSS fue posteriormente incorporada en el estándar IEEE 802.15.4, la cual refiere a redes inalámbricas diseñadas para conectar dispositivos electrónicos personales dentro de un área cercana (WPAN). La modulación en LoRa fusiona dichas ventajas con un bajo consumo eléctrico, lo que resulta en una reducción de los costos de

hardware, transmisiones de larga distancia robustas frente al ruido, y una mayor eficiencia en el consumo de energía.

Figura 12
Modulación / Demodulación LoRa



Nota. De "Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT", por Manrique et al., 2019 (<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22411>).

2.2.3 Parámetros Básicos

Los parámetros fundamentales de la capa física que se consideran al configurar tramas incluyen el factor de ensanchamiento (SF), el ancho de banda (BW) y la tasa de codificación (CR).

2.2.3.1 Factor de ensanchamiento

El artículo *Redes LoRaWAN: Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT*, Manrique et al. (2019), define a este parámetro como el responsable de ajustar el alcance en un enlace entre el transmisor y el receptor es el factor de ensanchamiento. Este factor, que puede variar entre 7 y 12, determina la sensibilidad del receptor y aumenta el alcance a medida que se incrementa. Sin embargo, un mayor factor de ensanchamiento requiere más chirridos de subida (upchirp) para establecer el enlace de manera segura, lo que resulta en una carga útil más pequeña ya que el preámbulo aumenta. Al mantener constante el ancho de banda, es factible aumentar la sensibilidad del receptor al extender el tiempo de transmisión total de un paquete (time on air). De manera más específica, cada aumento del factor de ensanchamiento en una unidad, desde el valor 7 hasta 12, conlleva a duplicar el tiempo de transmisión total y a reducir la sensibilidad del receptor en 3 dB. Cuando el SF es menor, es decir, la línea tiene una pendiente más pronunciada, la representación de un bit ocupa menos tiempo, permitiendo la transmisión de una mayor cantidad de bits en ese periodo. Los nodos LoRa situados cerca al gateway tienen la capacidad de utilizar factores de ensanchamiento (SF) más bajos, lo que les permite aumentar su velocidad de datos, con menor tiempo en el aire, y un consumo mucho menor de energía. Asimismo, resaltan que si dos paquetes son transmitidos simultáneamente en el mismo canal, pero con diferentes valores de SF, estos no se interfieren y son recibidos por el gateway.

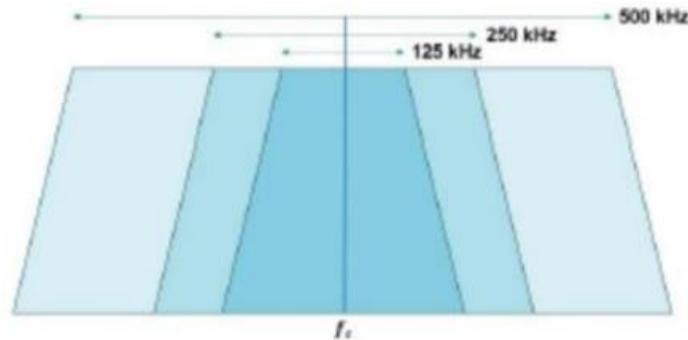
2.2.3.2 Ancho de banda de canal

Por otro lado, Manrique et al. (2019), señalan que el ancho de banda afecta la tasa de datos efectiva y; por ello, LoRa ofrece tres configuraciones: 125, 250 y 500 kHz. En este

contexto, el emisor transmite los datos de forma expandida a una velocidad de chips que coincide con el ancho de banda del sistema, expresado en chips por segundo por Hertz (Hz).

Figura 13

Anchos de banda utilizados por LoRa



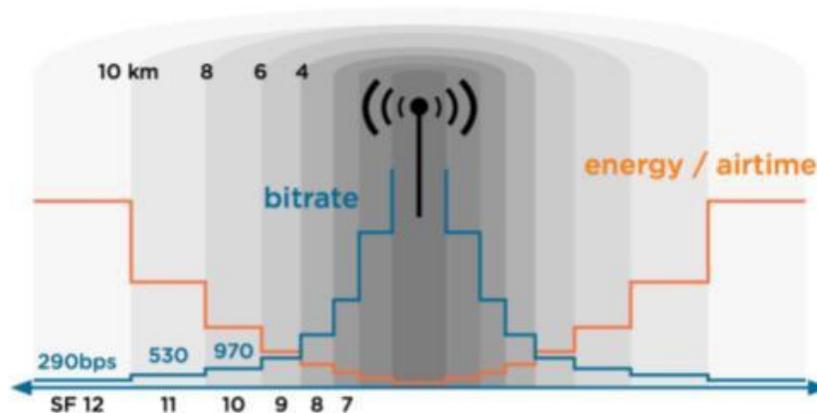
Nota. De "Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT", por Manrique et al., 2019 (<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22411>).

2.2.3.3 Tasa de codificación

Finalmente, el mismo artículo señala sobre este parámetro que las redes LoRa están diseñadas para la conectividad, y como es típico en este tipo de redes, es esencial contar con un algoritmo de corrección de errores, conocido como FEC (Forward Error Correction), el cual se puede ajustar mediante el parámetro CR, que toma valores entre 0 y 4 en LoRa. Un valor de CR igual a 0 indica la ausencia de FEC. Las tasas de código que LoRa utiliza son: 4/5, 2/3, 4/7 y 1/2. La redundancia posibilita que el receptor detecte y, en ocasiones, corrija errores en el mensaje, aunque al mismo tiempo reduce la tasa de datos efectiva. A medida que aumenta el parámetro CR, la tasa de datos disminuye.

Figura 14

Relación entre velocidad y distancia en LoRaWAN



Nota. De "Desarrollo de una pasarela LoRa y evaluación de prestaciones", por Carrión, 2017 (<https://riunet.upv.es/handle/10251/91597>).

2.3 LORAWAN

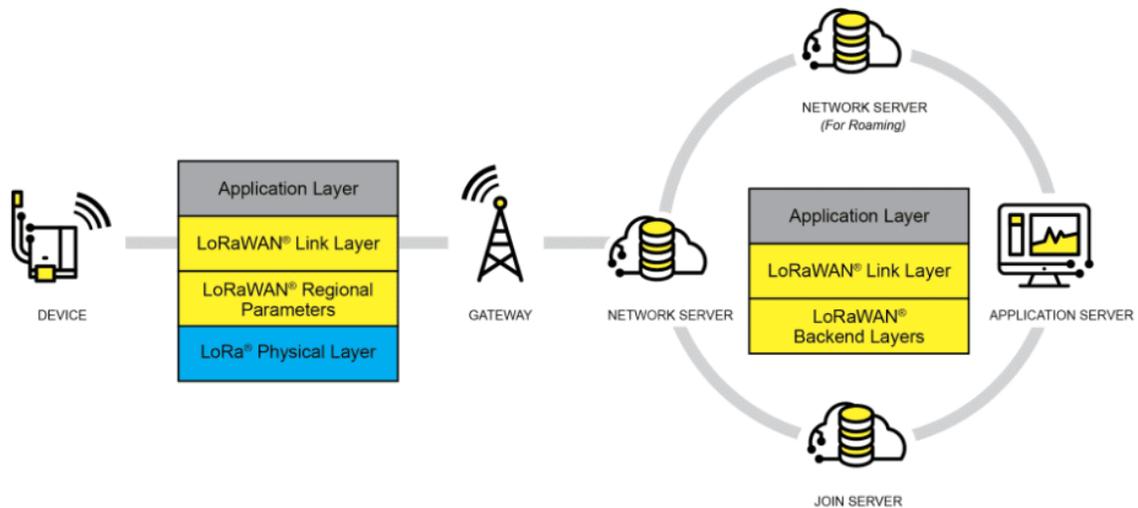
Es un protocolo de comunicación de baja potencia y con una amplia área de cobertura (LPWAN) que fue desarrollado para habilitar la conexión inalámbrica de dispositivos con baterías a Internet. Su enfoque principal se centra en atender las necesidades esenciales del Internet de las Cosas (IoT), incluyendo características como comunicación bidireccional, seguridad integral, capacidad de manejar la movilidad de dispositivos y la capacidad de localización.

2.3.1 Arquitectura de Red LoRaWAN

En su sección *What is LoRaWAN specification*, LoRa Alliance (2023c), publica que la arquitectura de red LoRaWAN se implementa en una topología de estrella de estrellas, donde las puertas de enlace sirven de intermediarios; por lo que convierten los paquetes de radiofrecuencia, de la comunicación con los nodos finales, en paquetes de IP para la comunicación con un servidor central de red; y viceversa. Cada nodo tiene la capacidad de

comunicarse en ambas direcciones, y la arquitectura incluye soporte para grupos de direccionamiento de multidifusión. Esto permite optimizar la utilización del espectro, especialmente en actividades como actualizaciones de firmware.

Figura 15
Arquitectura de una red LoRaWAN



Nota. De "What is LoRaWAN specification", por LoRa Alliance, 2023 (<https://loralliance.org/about-lorawan>).

Asimismo, la tesis *Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos*, Moya (2018), describe que la arquitectura de LoRaWAN está compuesta por nodos finales, gateways, un servidor de red y un servidor de aplicación. Los nodos no están vinculados a un gateway específico; por lo tanto, los datos transmitidos por un nodo son habitualmente recibidos por varios gateways. Cada gateway transmitirá el paquete proveniente del nodo final al servidor de red utilizando una infraestructura de comunicación de retorno (backhaul), que puede ser implementada mediante conexiones celulares, Ethernet, satelitales o Wi-Fi. Adicionalmente, señala que la inteligencia y complejidad del sistema recaen en el servidor de red, cuya función principal es administrar la red.

Por otro lado, The Things Network (2023), en su sección web *Welcome to the things fundamentals on LoRaWAN*, publica que los dispositivos finales establecen comunicación con las puertas de enlace (gateways) cercanas, y cada puerta de enlace está enlazada al servidor de red. Los mensajes enviados desde los nodos finales atraviesan todas las puertas de enlace dentro de su alcance. Estos mensajes son recibidos por el servidor de red, que, en caso de recibir múltiples copias del mismo mensaje, retiene una única copia y descarta las demás.

2.3.1.1 Nodos finales

Un nodo final LoRaWAN puede ser un sensor, el cual suele funcionar con baterías.

2.3.1.1.1 Clases de Nodos

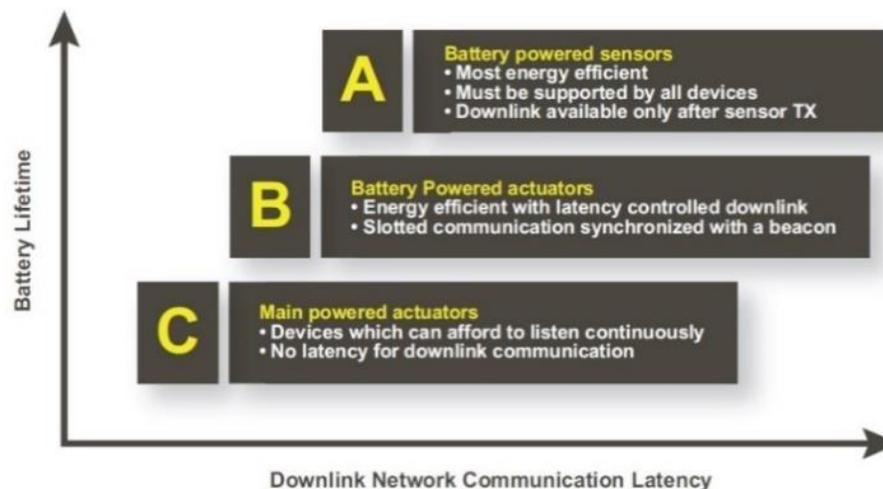
Asimismo, The Things Network (2023), publica que la especificación de LoRaWAN establece tres categorías de dispositivos: Clase A, B y C. Cada dispositivo LoRaWAN debe incorporar la Clase A, las clases restantes se consideran extensiones de esta especificación. Todas las clases de dispositivos son compatibles con la comunicación bidireccional, lo que implica la posibilidad de enlaces ascendentes y descendentes. En el contexto de las actualizaciones de firmware inalámbricas, un dispositivo debe cambiar a Clase B o Clase C. Durante este proceso, los dispositivos finales no tienen la capacidad de enviar mensajes de enlace ascendente mientras reciben mensajes de enlace descendente.

Sobre la Clase A, describe que todos los dispositivos finales en una red LoRaWAN deben ser compatibles con la implementación de la Clase A. Un dispositivo de esta categoría tiene la capacidad de enviar un mensaje de enlace ascendente en cualquier momento para luego abrir dos ventanas de recepción y recibir mensajes de enlace descendente procedentes de la red.

Asimismo, sobre la Clase B, describe que los dispositivos de esta clase extienden las capacidades de Clase A al abrir de manera periódica ventanas de recepción conocidas como "ranuras de ping", destinadas a recibir mensajes de enlace descendente.

Finalmente, sobre la Clase C, describe los dispositivos de esta clase extienden las capacidades de Clase A al mantener abiertas las ventanas de recepción a menos que estén transmitiendo un enlace ascendente. Esto implica que los dispositivos de Clase C pueden recibir mensajes de enlace descendente en casi cualquier momento, lo que resulta en una latencia muy baja para los enlaces descendentes.

Figura 16
Clases de nodos



Nota. De "Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT", por Manrique et al., 2019 (<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22411>).

2.3.1.1.2 Activación de Nodos

Cada nodo final debe completar un proceso de activación por unión (Join) antes de poder enviar y recibir mensajes en la red. En LoRaWAN, el proceso de intercambio de mensajes entre el dispositivo final y el servidor de red requieren:

Solicitud de unión (Join-request): Del nodo al servidor de red.

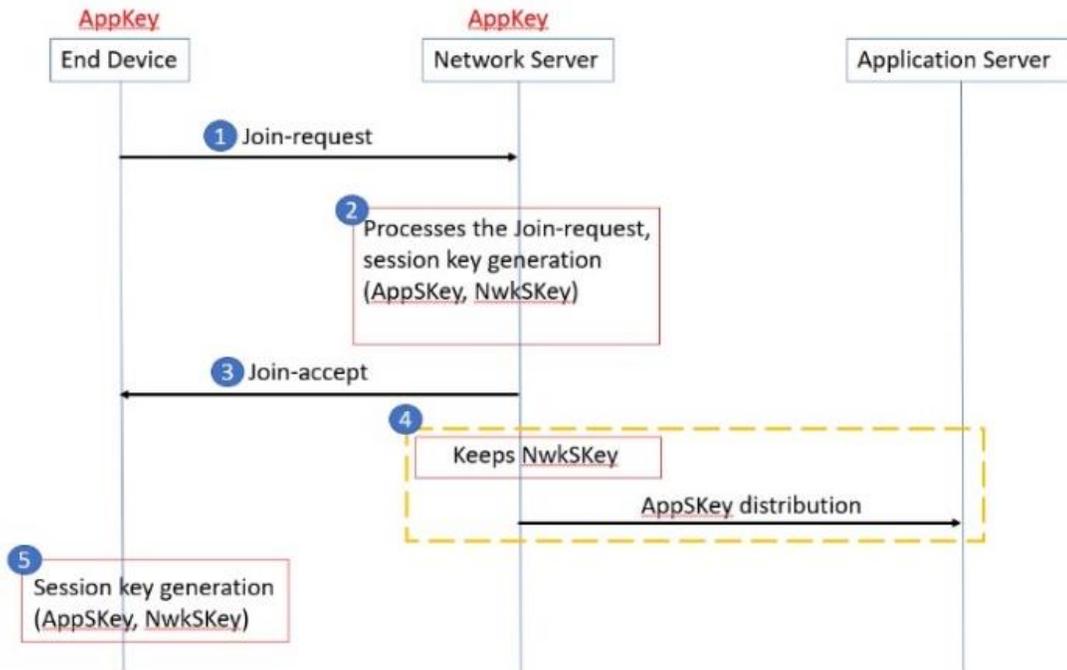
Aceptación de unión (Join-accept): Del servidor de red al nodo.

Es esencial almacenar los valores de AppEUI, DevEUI y AppKey antes de activar un nodo final. La AppKey es una clave AES secreta de 128 bits. Esta misma AppKey debe configurarse en la red a la que el nodo final se va a registrar. Es crucial tener en cuenta que tanto AppEUI como DevEUI no son secretos y son visibles para todos los demás en la red, mientras que la AppKey nunca se transmite a través de la misma.

Los siguientes pasos describen el procedimiento de activación:

- La iniciativa del procedimiento de unión siempre proviene del nodo final, que envía un mensaje de solicitud de unión a la red a la que desea unirse.
- El mensaje de solicitud de unión es procesado por el servidor de red, que genera dos claves de sesión, NwkSKey y AppSKey, además del mensaje de confirmación de unión, en caso de que se autorice la incorporación del nodo final a la red.
- El servidor de red envía el mensaje de aceptación de unión encriptado al nodo final como parte de un enlace descendente normal. Si el servidor de red no acepta el mensaje de solicitud de incorporación, no se proporciona ninguna respuesta al nodo final.
- El servidor de red retiene la clave NwkSKey y distribuye la clave AppSKey al servidor de aplicaciones.
- El nodo final descifra el mensaje de aceptación de unión mediante la operación de cifrado AES y queda activado en la red.

Figura 17
Flujo de solicitud de unión en LoRaWAN

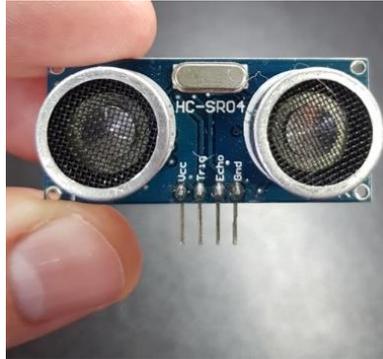


Nota. De "Welcome to the things fundamentals on LoRaWAN", por The Things Network, 2023 (<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan>).

2.3.1.1.3 Sensor de Nivel de Llenado

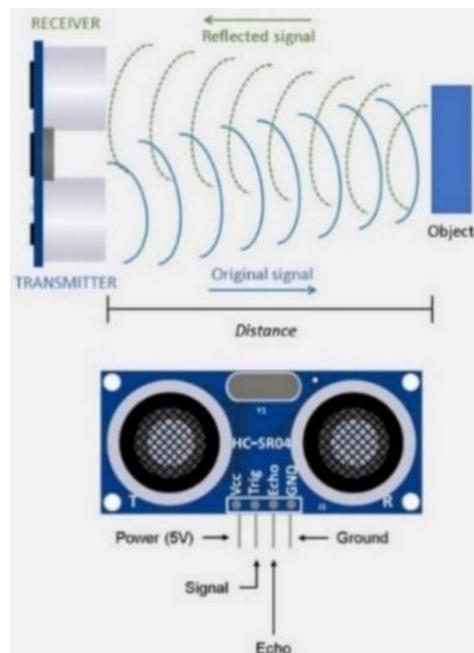
La detección del nivel de llenado de residuos dentro de un contenedor se basa en la medición del tiempo de vuelo, es decir, el tiempo que tarda un pulso ultrasónico en transmitir y recibir su eco reflejado entre el sensor y el nivel del material detectado.

Figura 18
Sensor HC-SR04



El sensor HC-SR04 es un módulo que incluye dos transductores ultrasónicos diseñados para calcular la distancia entre el sensor y un objeto. Su funcionamiento consiste en emitir un pulso de sonido ultrasónico, esperar el rebote de ese sonido en un objeto y, posteriormente, capturar el eco resultante. La medición de la distancia se calcula teniendo en cuenta el tiempo que tarda el eco en regresar al sensor. Aunque el sensor HC-SR04 no proporciona una precisión extrema, en este contexto no se necesita una gran precisión.

Figura 19
Principio de funcionamiento del sensor ultrasónico HC-SR04

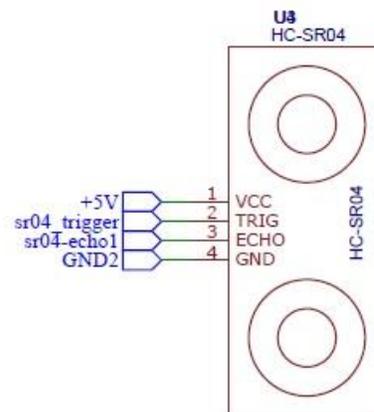


Nota. De "IoT based smart garbage monitoring & collection system using wemos & ultrasonic sensors", por Memon et al., 2019 (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8673526>).

El sensor ultrasónico HC-SR04 consta de cuatro pines, como se muestra en la Figura 20. Un pin se usa para VCC (5 voltios), el pin GND se usa para conexión a tierra (0 voltios), el pin de disparo TRIG se usa para transmitir la señal ultrasónica y el pin ECHO es utilizado para recibir el eco de esa señal transmitida. Posteriormente, sobre la base del retraso entre la señal recibida y la transmitida, se calcula la distancia entre la basura y la parte superior del contenedor.

Figura 20

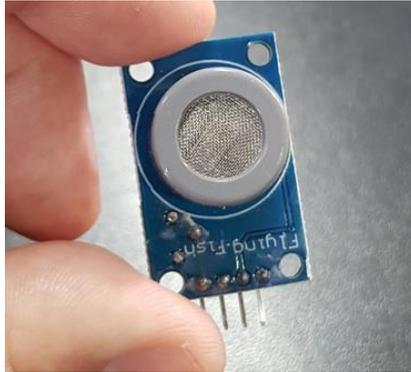
Configuración de pines del HC-SR04



2.3.1.1.4 Sensor de Polución Ambiental

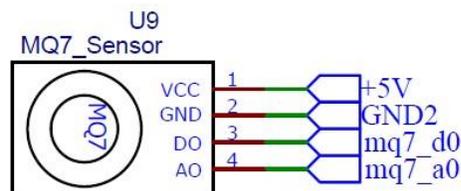
Este subsistema contará con el sensor de concentración de monóxido de carbono MQ-7, el cual se utiliza en equipos de detección de gases para monóxido de carbono (CO) en el hogar, la industria o el automóvil. Tienen un rango de detección de 20 a 2000 ppm de monóxido de carbono y trabajan dentro de un rango de temperatura de -20 a 50 °C.

Figura 21
Sensor MQ-7



En cada contenedor de basura estará instalado un módulo con el sensor MQ-7. El sensor de concentración de monóxido de carbono MQ-7 consta de cuatro pines, como se muestra en la Figura 22. Un pin se usa para VCC (5 voltios), el pin GND se usa para conexión a tierra (0 voltios), el pin de DO se usa para la salida digital y el pin AO es utilizado para la salida análoga.

Figura 22
Configuración de pines del MQ-7

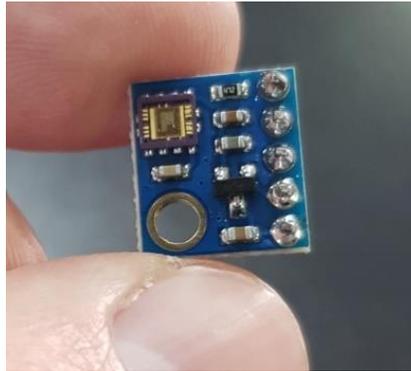


2.3.1.1.5 Sensor de Radiación Solar

El componente ML-8511, que forma parte del subsistema, es un sensor de luz ultravioleta (UV) que genera una señal analógica en proporción a la cantidad de luz UV que detecta. Este sensor se emplea en proyectos destinados a supervisar condiciones ambientales, como la medición del índice UV. La señal analógica producida mantiene una relación lineal con la intensidad de la radiación UV expresada en unidades de mW/cm^2 .

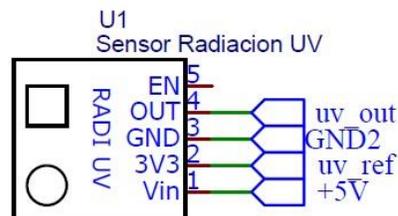
Puede conectarse a un microcontrolador para su conversión a través de un convertidor analógico a digital (ADC), permitiendo mediciones más precisas.

Figura 23
Sensor ML-8511



En cada contenedor de basura estará instalado un módulo con el sensor ML-8511. El ML-8511 consta de cinco pines como se muestra en la Figura 24. El pin Vin se usa para entrada de voltaje (5 voltios), el pin GND se usa para conexión a tierra (0 voltios), el pin EN se usa para su habilitación (alto: modo activo, bajo: modo de espera), el pin 3V3 se usa para salida de voltaje (3,3 voltios), y el pin de OUT se usa para la salida digital.

Figura 24
Configuración de pines del ML-8511



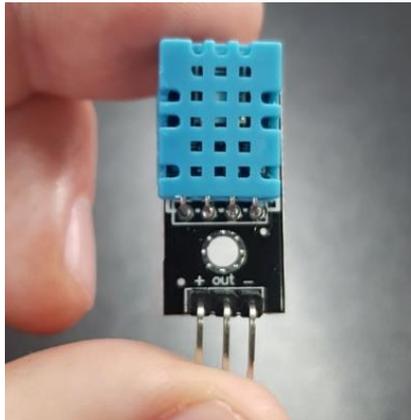
2.3.1.1.6 Sensor de Humedad y Temperatura Ambiental

Este subsistema estará equipado con el sensor DHT-11, que es un sensor digital de humedad relativa de bajo costo y de fácil utilización. Este dispositivo incorpora un sensor capacitivo para medir la humedad y proporciona datos en formato digital a través de su pin

de datos. Tiene un rango de medición de humedad relativa que abarca desde el 20 % hasta el 90 %, con una precisión en la medición de humedad relativa del 5 %.

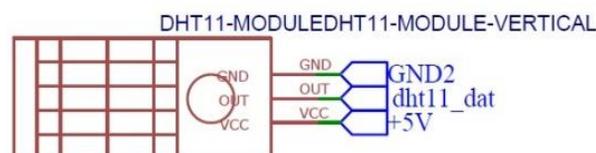
Además, el sensor incluye una función de medición de temperatura digital, también de bajo costo y fácil manejo. Este componente integra un termistor para medir la temperatura del entorno y presenta los datos en formato digital a través de su pin de datos. El rango de medición de temperatura abarca desde 0 hasta 50 °C, con una precisión en la medición de temperatura de ± 2.0 °C.

Figura 25
Sensor DHT-11



En cada contenedor de basura estará instalado un módulo con el sensor DHT-11. El sensor de humedad ambiental DHT-11 consta de tres pines como se muestra en la Figura 26. Un pin se usa para VCC (5 voltios), el pin GND se usa para conexión a tierra (0 voltios), y el pin de OUT se usa para la salida digital.

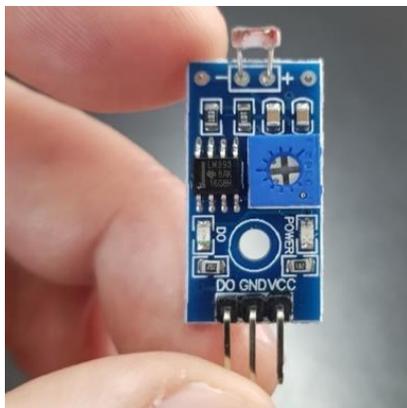
Figura 26
Configuración de pines del DHT-11



2.3.1.1.7 Sensor de Luminosidad Ambiental

Este subsistema contará con un sensor de resistencia fotosensible de detección de luz que integra un comparador LM-393. Este módulo es sensible a la luz, generalmente se usa para detectar el brillo ambiental y la intensidad de la luz. Cuando no hay luz o la intensidad de la luz no puede alcanzar el valor, la salida OUT/DO es de alto nivel. Cuando la intensidad de la luz supera el valor, la salida OUT/DO es de bajo nivel. La salida digital del módulo OUT/DO se puede conectar directamente con el microcontrolador para detectar un nivel alto o bajo, de modo que pueda detectar el cambio de intensidad de la luz ambiental.

Figura 27
Sensor LM-393



En cada contenedor de basura estará instalado un módulo con el sensor LM-393. El LM-393 consta de tres pines como se muestra en la Figura 28. Un pin se usa para VCC (5 voltios), el pin GND se usa para conexión a tierra (0 voltios), y el pin de OUT/DO se usa para la salida digital.

Figura 28
Configuración de pines del LM-393

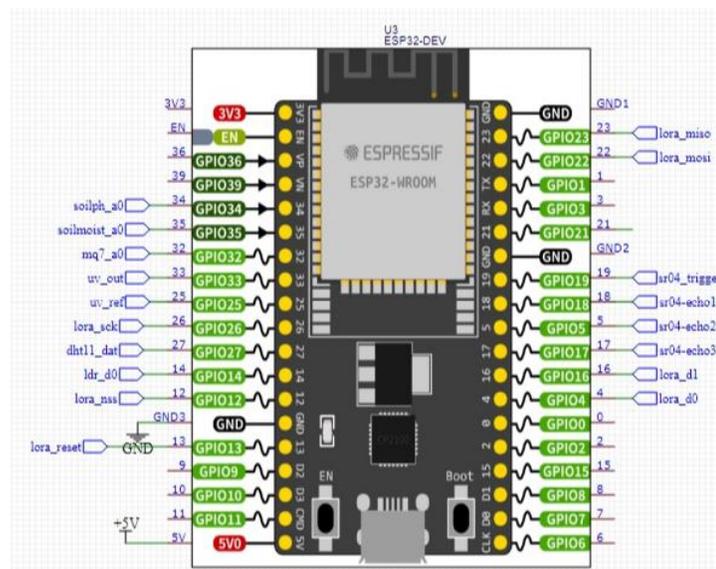


2.3.1.1.8 Microcontrolador

Esta placa compacta se basa en el microcontrolador ESP32 y ofrece una funcionalidad completa en un tamaño reducido. Está equipada con el mismo microcontrolador que se encuentra en la tarjeta Arduino Uno, lo que significa que tiene igual cantidad de pines digitales y agrega dos entradas analógicas adicionales. El diseño de la tarjeta está pensado para que sea fácilmente montada en un protoboard, lo que simplifica el proceso de prototipado de circuitos. Además, es importante mencionar que requiere una fuente de alimentación de precisión de 5V DC para funcionar adecuadamente.

Figura 29

Configuración de pines del ESP32



2.3.1.2 Puerta de Enlace (Gateway)

Las puertas de enlace LoRaWAN desempeñan la función de recibir mensajes LoRa procedentes de los nodos finales y simplemente los transmiten al servidor de red LoRaWAN. Estas puertas de enlace se conectan al servidor de red a través de diversos medios de comunicación de retorno (backhaul), como la conectividad celular (3G/4G/5G), Wi-Fi, Ethernet, fibra óptica o enlaces de radio de 2.4 GHz.

En términos de ubicación y aplicación, los sensores pueden clasificarse en dos categorías: sensores de puerta de enlace interiores y sensores de puerta de enlace exteriores. Respecto a las puertas de enlace interiores, como la que se utilizará en este proyecto, son una opción rentable y adecuada para proporcionar cobertura en áreas como espacios interiores profundos (donde existen múltiples obstáculos, como paredes), sótanos y edificios de varios pisos. Estas puertas de enlace pueden estar equipadas con antenas internas o antenas "pigtail" externas. Sin embargo, en función del entorno físico interior específico, algunas puertas de enlace interiores tienen la capacidad de recibir mensajes de sensores ubicados a distancias considerables, incluso a varios kilómetros de distancia.

Cada puerta de enlace se registra, mediante los ajustes de configuración, en un servidor de red LoRaWAN.

Figura 30
Gateway interior RAK7246



Nota. De "WisGate Developer D0/D0+ RAK7246/RAK7246G", por RAK, 2023b (<https://store.rakwireless.com/products/rak7246-lpwan-developer-gateway?variant=36313275367582>).

2.3.1.3 Servidor de Red

The Things Network (2023), publica que un servidor de red gestiona las puertas de enlace, los nodos finales, las aplicaciones y los usuarios en toda la red LoRaWAN. Un servidor de red LoRaWAN presenta diversas características clave para garantizar la eficiencia y seguridad de la comunicación entre dispositivos finales y el servidor de aplicaciones. Entre ellas se incluye el establecimiento de conexiones seguras mediante cifrado AES de 128 bits, asegurando la integridad y autenticidad de los mensajes. Además, el servidor realiza la duplicación de mensajes en el enlace ascendente, selecciona la mejor puerta de enlace para dirigir mensajes en el enlace descendente y emite comandos ADR para optimizar las tasas de datos. También verifica la dirección del dispositivo, envía confirmaciones para mensajes de datos en el enlace ascendente, reenvía cargas útiles de aplicaciones y realiza el enrutamiento adecuado de mensajes de solicitud y aceptación de unión entre dispositivos y el servidor de unión, garantizando un funcionamiento eficaz y seguro del sistema.

La plataforma de IoT de The Things Network cuenta con la capacidad de administrar los datos recolectados por los dispositivos IoT y de procesar dicha información para convertirla en datos significativos. Estos datos procesados son utilizados para la toma de decisiones basada en la información recopilada.

2.3.1.4 Servidor de Aplicaciones

Es el encargado de procesar los datos provenientes de la plataforma de IoT, los cuales son recibidos desde los nodos finales. Es importante señalar que una red LoRaWAN puede incorporar varios servidores de aplicaciones, lo que proporciona una mayor flexibilidad y escalabilidad en la administración de los datos. Los datos recopilados tienen la

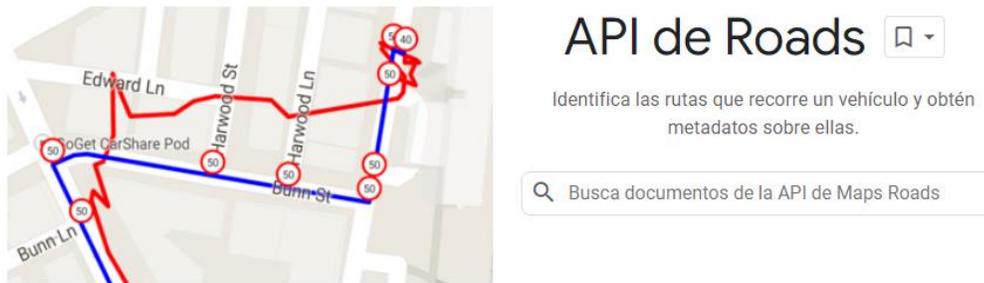
capacidad de ser interpretados y empleados para abordar desafíos comerciales mediante la aplicación de técnicas como el aprendizaje automático y la inteligencia artificial. Esto implica que los datos pueden ser sometidos a análisis avanzados para extraer información valiosa y respaldar la toma de decisiones fundamentadas en diversas áreas de aplicación.

2.3.1.5 Algoritmo de Rutas

Vamos a utilizar la API de Google Maps Platform, Roads API, la cual nos permite incorporar mapas y funcionalidades relacionadas con Google en nuestras aplicaciones y sitios web. La Roads API se basa en la plataforma de mapas de Google, que es muy completa y permite la creación de procesos interactivos. Con esta API, podemos acceder a una variedad de recursos, como mapas, vistas de calles, imágenes satelitales y sistemas de rutas, entre otros.

Figura 31

Plataforma de mapeo de rutas de Google



Nota. De “API de roads”, por Google Maps Platform, 2023

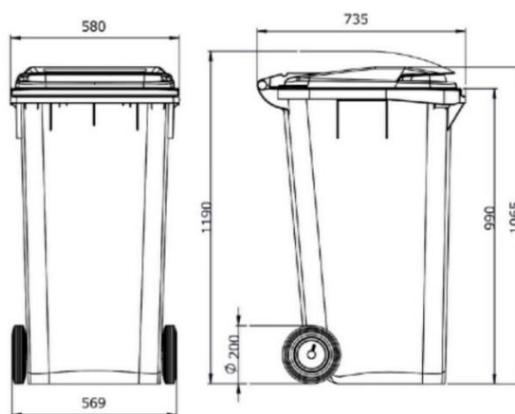
(<https://developers.google.com/maps/documentation/roads>).

2.3.1.6 Contenedores

Es un recipiente usado para almacenar basura y que está normalmente hecho de metal o plástico. Este proyecto se enfoca en los contenedores medianos con una capacidad aproximada de 240 L.

Figura 32

Dimensiones del contenedor



Nota. De "Ficha Técnica: Contenedor 240 litros", por Tecnopapel, 2023

(<https://www.tecnopapel.cl/wp-content/uploads/2019/07/FICHA-TEC-CONTENEDOR-240-LT.pdf>).

Tabla 2

Descripción del contenedor

Volumen	Peso	Carga Máxima	Alto	Ancho	Profundidad
240 L	14 kg	110 kg	990 mm	580 mm	735 mm

3. CAPÍTULO III: ANÁLISIS DEL PROBLEMA

3.1 Problemática 1: Infraestructura Tecnológica

Actualmente, Innova Ambiental S.A., viene realizando la recolección de basura de los contenedores en los parques de San Isidro de una manera ineficiente. Los camiones transitan por ubicaciones en donde no hay la necesidad de recolección debido a que no se cuenta con alguna infraestructura tecnológica que pueda obtener los datos de llenado de los contenedores a través de una interfase para el procesamiento de los datos para su posterior envío de manera inalámbrica.

Requerimientos:

El prototipo debe considerar para su diseño las especificaciones técnicas señaladas por la especificación LoRaWAN 1.0.4.

El prototipo debe contar con una alimentación de energía autónoma.

El prototipo debe transmitir a través de una conexión LoRaWAN.

El contenedor no debe superar una altura de 1,2 m, ancho de 1 m, y profundidad de 1 m como máximo.

El contenedor con el prototipo debe estar ubicado a un mínimo de 100 m y un máximo de 2 km del gateway LoRaWAN.

El prototipo debe medir el nivel de llenado del contenedor cada intervalo de tiempo.

El prototipo debe medir otros parámetros cada intervalo de tiempo tales como:

- Polución ambiental
- Humedad ambiental
- Temperatura ambiental

- Luminosidad ambiental
- Radiación solar

3.2 Problemática 2: Tecnología de Comunicación

San Isidro tiene una extensión de 9,78 km², y para cubrir la distancia existente entre los principales parques del distrito hacia una estación central, actualmente, no se cuenta con alguna tecnología de comunicación específica para el envío de información a grandes distancias.

Requerimientos:

La cobertura debe estar dentro del rango de 100 m y 2 km.

De acuerdo con la especificación LoRaWAN 1.0.4, la frecuencia de trabajo debe estar en una banda sin licencia ISM y dentro de un rango de frecuencias señalado como parámetro regional.

De acuerdo con la especificación LoRaWAN 1.0.4, el ancho de banda del canal debe ser el apropiado dentro de los valores señalados por la norma.

De acuerdo con la especificación LoRaWAN 1.0.4, el factor de ensanchamiento debe ser seleccionado de acuerdo con el alcance existente entre el transmisor y receptor.

De acuerdo con la especificación LoRaWAN 1.0.4, la tasa de codificación debe ser el apropiado para la detección y corrección de errores en el mensaje dentro de los valores señalados por la norma.

De acuerdo con la especificación LoRaWAN 1.0.4, la tasa de transmisión de los datos, al guardar relación con el ancho de banda del canal y el factor de ensanchamiento, debe ser la adecuada dentro de la máxima cobertura.

La potencia efectiva irradiada no debe ser superior a la permitida por la regulación vigente del MTC.

Las pérdidas en la trayectoria de la propagación de la señal deben ser consideradas.

El nivel de recepción debe ser óptimo dentro de la máxima cobertura.

Se debe respetar el límite indicado por el fabricante para la sensibilidad de recepción.

3.3 Problemática 3: Plataforma de Visualización

No se cuenta con un dashboard o panel de control que presente, de manera visual y sencilla, los indicadores, métricas y datos fundamentales para hacer seguimiento; para nuestro caso, saber cómo están los contenedores realmente. Por otro lado, la programación de las rutas para los camiones encargados de la recolección de basura se lleva a cabo de forma preestablecida, basándose simplemente en la proximidad de los parques y no considerando el nivel de capacidad de los contenedores. Asimismo, no se prevé un cambio de ruta debido a algún evento en particular en alguna zona del distrito, donde se ha colocado, temporalmente, algún contenedor; ya que ésta se realiza individualmente al finalizar el día. Cabe señalar que, las rutas de recolección se establecen algunas veces respondiendo a urgencias del momento, a las necesidades particulares de algunas juntas vecinales; e incluso, a alguna indicación expresa del alcalde.

Requerimientos:

Un dashboard deberá mostrar información sobre: nivel de llenado del contenedor; así como, de otros parámetros tales como:

- Polución ambiental
- Humedad ambiental

- Temperatura ambiental
- Luminosidad ambiental
- Radiación solar

Un algoritmo de búsqueda de rutas deberá trazar la ruta óptima basado en el nivel de llenado de los contenedores.

La información deberá actualizarse, automáticamente, cada 5 minutos o cuando lo requiera el operador.

4. CAPÍTULO IV: DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

El presente proyecto tiene como objetivo principal el monitoreo de la capacidad de los contenedores de basura, mediante el diseño, desarrollo y puesta en operación de una infraestructura de red LPWAN, basada en la tecnología LoRa, mediante un prototipo que almacena la información enviada por diversos dispositivos IoT y las transmite a un gateway LoRaWAN para que, finalmente, muestre el nivel de llenado de los contenedores; y adicionalmente, algunos parámetros ambientales como: polución, humedad, temperatura, luminosidad y radiación solar.

A continuación, se describirá el procedimiento del diseño, desarrollo y funcionamiento del sistema de monitoreo remoto basado en la especificación LoRaWAN 1.0.4, el cual comprenderá el desarrollo de los siguientes objetivos específicos:

4.1 Diseño del prototipo

Para obtener los datos de los sensores, se hará uso de una tarjeta que integrará las siguientes etapas: energía, sensado, control, y transmisión.

Figura 33

Etapas del prototipo



4.1.1 Etapa de Energía

Etapa en la que se encuentra la fuente de alimentación autónoma. Se encargará de generar el voltaje necesario para los diversos componentes que integran el prototipo a través

de diversas salidas de voltaje. Está conformada, principalmente, por una batería de litio de +3,7 V - 2600 mA, con una duración para una próxima recarga de 4-6 meses.

Figura 34
Batería de litio



Además, dispone de un convertidor de voltaje DC-DC Step-Up 2.5 A XL6009, que se encarga de proporcionar un voltaje de salida constante mayor que el voltaje de entrada. También tiene la capacidad de hacer frente a fluctuaciones en el voltaje de entrada o en la carga. Para nuestro caso, suministra un voltaje constante de +5 V a partir de una batería de litio de +3,7 V.

Figura 35
Convertidor de voltaje



Adicionalmente, cuenta con un regulador reductor de voltaje ASM-1117, el cual tiene como función la de entregar un voltaje de salida constante de +3,3 V, a partir de un voltaje de entrada dentro del rango de +4,2 a 10 V. Por tanto, recibe +5 V del convertidor de voltaje DC-DC Step-Up 2.5 A XL6009 y la reduce a +3,3 V.

Figura 36

Regulador reductor de voltaje

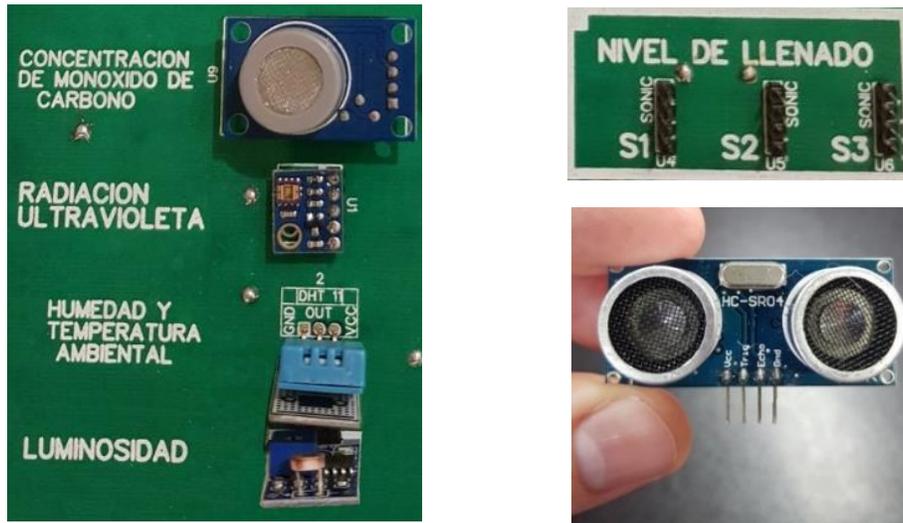


Finalmente, se alimentan con estos dos valores constantes de +5 y +3,3 V a las respectivas entradas de voltaje de las otras etapas.

4.1.2 Etapa de Sensado

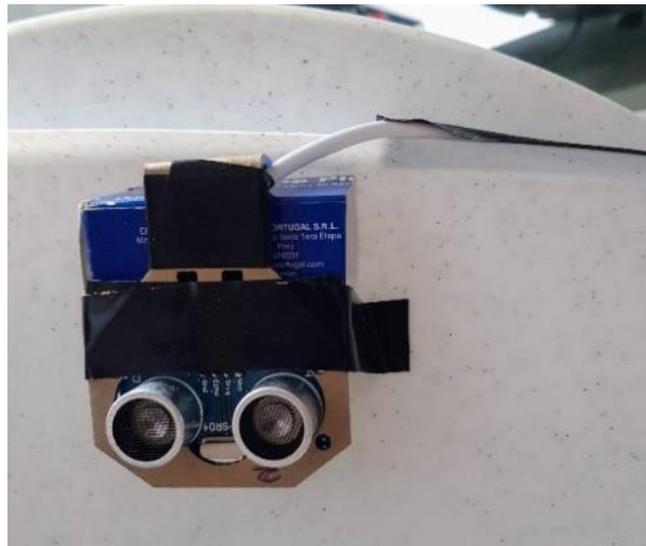
En esta etapa intervienen todos los dispositivos que recolectarán datos mediante distintos tipos de sensores. Estos sensores obtendrán del medio ambiente todos sus valores de interés para el posterior tratamiento de estos datos en la plataforma de IoT. Los sensores que se implementan en esta etapa son: 3 sensores ultrasónicos de nivel de llenado (HC-SR04), 1 sensor de concentración de monóxido de carbono (MQ-7), 1 sensor de radiación ultravioleta (ML-8511), 1 sensor de humedad y temperatura ambiental (DHT-11), y 1 sensor de resistencia fotosensible de detección de luz (LM-393). Cada sensor en esta etapa debe ser alimentado a +5 V.

Figura 37
Sensores



Para el caso de cada sensor ultrasónico, se instalará en el punto más alto del contenedor de basura, como en la parte baja de la tapa, para evitar una medición de nivel inexacta.

Figura 38
Montaje del sensor ultrasónico de nivel de llenado HC-SR04



Cada sensor ultrasónico de nivel de llenado HC-SR04 se conecta al microcontrolador del prototipo. El sensor transmitirá la señal al microcontrolador, que se encargará de

procesar los datos. La distancia a la que se encuentra el obstáculo estará directamente relacionada con la duración del impulso.

$$\text{Fórmula: } v = d / t$$

Donde v es la velocidad del sonido que es 340 m/s, pero convertiremos las unidades a cm/us, t es el tiempo que demora en rebotar el ultrasonido al objeto, y d será la distancia recorrida, la cual será dos veces la distancia hacia el objeto. Se puede calcular la distancia reemplazando en la fórmula:

$$\frac{340m}{s} \times \frac{1s}{1000000us} \times \frac{100cm}{1m} = \frac{2d}{t}$$

$$d \text{ (cm)} = t \text{ (us)} / 58$$

Como se muestra en la fórmula, para calcular la distancia al objeto en centímetros, simplemente necesitamos dividir el tiempo (medido en microsegundos) entre 58.

Este sensor puede medir con precisión el nivel de llenado del contenedor de basura de 2 a 400 cm con un ángulo de medición de 15 grados. El sensor puede detectar varios niveles de desechos; sin embargo, para este proyecto se consideran sólo dos niveles:

Niveles bajos (< 70 % de capacidad)

Niveles altos (>= 70 % de capacidad)

El cálculo teórico del nivel de llenado de un contenedor de 1,2 m es:

Si 100 % -> 1,2 m entonces 0 % -> x; por lo tanto: $x = (0 * 1,2) / 100 = 0 \text{ m}$

Si 100 % -> 1,2 m entonces 69 % -> x; por lo tanto: $x = (69 * 1,2) / 100 = 0,83 \text{ m}$

Si 100 % -> 1,2 m entonces 70 % -> x; por lo tanto: $x = (70 * 1,2) / 100 = 0,84 \text{ m}$

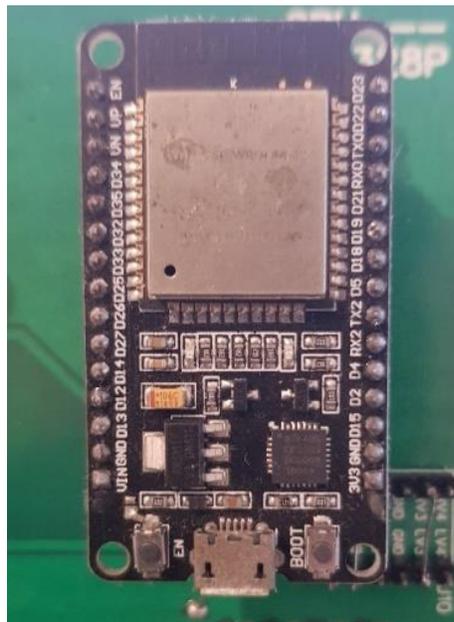
Si 100 % -> 1,2 m entonces 100 % -> x; por lo tanto: $x = (100 * 1,2) / 100 = 1,2 \text{ m}$

4.1.3 Etapa de Control

Etapa en la que se encuentra la tarjeta programable con el microcontrolador ESP32, el cual brinda una solución integrada todo en uno, mediante un procesador conformado con múltiples interfaces para conectarse con varios dispositivos; así también, con el transmisor inalámbrico. El ESP32 cuenta con un conversor analógico digital de 18 canales; es decir, que podemos tomar lecturas de hasta 18 sensores. El ESP32 se alimenta con +3,3 V.

Figura 39

Microcontrolador ESP32



Para programar al microcontrolador y éste pueda recepcionar los datos desde los sensores y procesarlos para su posterior envío, utilizamos el Entorno de Desarrollo Integrado IDE (Integrated Development Environment) por la basta información que podemos encontrar sin problemas en Internet, además de pertenecer a la comunidad de software libre.

El software Arduino de código abierto (IDE) nos facilita la escritura de las líneas de código y las cargará en la placa mediante el puerto micro USB. En la sección Anexos [], se incluye la programación del microcontrolador para el procesamiento de la información.

Figura 40

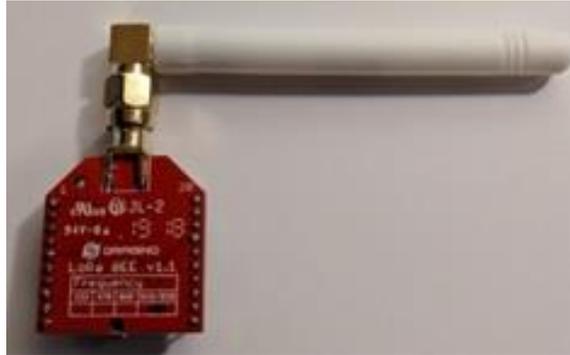
Muestra de líneas de código en IDE

```
84 void setup() {
85     delay(2000);
86     Serial.begin(115200);
87
88     // setup para SX1276 LORAWAN CHIP
89     lora_init();
90
91     // INICIALIZACION PARA DHT11 (SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTAL)
92     dht.begin();
93
94     // INICIALIZACION PARA LDR (SENSOR DE INTENSIDAD LUMINOSA)
95     pinMode(pinLDR, INPUT);
96
97     // INICIALIZACION PARA GYML8511 (SENSOR DE RADIACION ULTRAVIOLETA)
98     pinMode(UVOUT, INPUT);
99     pinMode(REF_3V3, INPUT);
100
101     // INICIALIZACION PARA MQ7 (SENSOR DE CONCENTRACION DE CO)
102     pinMode(pinMQ7, INPUT);
103
```

4.1.4 Etapa de Transmisión

El transceptor RF inalámbrico de largo alcance Dragino LoRa Bee RFM95/98W, permite enviar información a largas distancias consumiendo muy poca potencia, y proporciona una comunicación con un amplio espectro y con alta inmunidad a las interferencias. El transceptor está basado en un transmisor SX1276 que opera en una frecuencia preconfigurada de fábrica de 923.6 MHz y una potencia de +16 dBm. El transceptor debe ser alimentado a +3,3 V.

Figura 41
Transceptor Dragino LoRa Bee

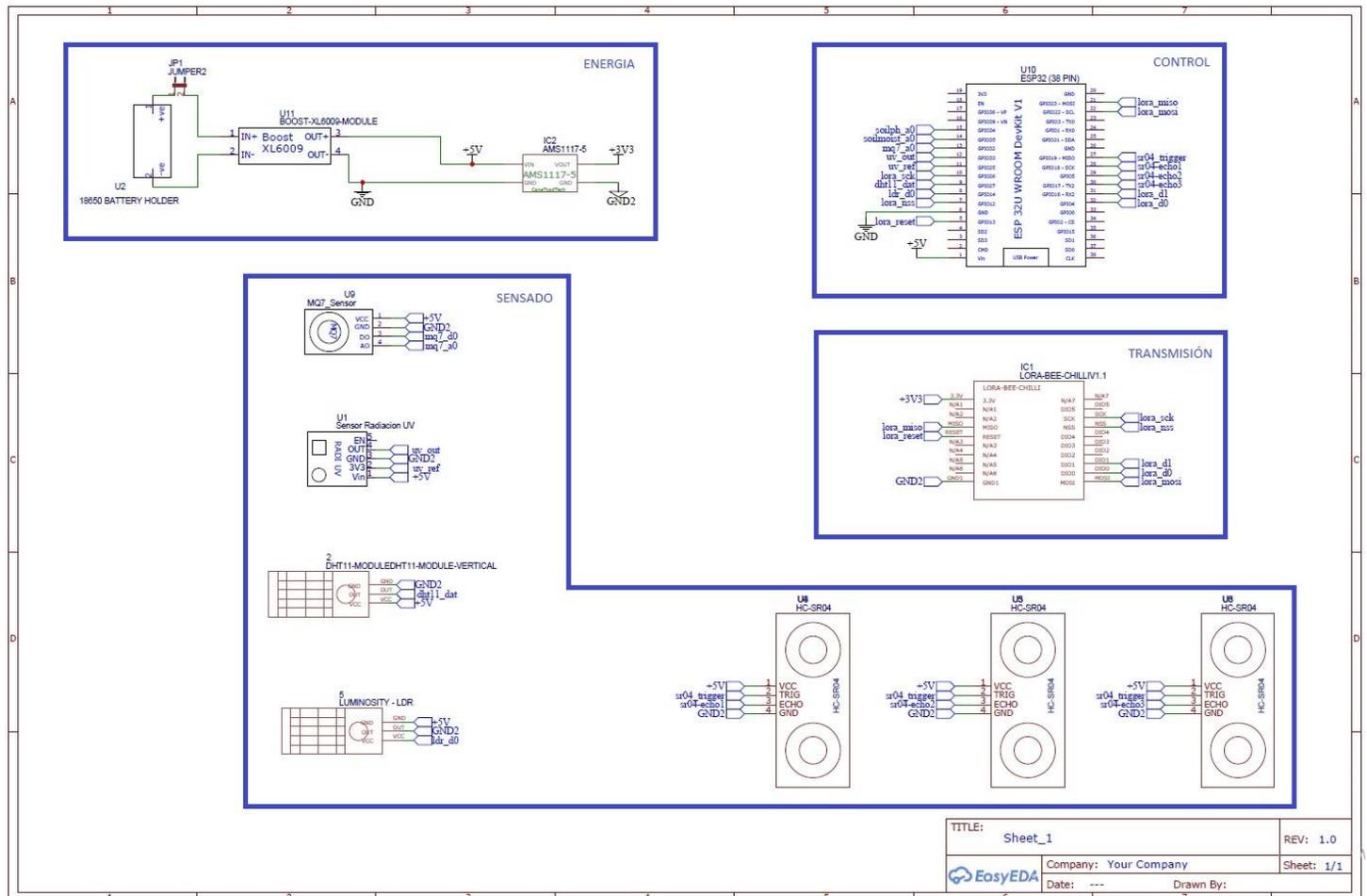


Motivo de selección de componentes: Mayor uso comercial y de disponibilidad en el mercado.

Definidas las etapas del prototipo, se diseñó el circuito lógico; y para ello, utilizamos el programa de diseño EasyEDA. Basándonos en la configuración de los pines de cada dispositivo que se detallan en el capítulo 2, unimos los pines respectivos para su posterior elaboración en circuito impreso.

Encontramos la etapa de energía, que suministrará voltajes de +5 y +3,3 V a las respectivas entradas de alimentación de las otras etapas. La etapa de sensado, que enviará las señales de los sensores a la entrada del microcontrolador en la etapa de control. Y finalmente, la etapa de transmisión, que realizará la comunicación inalámbrica LoRa.

Figura 42
Circuito lógico



Diseñado el circuito lógico, se elabora el circuito impreso final con el recorrido de todos los pines para, posteriormente, soldar los sensores, chips y otros dispositivos electrónicos.

Figura 43
Circuito impreso

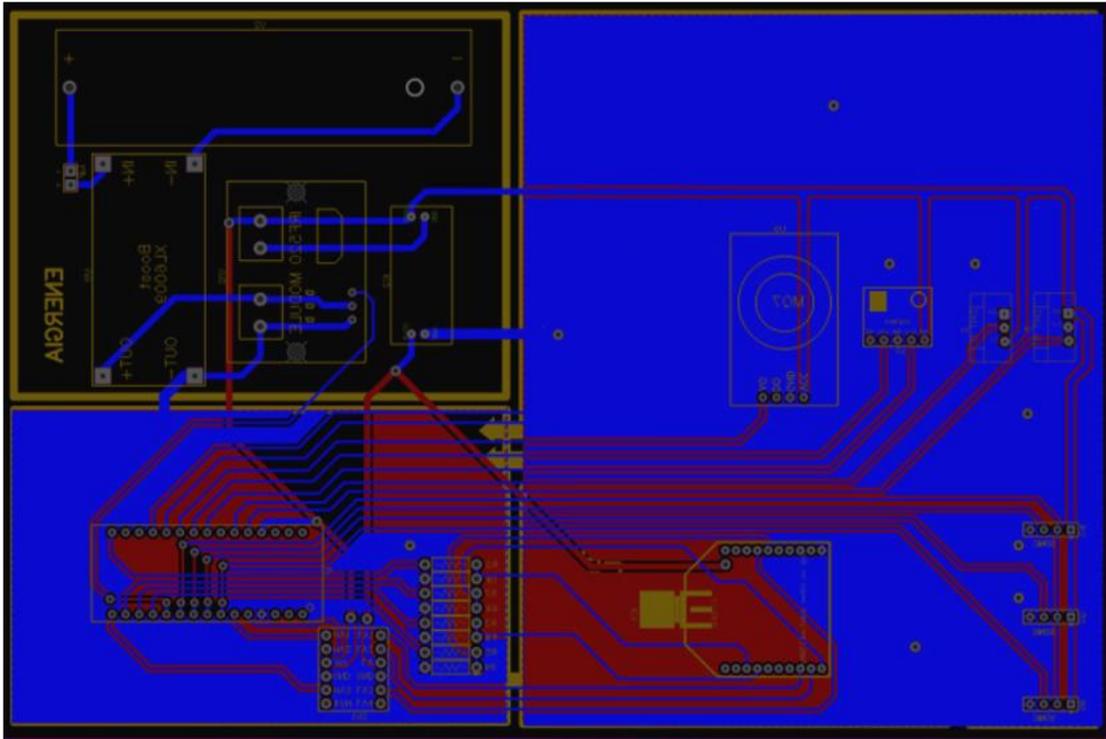
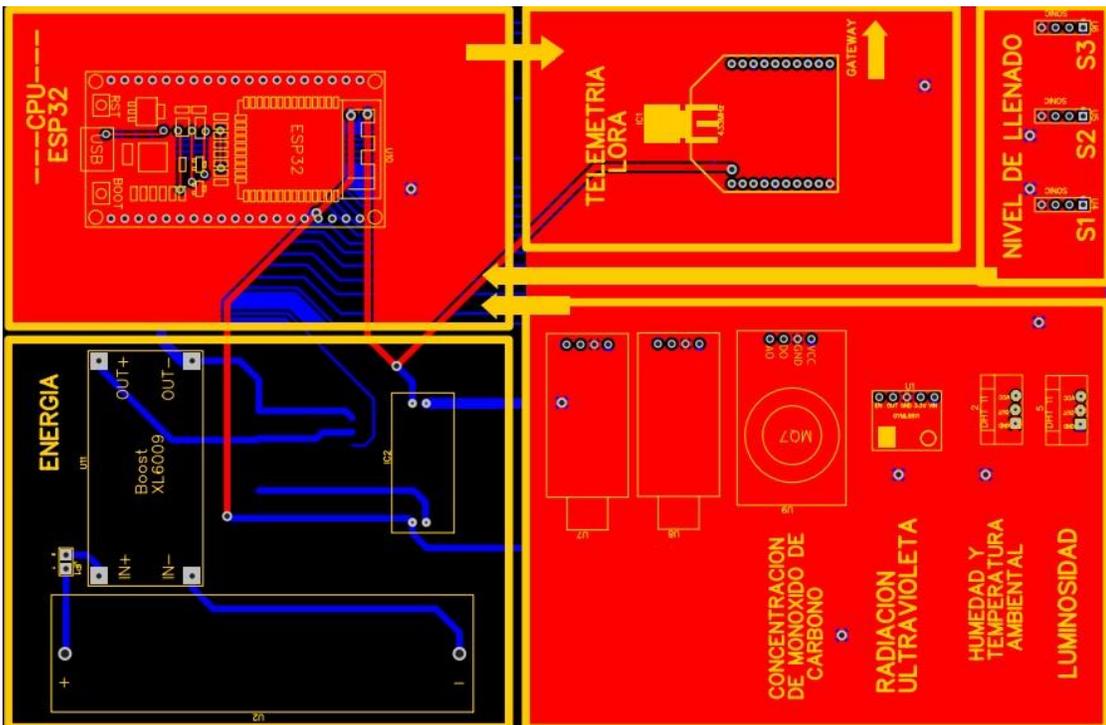


Figura 44
Diseño del prototipo



4.2 Diseño de la arquitectura de red bajo la especificación LoRaWAN 1.0.4

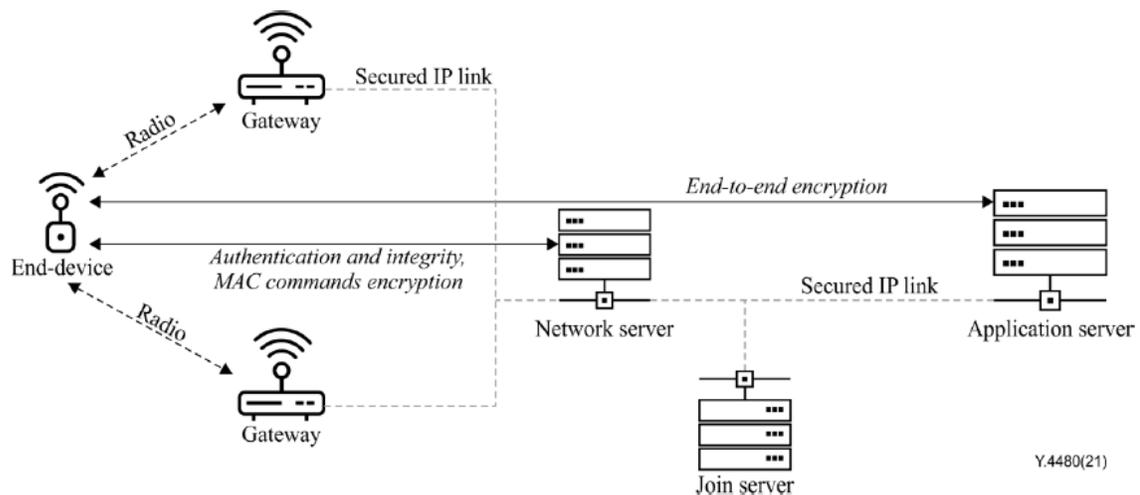
Tomando como referencia a las tablas 02 y 03; así como a los gráficos 03 y 06 del capítulo 2 de este proyecto, se selecciona a la tecnología LoRa como propuesta de solución a la primera problemática presentada en el capítulo 3.

La tecnología de transmisión inalámbrica LoRa, es un tipo de comunicación LPWAN de bajo consumo, bidireccional y que; sobre todo, nos permite transmitir un muy bajo volumen de datos a grandes distancias desde un despliegue de sensores o dispositivos IoT. Si bien el Wi-Fi es superior cuando se trata de ancho de banda, va a depender de estar conectado a una toma eléctrica y su cobertura es de pocos metros.

La arquitectura de red LoRa se basa en la Recommendation ITU-T Y.4480 que la conforman: sensores IoT, gateway LoRaWAN, y la plataforma IoT junto al servidor de aplicación en la nube.

Figura 45

Arquitectura de red LoRa según la recomendación ITU-T Y.4480



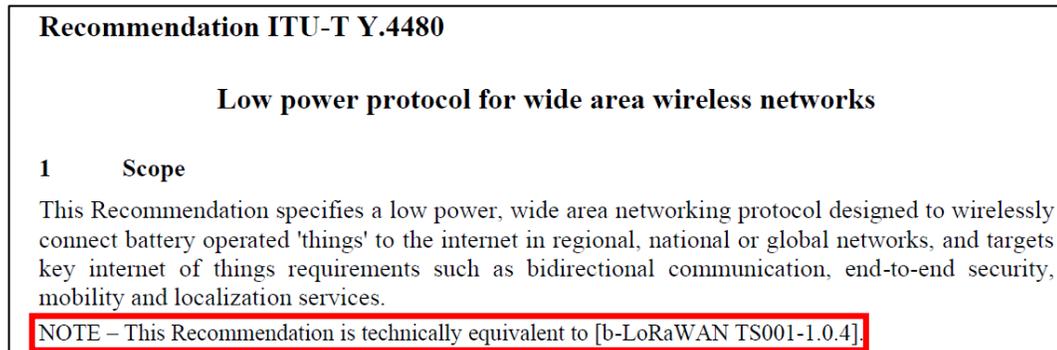
Nota. De "Recommendation Y.4480: Low power protocol for wide area wireless networks", por Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2021 (<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4480-202111-I/en>).

Se adopta la arquitectura de red LoRa en una disposición de estrella, donde el gateway LoRaWAN retransmite los mensajes emitidos por los sensores dentro del alcance. El gateway LoRaWAN se conecta a una plataforma en la nube mediante una conexión a internet y cumple la función de ser un intermediario transparente, encargándose de convertir los paquetes LoRa en paquetes de protocolo IP y viceversa. Esta modalidad de comunicación inalámbrica aprovecha las capacidades de gran alcance proporcionadas por la capa física de LoRa, posibilitando la comunicación directa de un solo salto entre el prototipo y el gateway.

4.2.1 Estándar o Especificación

La base y referencia para el diseño de la arquitectura de red será la especificación LoRaWAN 1.0.4 (oct. 2020) y de los parámetros señalados en LoRaWAN Regional Parameters v1.0.4 (sept. 2022). La International Telecommunication Union (ITU) reconoció en el 2021 a LoRaWAN como un estándar internacional bajo el título Recommendation ITU-T Y.4480: Low Power Protocol for Wide Area Wireless Networks.

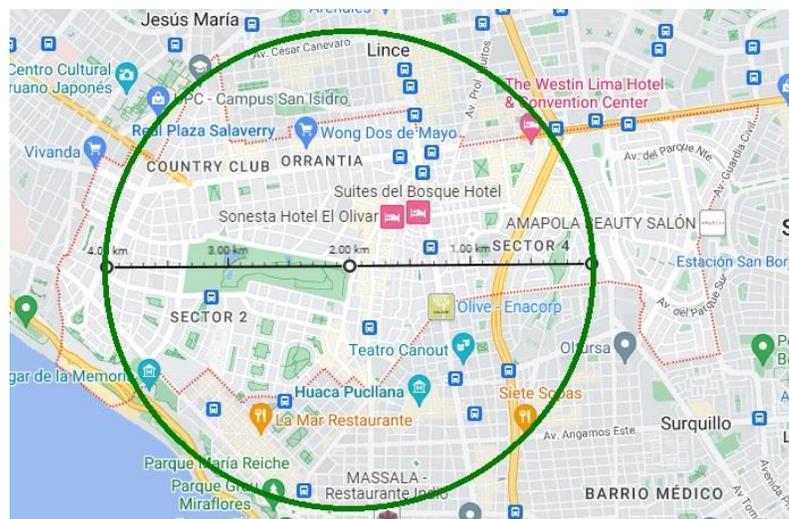
La misma que señala expresamente que la recomendación ITU-T Y.4480 es técnicamente equivalente con la especificación LoRaWAN 1.0.4 (oct. 2020).

Figura 46*Equivalencia de la norma*

Nota. De "Recommendation Y.4480: Low power protocol for wide area wireless networks", por Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2021 (<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4480-202111-I/en>).

4.2.2 Distancia de Cobertura

San Isidro es un distrito con un área de casi 10 km² de extensión (Municipalidad de San Isidro, 2022); por lo que un radio de trabajo de 2 km cubre casi un 100% del área del distrito, viéndolo de manera omnidireccional, y el gateway se ubicaría, idealmente, por las inmediaciones del Parque El Olivar de San Isidro.

Figura 47*Distancia de cobertura*

Nota. Adaptado de “[Cobertura ideal para todos los parques de San Isidro]”, por Google, s.f.-c (<https://www.google.com/maps/@-12.0997133,-77.0252686,16z?authuser=0&entry=ttu>).

Para este proyecto, debemos considerar las especificaciones técnicas en el transceptor LoRa como lo son: potencia, ganancia de la antena, factor de ensanchamiento, entre otros; y las del gateway LoRa indoor con el que contamos; por lo que se establece una cobertura de 0,5 km como máximo.

4.2.3 Frecuencia de Trabajo

De acuerdo con los parámetros regionales de LoRaWAN (LoRa Alliance, 2023), la modulación de la capa física LoRa en Perú opera en el intervalo de frecuencias de 915 a 928 MHz, que se encuentra dentro de la banda no licenciada ISM (aplicaciones en el ámbito industrial, científico y médico).

Figura 48
Parámetros regionales para LoRaWAN

 LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4

	915 - 918 MHz	AS923-3	
Oman (OM)	433.05 - 434.79 MHz	EU433	
	863 - 870 MHz	EU863-870	
Pakistan (PK)	433.05 - 434.79 MHz	EU433	
	865 - 869 MHz	IN865-867	
	920 - 925 MHz	AS923-1	
Palau (PW)			
Palestine (PS)			
Panama (PA)	902 - 928 MHz	AU915-928 ^{3 4}	
Papua New Guinea (PG)	433.05 - 434.79 MHz	EU433	
	915 - 928 MHz ⁴	AU915-928 AS923-1	
Paraguay (PY)	433.05 - 434.79 MHz	EU433	
	915 - 928 MHz	AU915-928 ³	
Peru (PE)	915 - 928 MHz	AU915-928 ³	
Philippines (PH)	915 - 918 MHz	AS923-3	
	868 - 869.2 MHz	EU863-870	

Nota. De "RP002-1.0.4 regional parameters", por LoRa Alliance, 2023

(<https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>).

En nuestro país, este rango de frecuencias es de uso libre, según lo señala el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, y que, de acuerdo con el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, señala que la banda de 915 MHz (frecuencia central) se clasifica como una banda ISM, la cual se reserva para aplicaciones en el ámbito industrial, científico y médico.

Figura 49

Rango de frecuencias de uso libre en Perú

P23 Las siguientes bandas están destinadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM):

13 553 – 13 567 kHz (frecuencia central 13 560 kHz),
 26 957 – 27 283 kHz (frecuencia central 27 120 kHz),
 40,66 – 40,70 MHz (frecuencia central 40,68 MHz),
 902 – 928 MHz (frecuencia central 915 MHz),
 2 400 – 2 500 MHz (frecuencia central 2 450 MHz),
 5 725 – 5 875 MHz (frecuencia central 5 800 MHz), y
 24 - 24,25 GHz (frecuencia central 24,125 GHz)

Los servicios de radiocomunicaciones que funcionan en estas bandas deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de estas aplicaciones y en ningún caso podrán causar interferencias a aplicaciones ICM.

Las bandas 902 – 928 MHz, 2 400 – 2 483,5 MHz y 5 725 – 5 850 MHz, están atribuidas a título secundario para los servicios fijo y/o móvil, público y/o privado. Aquellos que hagan uso de las frecuencias antes indicadas deberán sujetarse a la normativa establecida o que establezca el Ministerio.

Nota. De "Plan Nacional de Atribución de Frecuencias", por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2023

(<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4229456/Plan%20Nacional%20de%20Atribuci%C3%B3n%20de%20Frecuencias%20-%20PNAF%202023.pdf?v=1678288087>).

Los canales a utilizar por la red son determinados por el gateway RAK7246, en cumplimiento con su preconfiguración y capacidades de hardware. Radio 0 preconfigurada

con una frecuencia central de 923.6 MHz y Radio 1 con una frecuencia central de 924.5 MHz.

Figura 50

Preconfiguración del gateway RAK7246

```
"radio_0": {
  "enable": true,
  "type": "SX1257",
  "freq": 923600000,
  "rssi_offset": -166,
  "tx_enable": true,
  "tx_freq_min": 923200000,
  "tx_freq_max": 925000000
},
"radio_1": {
  "enable": true,
  "type": "SX1257",
  "freq": 924500000,
  "rssi_offset": -166,
  "tx_enable": false
},
```

Los canales de frecuencia se establecen desde el gateway hacia el dispositivo final durante el proceso JOIN. Estos saltan en 0,2 MHz de canal a canal de manera obligatoria.

Figura 51

Separación entre canales



LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4

1.3.2 Fixed Channel Plan Regions

Plan	US915	AU915
Default Freq Band	902 to 928 MHz	915 to 928 MHz
Mandatory Channel Freq (Join Req)	upstream: 64 (902.3 to 914.9 [+ by 0.2]) + 8 (903.0 to 914.2 [+ by 1.6]) downstream: 8 (923.3 to 927.5 [+ by 0.6])	upstream: 64 (915.2 to 927.8 [+ by 0.2]) + 8 (915.9 to 927.1 [+ by 1.6]) downstream: 8 (923.3 to 927.5 [+ by 0.6])
JoinReq DataRate [MinDR:MaxDR]	64 (125 kHz channels) using DR0 and 8 (500 kHz channels) using DR4	64 (125 kHz channels) using DR2 and 8 (500 kHz channels) using DR6

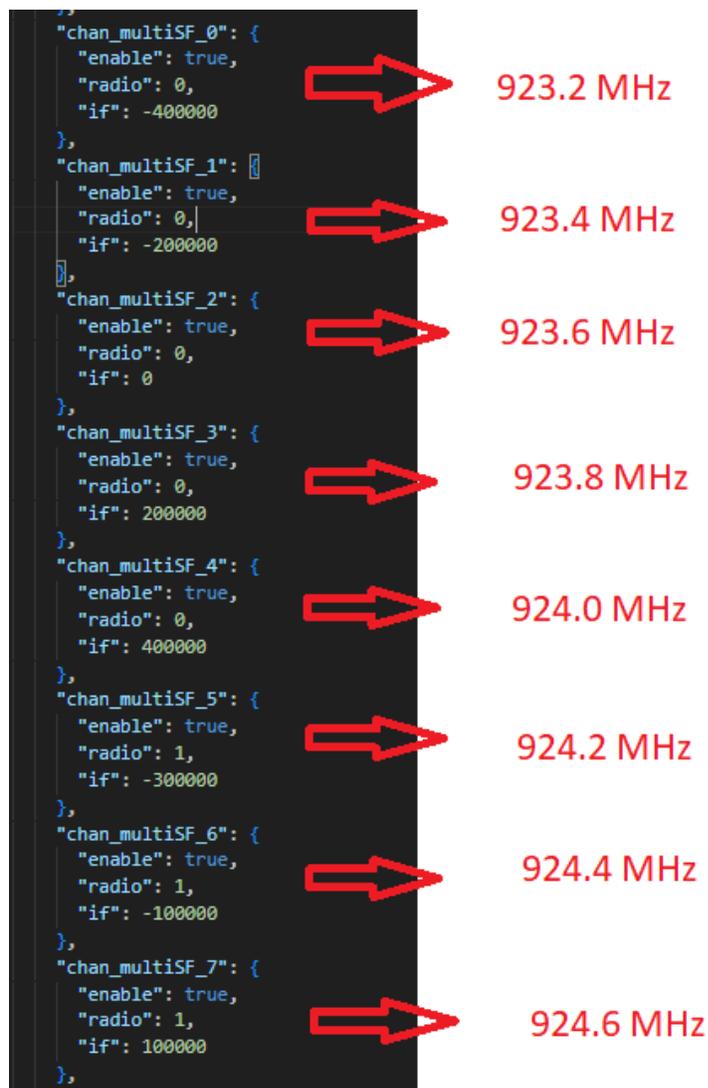
Nota. De "RP002-1.0.4 regional parameters", por LoRa Alliance, 2023

(<https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>).

El dispositivo final elige de manera aleatoria un canal para una determinada transmisión de datos. Sin embargo, el proceso JOIN va a ocurrir en los primeros canales de manera obligatoria, las cuales corresponden a las frecuencias 923.2 MHz (canal 0) y 923.4 MHz (canal 1).

Figura 52

Canales para la transmisión de datos



<pre>"chan_multiSF_0": { "enable": true, "radio": 0, "if": -400000 },</pre>	→	923.2 MHz
<pre>"chan_multiSF_1": { "enable": true, "radio": 0, "if": -200000 },</pre>	→	923.4 MHz
<pre>"chan_multiSF_2": { "enable": true, "radio": 0, "if": 0 },</pre>	→	923.6 MHz
<pre>"chan_multiSF_3": { "enable": true, "radio": 0, "if": 200000 },</pre>	→	923.8 MHz
<pre>"chan_multiSF_4": { "enable": true, "radio": 0, "if": 400000 },</pre>	→	924.0 MHz
<pre>"chan_multiSF_5": { "enable": true, "radio": 1, "if": -300000 },</pre>	→	924.2 MHz
<pre>"chan_multiSF_6": { "enable": true, "radio": 1, "if": -100000 },</pre>	→	924.4 MHz
<pre>"chan_multiSF_7": { "enable": true, "radio": 1, "if": 100000 },</pre>	→	924.6 MHz

4.2.4 Ancho de Banda de Canal

De acuerdo con los parámetros señalados en LoRaWAN Regional Parameters v1.0.4, según la capacidad requerida en los enlaces se deberá emplear el ancho de canal adecuado: 125/250/500 kHz. Este proyecto está enfocado en la transmisión de muy poca información y no se tiene la necesidad de grandes velocidades; por lo que se considera el ancho de banda de canal mínimo de 125 kHz.

Figura 53

Ancho de banda de canal

2.8.2 AU915-928 Band Channel Frequencies

The AU915-928 band SHALL be divided into the following channel plans:

- Upstream – 64 channels, numbered 0 to 63, utilizing LoRa 125 kHz BW, varying from DR0 to DR5, using coding rate 4/5, starting at 915.2 MHz and incrementing linearly by 200 kHz to 927.8 MHz
- Upstream – 8 channels, numbered 64 to 71, utilizing LoRa 500 kHz BW at DR6 or LR-FHSS 1.523 MHz BW at DR7, starting at 915.9 MHz and incrementing linearly by 1.6 MHz to 927.1 MHz
- Downstream – 8 channels, numbered 0 to 7, utilizing LoRa 500 kHz BW at DR8 to DR13), starting at 923.3 MHz and incrementing linearly by 600 kHz to 927.5 MHz

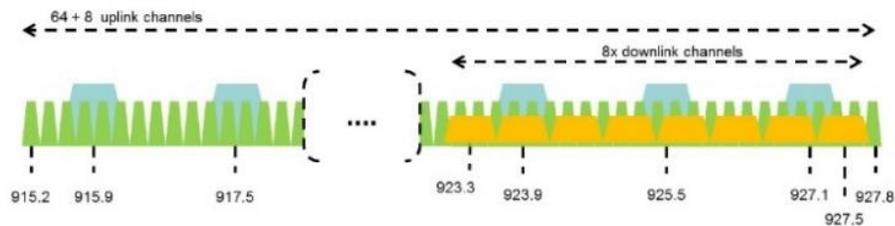


Figure 2: AU915-928 channel frequencies

AU915-928 band end-devices MAY use a maximum EIRP of +30 dBm.

Nota. De "RP002-1.0.4 regional parameters", por LoRa Alliance, 2023

(<https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>).

4.2.5 Factor de Ensanchamiento

A mayor factor de ensanchamiento, mayor será el alcance; pero mayor será el tiempo de vuelo, el cual no debe superar los 400 ms, y menor la velocidad de transmisión de los datos. De acuerdo con los parámetros señalados en LoRaWAN Regional Parameters v1.0.4,

para asegurar un tiempo de vuelo límite de 400 ms debemos trabajar con los factores de ensanchamiento: SF10, SF9, SF89 y SF7.

Figura 54

Rango de factor de ensanchamiento

The default Join-Request Data Rate utilizes the range DR2-DR5 (SF10/125 kHz – SF7/125 kHz). This setting ensures that end-devices are compatible with the 400ms dwell time limitation until the actual dwell time limit is notified to the end-device by the Network Server via the MAC command **TxParamSetupReq**.

Nota. De "RP002-1.0.4 regional parameters", por LoRa Alliance, 2023

(<https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>).

4.2.6 Tasa de Codificación

De acuerdo con los parámetros señalados en LoRaWAN Regional Parameters v1.0.4, LoRa al ser una tecnología orientada a la conexión debe tener un algoritmo de corrección de errores. LoRa utiliza tasas de codificación de 4/5, 2/3, 4/7 y 1/2. Para nuestro caso, señala que, con un ancho de canal de 125 kHz, se debe seleccionar el CR 4/5. Cuando se emplea una tasa de codificación de 4/5, se está codificando un conjunto de 4 bits de datos utilizando un total de 5 bits, lo que incluye un bit adicional destinado a redundancia. La inclusión de esta redundancia posibilita que el receptor sea capaz de detectar y, en algunos casos, corregir errores en el mensaje transmitido.

Figura 55

Tasa de codificación para el ancho de banda de canal

934 **2.8.2 AU915-928 Channel Frequencies**
 935 The AU915-928 Band SHALL be divided into the following channel plans.
 936 • Upstream – 64 channels numbered 0 to 63 utilizing LoRa 125 kHz BW varying from
 937 DR0 to DR5, using coding rate 4/5 starting at 915.2 MHz and incrementing linearly
 938 by 200 kHz to 927.8 MHz

Nota. De "RP002-1.0.4 regional parameters", por LoRa Alliance, 2023

(<https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>).

4.2.7 Tasa de Transmisión de Datos

De acuerdo con los parámetros señalados en LoRaWAN Regional Parameters v1.0.4:

Figura 56

Valores de velocidad de transmisión de datos

The following encoding is used for Data Rate (DR) and end-point EIRP (TXPower) in the AU915-928 band:

Data Rate	Configuration	Indicative Physical Bit Rate [bit/sec]
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470
6	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500
7	LR-FHSS CR1/3: 1.523 MHz BW	162
8	LoRa: SF12 / 500 kHz	980
9	LoRa: SF11 / 500 kHz	1760
10	LoRa: SF10 / 500 kHz	3900
11	LoRa: SF9 / 500 kHz	7000
12	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500

Nota. De "RP002-1.0.4 regional parameters", por LoRa Alliance, 2023

(<https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>).

La siguiente fórmula permite realizar el cálculo de cuántos bits se transmiten por segundo con el factor de ensanchamiento seleccionado, la misma que tomará en cuenta algunos parámetros adicionales.

$$\text{Fórmula: } DR = SF * BW / 2^{SF} * CR$$

Donde SF es el factor de ensanchamiento, BW es el ancho de banda del canal (Hz), y CR es la tasa de codificación.

Cálculo: $DR = 10 * (125\ 000 / 2^{10}) * 4/5$ por tanto: $DR = 976,56$ bps

$DR = 9 * (125\ 000 / 2^9) * 4/5$ por tanto: $DR = 1\ 757,81$ bps

$DR = 8 * (125\ 000 / 2^8) * 4/5$ por tanto: $DR = 3\ 125,00$ bps

$DR = 7 * (125\ 000 / 2^7) * 4/5$ por tanto: $DR = 5\ 468,75$ bps

La tasa de transmisión de datos aumenta a medida que disminuye el factor de ensanchamiento, y viceversa, por lo que nos permite configurar el factor de ensanchamiento de acuerdo con la tasa de transmisión de datos requerida.

4.2.8 Potencia Efectiva Irradiada

La potencia máxima de transmisión está regulada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones mediante Decreto Supremo N° 006-2013-MTC, en la que en su artículo 22, numeral 22.1, inciso i) señala que, en el rango de 915-928 MHz, la PIRE máxima utilizada no deberá exceder los 30 dBm (1 W).

Figura 57

Regulación de la máxima potencia de transmisión irradiada en Perú



"Artículo 22.- Identificación de bandas libres"

22.1 Para la prestación de servicios públicos de telecomunicaciones en áreas rurales y/o lugares de preferente interés social, no se requerirá contar con asignación de espectro, permiso de instalación ni licencia de operación, en las siguientes bandas de frecuencias:

i) 915 - 928 MHz cuya PIRE máxima utilizada no deberá exceder de 30 dBm (1W).

Nota. De "Plan Nacional de Atribución de Frecuencias", por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2023

(<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4229456/Plan%20Nacional%20de%20Atribuci%C3%B3n%20de%20Frecuencias%20-%20PNAF%202023.pdf?v=1678288087>).

La siguiente fórmula permite realizar el cálculo de la potencia efectiva irradiada, la misma que tomará en cuenta algunos parámetros adicionales:

$$\text{Fórmula: } \text{PIRE} = \text{Ptx} + \text{Gtx} - \text{Lc}$$

Donde Ptx será la potencia del transmisor (dBm), Gtx es la ganancia de la antena del transmisor (dBi) y Lc son las pérdidas de todos los componentes (cable, etc.) (dB).

$$\text{Cálculo: } \text{PIRE}_{\text{Antena1}} = +16 + 2 - 0 \quad \text{por tanto: } \text{PIRE} = +18 \text{ dBm}$$

$$\text{PIRE}_{\text{Antena2}} = +16 + 2,3 - 0 \quad \text{por tanto: } \text{PIRE} = +18,3 \text{ dBm}$$

4.2.9 Nivel de Recepción y Pérdidas en la Trayectoria

Se empleó la herramienta LoRa Modem Calculator Tool para determinar la tasa de datos equivalente, tiempo de vuelo y el nivel de potencia en ambas radios: Radio 0 preconfigurada con una frecuencia central de 923.6 MHz y Radio 1 con una frecuencia central de 924.5 MHz, con el fin que se garantice un enlace óptimo para cada factor de ensanchamiento.

Figura 58

LoRa modem calculator tool: Rendimiento con factor de ensanchamiento 10

LoRa Modem Calculator Tool

Calculator Energy Profile

Calculator Inputs

LoRa Modem Settings

Spreading Factor: 10

Bandwidth: 125 kHz

Coding Rate: 1 4/CR+4

Low Datarate: Optimiser On:

Packet Configuration

Payload Length: 8 Bytes

Programmed Preamble: 6 Symbols

Total Preamble Length: 10.25 Symbols

Header Mode: Explicit Header Enabled

CRC Enabled: Enabled

RF Settings

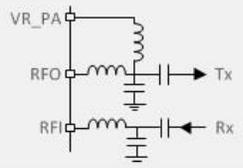
Centre Frequency: 923600000 Hz

Transmit Power: 16 dBm

Hardware Implementation: RFIO is Shared

Compatible SX Products 1272, 1276

Selected Configuration



Preamble Payload CRC

Calculator Outputs

Timing Performance

Equivalent Bitrate	976.56 bps	Time on Air	231.42 ms
Preamble Duration	83.97 ms	Symbol Time	8.19 ms

RF Performance

Link Budget	148 dB
Receiver Sensitivity	-132 dBm
Max Crystal Offset	33.8 ppm

Consumption

Transmit	85 mA
CAD/Rx	10.8 mA
Sleep	100 nA

SF = 10, BW = 125 kHz, CR = 4/5, Header Disabled, Preamble = 10.25 syms Payload = 8 bytes, Transmit Power = 16 dBm

LoRa Modem Calculator Tool

Calculator Energy Profile

Calculator Inputs

LoRa Modem Settings

Spreading Factor: 10

Bandwidth: 125 kHz

Coding Rate: 1 4/CR+4

Low Datarate: Optimiser On:

Packet Configuration

Payload Length: 8 Bytes

Programmed Preamble: 6 Symbols

Total Preamble Length: 10.25 Symbols

Header Mode: Explicit Header Enabled

CRC Enabled: Enabled

RF Settings

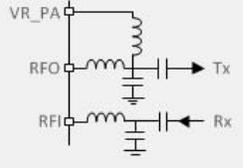
Centre Frequency: 924500000 Hz

Transmit Power: 16 dBm

Hardware Implementation: RFIO is Shared

Compatible SX Products 1272, 1276

Selected Configuration



Preamble Payload CRC

Calculator Outputs

Timing Performance

Equivalent Bitrate	976.56 bps	Time on Air	231.42 ms
Preamble Duration	83.97 ms	Symbol Time	8.19 ms

RF Performance

Link Budget	148 dB
Receiver Sensitivity	-132 dBm
Max Crystal Offset	33.8 ppm

Consumption

Transmit	85 mA
CAD/Rx	10.8 mA
Sleep	100 nA

SF = 10, BW = 125 kHz, CR = 4/5, Header Disabled, Preamble = 10.25 syms Payload = 8 bytes, Transmit Power = 16 dBm

Figura 59

LoRa modem calculator tool: Rendimiento con factor de ensanchamiento 9

LoRa Modem Calculator Tool

Calculator Energy Profile

Calculator Inputs

LoRa Modem Settings

Spreading Factor: 9

Bandwidth: 125 kHz

Coding Rate: 1 4/CR+4

Low Datarate Optimiser On

Packet Configuration

Payload Length: 8 Bytes

Programmed Preamble: 6 Symbols

Total Preamble Length: 10.25 Symbols

Header Mode Explicit Header Enabled

CRC Enabled Enabled

RF Settings

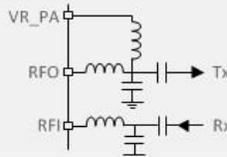
Centre Frequency: 923600000 Hz

Transmit Power: 16 dBm

Hardware Implementation RFIO is Shared

Compatible SX Products 1272, 1273, 1276, 1277

Selected Configuration



Preamble Payload CRC

Calculator Outputs

Timing Performance

Equivalent Bitrate: 1757.81 bps Time on Air: 115.71 ms

Preamble Duration: 41.98 ms Symbol Time: 4.10 ms

RF Performance

Link Budget: 145 dB

Receiver Sensitivity: -129 dBm

Max Crystal Offset: 33.8 ppm

Consumption

Transmit: 85 mA

CAD/Rx: 10.8 mA

Sleep: 100 nA

SF = 9, BW = 125 kHz, CR = 4/5, Header Disabled, Preamble = 10.25 syms Payload = 8 bytes, Transmit Power = 16 dBm

LoRa Modem Calculator Tool

Calculator Energy Profile

Calculator Inputs

LoRa Modem Settings

Spreading Factor: 9

Bandwidth: 125 kHz

Coding Rate: 1 4/CR+4

Low Datarate Optimiser On

Packet Configuration

Payload Length: 8 Bytes

Programmed Preamble: 6 Symbols

Total Preamble Length: 10.25 Symbols

Header Mode Explicit Header Enabled

CRC Enabled Enabled

RF Settings

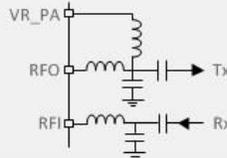
Centre Frequency: 924500000 Hz

Transmit Power: 16 dBm

Hardware Implementation RFIO is Shared

Compatible SX Products 1272, 1273, 1276, 1277

Selected Configuration



Preamble Payload CRC

Calculator Outputs

Timing Performance

Equivalent Bitrate: 1757.81 bps Time on Air: 115.71 ms

Preamble Duration: 41.98 ms Symbol Time: 4.10 ms

RF Performance

Link Budget: 145 dB

Receiver Sensitivity: -129 dBm

Max Crystal Offset: 33.8 ppm

Consumption

Transmit: 85 mA

CAD/Rx: 10.8 mA

Sleep: 100 nA

SF = 9, BW = 125 kHz, CR = 4/5, Header Disabled, Preamble = 10.25 syms Payload = 8 bytes, Transmit Power = 16 dBm

Figura 60

LoRa modem calculator tool: Rendimiento con factor de ensanchamiento 8

LoRa Modem Calculator Tool

Calculator Energy Profile

Calculator Inputs

LoRa Modem Settings

Spreading Factor: 8

Bandwidth: 125 kHz

Coding Rate: 1 4/CR+4

Low Datarate: Optimiser On

Packet Configuration

Payload Length: 8 Bytes

Programmed Preamble: 6 Symbols

Total Preamble Length: 10.25 Symbols

Header Mode: Explicit Header Enabled

CRC Enabled: Enabled

RF Settings

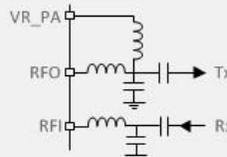
Centre Frequency: 923600000 Hz

Transmit Power: 16 dBm

Hardware Implementation: RFIO is Shared

Compatible SX Products 1272, 1273, 1276, 1277

Selected Configuration



Preamble Payload CRC

Calculator Outputs

Timing Performance

Equivalent Bitrate: 3125 bps Time on Air: 57.86 ms

Preamble Duration: 20.99 ms Symbol Time: 2.05 ms

RF Performance

Link Budget: 142 dB

Receiver Sensitivity: -126 dBm

Max Crystal Offset: 33.8 ppm

Consumption

Transmit: 85 mA

CAD/Rx: 10.8 mA

Sleep: 100 nA

SF = 8, BW = 125 kHz, CR = 4/5, Header Disabled, Preamble = 10.25 syms Payload = 8 bytes, Transmit Power = 16 dBm

LoRa Modem Calculator Tool

Calculator Energy Profile

Calculator Inputs

LoRa Modem Settings

Spreading Factor: 8

Bandwidth: 125 kHz

Coding Rate: 1 4/CR+4

Low Datarate: Optimiser On

Packet Configuration

Payload Length: 8 Bytes

Programmed Preamble: 6 Symbols

Total Preamble Length: 10.25 Symbols

Header Mode: Explicit Header Enabled

CRC Enabled: Enabled

RF Settings

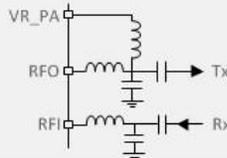
Centre Frequency: 924500000 Hz

Transmit Power: 16 dBm

Hardware Implementation: RFIO is Shared

Compatible SX Products 1272, 1273, 1276, 1277

Selected Configuration



Preamble Payload CRC

Calculator Outputs

Timing Performance

Equivalent Bitrate: 3125 bps Time on Air: 57.86 ms

Preamble Duration: 20.99 ms Symbol Time: 2.05 ms

RF Performance

Link Budget: 142 dB

Receiver Sensitivity: -126 dBm

Max Crystal Offset: 33.8 ppm

Consumption

Transmit: 85 mA

CAD/Rx: 10.8 mA

Sleep: 100 nA

SF = 8, BW = 125 kHz, CR = 4/5, Header Disabled, Preamble = 10.25 syms Payload = 8 bytes, Transmit Power = 16 dBm

Figura 61

LoRa modem calculator tool: Rendimiento con factor de ensanchamiento 7

LoRa Modem Calculator Tool

Calculator Energy Profile

Calculator Inputs

LoRa Modem Settings

Spreading Factor: 7

Bandwidth: 125 kHz

Coding Rate: 1 4/CR+4

Low Datarate Optimiser On

Packet Configuration

Payload Length: 8 Bytes

Programmed Preamble: 6 Symbols

Total Preamble Length: 10.25 Symbols

Header Mode Explicit Header Enabled

CRC Enabled Enabled

RF Settings

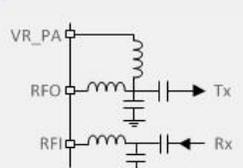
Centre Frequency: 923600000 Hz

Transmit Power: 16 dBm

Hardware Implementation RFIO is Shared

Compatible SX Products 1272, 1273, 1276, 1277

Selected Configuration



Calculator Outputs

Timing Performance

Equivalent Bitrate	5468.75 bps	Time on Air	34.05 ms
Preamble Duration	10.50 ms	Symbol Time	1.02 ms

RF Performance

Link Budget	139 dB
Receiver Sensitivity	-123 dBm
Max Crystal Offset	33.8 ppm

Consumption

Transmit	85 mA
CAD/Rx	10.8 mA
Sleep	100 nA

SF = 7, BW = 125 kHz, CR = 4/5, Header Disabled, Preamble = 10.25 syms Payload = 8 bytes, Transmit Power = 16 dBm

LoRa Modem Calculator Tool

Calculator Energy Profile

Calculator Inputs

LoRa Modem Settings

Spreading Factor: 7

Bandwidth: 125 kHz

Coding Rate: 1 4/CR+4

Low Datarate Optimiser On

Packet Configuration

Payload Length: 8 Bytes

Programmed Preamble: 6 Symbols

Total Preamble Length: 10.25 Symbols

Header Mode Explicit Header Enabled

CRC Enabled Enabled

RF Settings

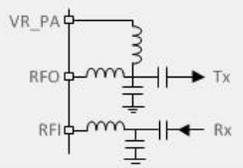
Centre Frequency: 924500000 Hz

Transmit Power: 16 dBm

Hardware Implementation RFIO is Shared

Compatible SX Products 1272, 1273, 1276, 1277

Selected Configuration



Calculator Outputs

Timing Performance

Equivalent Bitrate	5468.75 bps	Time on Air	34.05 ms
Preamble Duration	10.50 ms	Symbol Time	1.02 ms

RF Performance

Link Budget	139 dB
Receiver Sensitivity	-123 dBm
Max Crystal Offset	33.8 ppm

Consumption

Transmit	85 mA
CAD/Rx	10.8 mA
Sleep	100 nA

SF = 7, BW = 125 kHz, CR = 4/5, Header Disabled, Preamble = 10.25 syms Payload = 8 bytes, Transmit Power = 16 dBm

De esta herramienta se evidencia para cada factor de ensanchamiento: la tasa de transmisión de datos, tiempo en el aire y potencia mínima requerida para llegar al gateway para cada frecuencia de radio.

Tabla 3
Comparación de rendimientos

Factor de ensanchamiento	10	9	8	7
Tasa de transmisión de bits	976,56 bps	1 757,81 bps	3 125 bps	5 468,75 bps
Tiempo en el aire	231,42 ms	115,71 ms	57,86 ms	34,05 ms
Sensibilidad del receptor	132 dBm	129 dBm	126 dBm	123 dBm

Figura 62
Relación entre factor de ensanchamiento y sensibilidad

SF	Tasa de bits equivalente (kb/s)	Sensibilidad (dBm)
12	0.293	-137
11	0.537	-134,5
10	0.976	-132
9	1.757	-129
8	3.125	-126
7	5.468	-123

Nota. De "Evaluación de pasarela Lora/LoRaWAN en entornos urbanos", por Moya, 2018 (<https://riunet.upv.es/handle/10251/109791>)

En consecuencia, al mantener constante el ancho de banda del canal, cada aumento de un factor de ensanchamiento en una unidad, como de SF7 a SF10, resultará en casi el doble del tiempo en el aire y reducirá la sensibilidad del receptor en 3 dB.

Con esta información, se calcula las pérdidas de la trayectoria utilizando el presupuesto del enlace, el cual representa una evaluación de todas las pérdidas y ganancias que ocurren desde el transmisor hasta el receptor a lo largo del canal de propagación.

$$\text{Fórmula: } N_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L_c - L_p + G_{rx} - L_c$$

Donde P_{tx} será la potencia del transmisor (dBm), G_{tx} es la ganancia de la antena en el transmisor (dBi), L_c son las pérdidas de todos los componentes (cable, etc.) (dB), L_p son las pérdidas en la trayectoria (dB), G_{rx} será la ganancia de la antena en el receptor (dBi) y L_c son las pérdidas de todos los componentes (cable, etc.) (dB).

Pérdidas en la trayectoria con antena de 2 dBi en gateway y de 2,3 dBi en prototipo:

$$\text{Cálculo con SF10: } -132 = +16 + 2 - 0 - L_p + 2,3 - 0 \quad \text{por tanto: } L_p = 152,3 \text{ dB}$$

$$\text{Cálculo con SF9: } -129 = +16 + 2 - 0 - L_p + 2,3 - 0 \quad \text{por tanto: } L_p = 149,3 \text{ dB}$$

$$\text{Cálculo con SF8: } -126 = +16 + 2 - 0 - L_p + 2,3 - 0 \quad \text{por tanto: } L_p = 146,3 \text{ dB}$$

$$\text{Cálculo con SF7: } -123 = +16 + 2 - 0 - L_p + 2,3 - 0 \quad \text{por tanto: } L_p = 143,3 \text{ dB}$$

Pérdidas en la trayectoria con antena de 2,3 dBi en gateway y de 2,3 dBi en prototipo:

$$\text{Cálculo con SF10: } -132 = +16 + 2,3 - 0 - L_p + 2,3 - 0 \quad \text{por tanto: } L_p = 152,6 \text{ dB}$$

$$\text{Cálculo con SF9: } -129 = +16 + 2,3 - 0 - L_p + 2,3 - 0 \quad \text{por tanto: } L_p = 149,6 \text{ dB}$$

$$\text{Cálculo con SF8: } -126 = +16 + 2,3 - 0 - L_p + 2,3 - 0 \quad \text{por tanto: } L_p = 146,6 \text{ dB}$$

Cálculo con SF7: $-123 = +16 + 2,3 - 0 - L_p + 2,3 - 0$ por tanto: $L_p = 143,6$ dB

4.2.10 Gateway LoRa

Se utiliza un gateway de diseño y desarrollo de prototipos LoRaWAN. Para este proyecto, se adquirió el gateway indoor RAK Wireless RAK7246 que permite la recepción simultánea a través de 8 canales LoRa que cubren todo el espacio de alta frecuencia LoRaWAN, con el cual se evalúa, verifica y demuestra el desarrollo del proyecto.

Figura 63

Gateway interior LoRaWAN RAK7246G



La ficha técnica del gateway LoRa nos muestra que la potencia mínima requerida para llegar a éste, se encuentra dentro del rango.

Figura 64*Niveles de sensibilidad del gateway RAK7246*

Signal Bandwidth (kHz)	Spreading Factor	Sensitivity (dBm)
125	12	-141
125	7	-128
250	12	-137
250	7	-124
500	12	-135
500	7	-121

Nota. De "RAK7246G wisgate developer D0 gateway datasheet", por RAK, 2023a (<https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7246G/Datasheet/#hardware>).

4.2.11 Pruebas de Envío de Información

Para las pruebas, se configuran los SF10 (DR2), SF9 (DR3), SF8 (DR4) y SF7 (DR5) en el transceptor SX1276 de la etapa de transmisión del prototipo, pero no se configuran los SF12 (DR0) y SF11 (DR1) ya que no aseguran tiempo de vuelo menor a 400 ms. El gateway LoRa RAK7246 recibe todas las configuraciones de SF en sus 8 canales de recepción con un ancho de banda de canal fija de 125 kHz, lo que hace que el resto de configuraciones (DR6 a DR12) sean incompatibles con el gateway; por lo que tampoco se configuran en el prototipo.

Figura 65
Proceso de mediciones en campo



Figura 66
Panel del módulo de pruebas en The Things Network

Dashboard | Live data - modulotest - The Things Network

nam1.cloud.thethings.network/console/applications/gioapp/devices/modulotest/data

SUNAT | UPC - Aula Virtual | OneDrive | WhatsApp Web | Dashboard | Console

gio app

- Overview
- End devices
- Live data
- Payload formatters
- Integrations
- Collaborators
- API keys
- General settings

Applications > gio app > End devices > modulotest > Live data

modulotest
ID: modulotest

↑ 1 ↓ 1 Last activity 1 minute ago

Overview | **Live data** | Messaging | Location | Payload formatters | Claiming | General settings

Time	Type	Data preview
21:51:45	Schedule data downlink for...	DevAddr: 26 0C F8 64
21:51:45	Fail to send webhook	Request
21:51:45	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C F8 64
21:51:45	Successfully processed dat...	DevAddr: 26 0C F8 64
21:51:29	Schedule data downlink for...	DevAddr: 26 0C F8 64
21:51:29	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C F8 64
21:51:29	Successfully processed dat...	DevAddr: 26 0C F8 64
21:51:23	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C F8 64
21:51:21	Accept join-request	DevAddr: 26 0C F8 64

Event details

```

49   "eui": "8827EBFFFEA20DF8"
50   },
51   "timestamp": 1438877756,
52   "rssi": -101,
53   "channel_rssi": -101,
54   "snr": 7.5,
55   "uplink_token": "CHYKFAoIZ2lvZ3R3aWQScLgn6//+og34ELzspaoF",
56   "channel_index": 5,
57   "received_at": "2022-11-23T02:51:29.025044131Z"
58   },
59   },
60   "settings": {
61     "data_rate": {
62       "lora": {
63         "bandwidth": 125000,
64         "spreading_factor": 7,
65         "coding_rate": "4/5"
66       }
67     }
68   },
69   "frequency": "924200000",
70   "timestamp": 1438877756

```

09:53 p.m.

Prueba 1: Ubicamos el prototipo a **25,05 m** del gateway

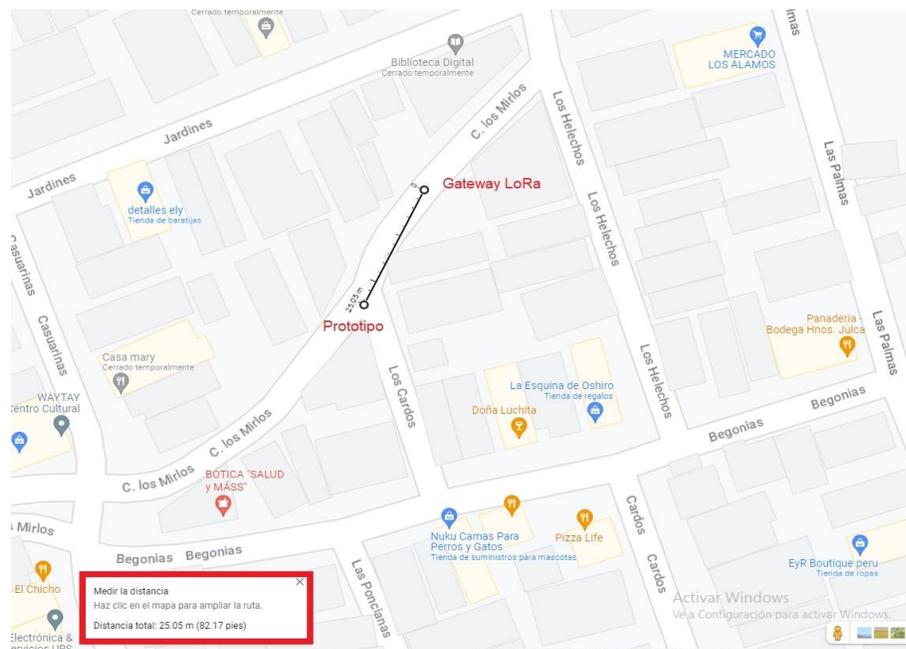
Tabla 4

Especificaciones técnicas en prueba 1

Parámetro	Gateway	Prototipo
Ubicación	Latitud: -12.03289	Latitud: -12.03308
	Longitud: -76.99532	Longitud: -76.99543
Altura	10 m (3er piso)	1 m (calle)
Cobertura	0 m	25,05 m
Potencia de transmisión	-	+16 dBm
Ganancia de la antena	2 dBi	2,3 dBi
Pérdidas en el cable	-	-
Frecuencia central	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz

Figura 67

Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 1



Nota. Adaptado de “[Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 1]”, por Google, s.f.-d (<https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>).

Prueba 1.1: Configuramos el SF a 10

Figura 68

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 1.1

↑ 15:16:56	eui-ac1f09fffe824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 ...	FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: 5.8 RSSI: -53
↑ 15:16:44	eui-ac1f09fffe824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA		
↑ 15:16:32	eui-ac1f09fffe824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA		
↑ 15:16:28	eui-ac1f09fffe824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA		
↑ 15:16:12	eui-ac1f09fffe824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 2A BA		
↑ 15:16:11	eui-ac1f09fffe824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 13 81		
⌵ 15:16:10	eui-ac1f09fffe824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 2A BA		

Figura 69

Información en la trama LoRaWAN en prueba 1.1

```
"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXiepXxCCKJWApLgKDkA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 4,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRweJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "8827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 2650325884,
      "rssi": -53,
      "channel_rssi": -53,
      "snr": 5.8,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQsSCLgn6//+og34EPyG4+8JG",
      "channel_index": 4,
      "received_at": "2023-09-02T20:16:56.539332320Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 10,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924000000",
    "timestamp": 2650325884
  }
},
```

Prueba 1.2: Configuramos el SF a 9

Figura 70

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 1.2

↑ 15:16:56	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA	
↑ 15:16:44	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 ... FPort: 2 Data rate: SF9BW125 SNR: 13 RSSI: -57
↑ 15:16:32	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA	
↑ 15:16:28	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA	
↑ 15:16:12	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 2A BA	
↑ 15:16:11	eui-ac1f09fffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 13 81	
⊞ 15:16:18	eui-ac1f09fffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 2A BA	

Figura 71

Información en la trama LoRaWAN en prueba 1.2

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXiepXxCCKJWApLgKdKA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 3,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "8827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 2638153284,
      "rssi": -57,
      "channel_rssi": -57,
      "snr": 13,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQsSCLgn6//+og34EMSM/
      "channel_index": 6,
      "received_at": "2023-09-02T20:16:44.373318976Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 9,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924400000",
    "timestamp": 2638153284
  }
},

```

Prueba 1.3: Configuramos el SF a 8

Figura 72

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 1.3

↑ 15:16:56	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA	<>		
↑ 15:16:44	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA	<>		
↑ 15:16:32	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _	FPort: 2 Data rate: SF8BW125 SNR: 8.2 RSSI: -54
↑ 15:16:20	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA	<>		
↑ 15:16:12	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 2A BA	<>		
↑ 15:16:11	eui-ac1f09fffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 13 81	<>		
⊞ 15:16:10	eui-ac1f09fffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 2A BA	<>		

Figura 73

Información en la trama LoRaWAN en prueba 1.3

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXiepXxCckJWApLgKDkA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 2,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 2626047948,
      "rssi": -54,
      "channel_rssi": -54,
      "snr": 8.2,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQScLgn6//+og34EMyfme",
      "channel_index": 7,
      "received_at": "2023-09-02T20:16:32.260076096Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 8,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924600000",
    "timestamp": 2626047948
  },
}

```

Prueba 1.4: Configuramos el SF a 7

Figura 74

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 1.4

↑ 15:16:56	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA		
↑ 15:16:44	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA		
↑ 15:16:32	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA		
↑ 15:16:20	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A BA	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45	FPort: 2 Data rate: SF7BW125 SNR: 7.5 RSSI: -57
↑ 15:16:12	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 2A BA		
↑ 15:16:11	eui-ac1f09fffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 13 81		
⊞ 15:16:10	eui-ac1f09fffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 2A BA		

Figura 75

Información en la trama LoRaWAN en prueba 1.4

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXiepXxCCKJWApLgKDKA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 1,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 2613981155,
      "rssi": -57,
      "channel_rssi": -57,
      "snr": 7.5,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQScLgn6//+og34EC",
      "channel_index": 2,
      "received_at": "2023-09-02T20:16:20.199552079Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 7,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923600000",
    "timestamp": 2613981155
  }
},

```

Prueba 2: Reubicamos el prototipo a **73,8 m** del gateway

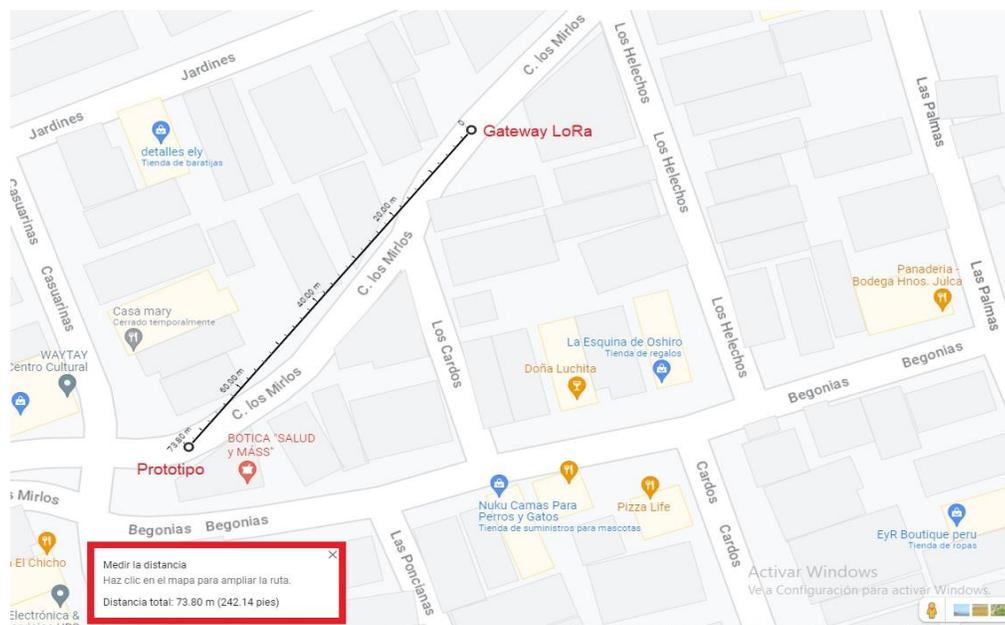
Tabla 5

Especificaciones técnicas en prueba 2

Parámetro	Gateway	Prototipo
Ubicación	Latitud: -12.03289	Latitud: -12.03341
	Longitud: -76.99532	Longitud: -76.99577
Altura	10 m (3er piso)	1 m (calle)
Cobertura	0 m	73,8 m
Potencia de transmisión	-	+16 dBm
Ganancia de la antena	2 dBi	2,3 dBi
Pérdidas en el cable	-	-
Frecuencia central	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz

Figura 76

Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 2



Nota. Adaptado de “[Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 2]”, por Google, s.f.-e (<https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>).

Prueba 2.1: Configuramos el SF a 10

Figura 77

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 2.1

↑ 15:19:12	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _	FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: 11 RSSI: -70
↑ 15:19:00	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C		
↑ 15:18:48	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C		
↑ 15:18:36	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C		
↑ 15:18:28	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 2A 0C		
↑ 15:18:27	eui-ac1f09fffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 07 5A		
⊞ 15:18:27	eui-ac1f09fffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 2A 0C		

Figura 78

Información en la trama LoRaWAN en prueba 2.1

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXi/57ChkKK7k7YJNq8A==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 4,
  "frm_payload": "ASNFZ4k8I0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "8827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 2785789676,
      "rssi": -70,
      "channel_rssi": -70,
      "snr": 11,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ21vZ3R3aWQSClg6//+og34",
      "channel_index": 1,
      "received_at": "2023-09-02T20:19:12.008811842Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 10,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923400000",
    "timestamp": 2785789676
  }
},

```

Prueba 2.2: Configuramos el SF a 9

Figura 79

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 2.2

↑ 15:19:12	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	<>	
↑ 15:19:00	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <> FPort: 2 Data rate: SF9BW125 SNR: 12 RSSI: -72
↑ 15:18:48	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	<>	
↑ 15:18:35	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	<>	
↑ 15:18:28	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	<>	
↑ 15:18:27	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 07 5A	<>	
⊞ 15:18:27	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 2A 0C	<>	

Figura 80

Información en la trama LoRaWAN en prueba 2.2

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXi/57ChkKK7k7YJNq8A==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 3,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 2773604372,
      "rssi": -72,
      "channel_rssi": -72,
      "snr": 12,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQsSCLgn6//+oq",
      "channel_index": 4,
      "received_at": "2023-09-02T20:18:59.956913936Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 9,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924000000",
    "timestamp": 2773604372
  }
},

```

Prueba 2.3: Configuramos el SF a 8

Figura 81

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 2.3

↑ 15:19:12	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C <>
↑ 15:19:08	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C <>
↑ 15:18:48	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C <> Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <> FPort: 2 Data rate: SF8BW125 SNR: 11.2 RSSI: -71
↑ 15:18:35	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C <>
↑ 15:18:28	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 2A 0C <>
↑ 15:18:27	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 07 5A <>
⌂ 15:18:27	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 2A 0C <>

Figura 82

Información en la trama LoRaWAN en prueba 2.3

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXi/57ChkKK7k7YJNq8A==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 2,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 2761499028,
      "rssi": -71,
      "channel_rssi": -71,
      "snr": 11.2,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQoSCLgn6//+o",
      "channel_index": 6,
      "received_at": "2023-09-02T20:18:47.714626281Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 8,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924400000",
    "timestamp": 2761499028
  }
}

```

Prueba 2.4: Configuramos el SF a 7

Figura 83

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 2.4

↑ 15:19:12	eui-ac1f09fffe0024f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	
↑ 15:19:00	eui-ac1f09fffe0024f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	
↑ 15:18:48	eui-ac1f09fffe0024f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	
↑ 15:18:35	eui-ac1f09fffe0024f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ FPort: 2 Data rate: SF7BW125 SNR: 9.5 RSSI: -71
↑ 15:18:28	eui-ac1f09fffe0024f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 2A 0C	
↑ 15:18:27	eui-ac1f09fffe0024f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 07 5A	
⊞ 15:18:27	eui-ac1f09fffe0024f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 2A 0C	

Figura 84

Información en la trama LoRaWAN en prueba 2.4

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXi/57ChkKK7k7YJNq8A==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 1,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRweJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 2749432227,
      "rssi": -71,
      "channel_rssi": -71,
      "snr": 9.5,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQSClgn6//+o{
      "channel_index": 3,
      "received_at": "2023-09-02T20:18:35.649472898Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 7,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923800000",
    "timestamp": 2749432227
  }
},

```

Prueba 3: Reubicamos el prototipo a 135,93 m del gateway

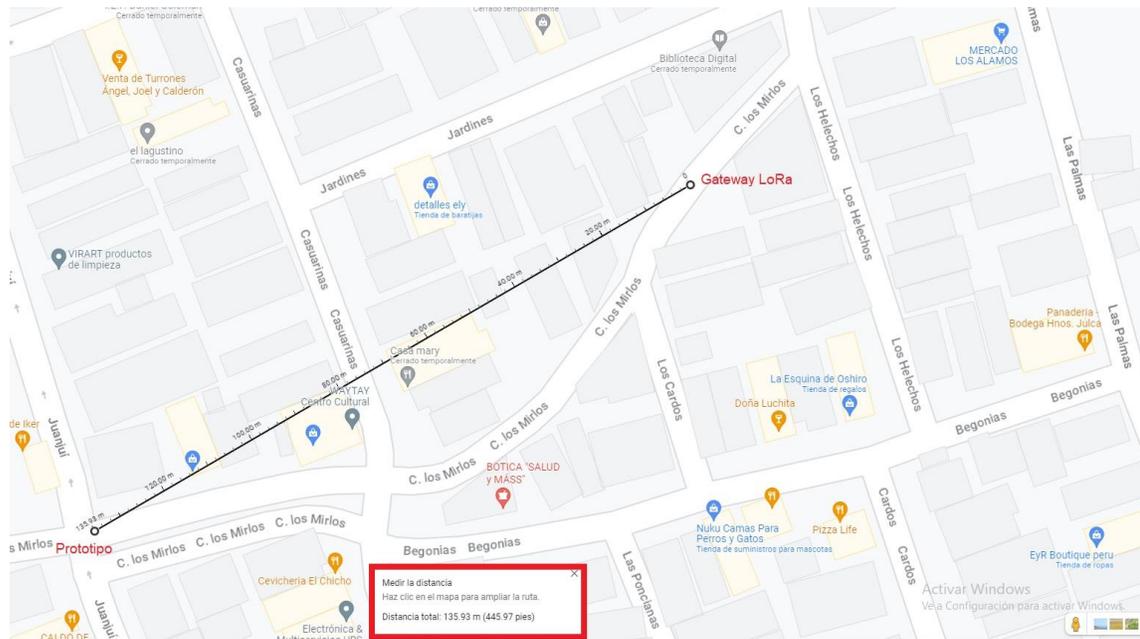
Tabla 6

Especificaciones técnicas en prueba 3

Parámetro	Gateway	Prototipo
Ubicación	Latitud: -12.03289	Latitud: -12.03352
	Longitud: -76.99532	Longitud: -76.99642
Altura	10 m (3er piso)	1 m (calle)
Cobertura	0 m	135,93 m
Potencia de transmisión	-	+16 dBm
Ganancia de la antena	2 dBi	2,3 dBi
Pérdidas en el cable	-	-
Frecuencia central	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz

Figura 85

Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 3



Nota. Adaptado de “[Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 3]”, por Google, s.f.-f (<https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>).

Prueba 3.1: Configuramos el SF a 10

Figura 86

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 3.1

↑ 15:23:12	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45	FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: 7.8 RSSI: -91
↑ 15:23:00	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7		
↑ 15:22:48	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7		
↑ 15:22:36	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7		
↑ 15:22:24	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 98 B7		
↑ 15:22:23	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 9C 46		
Ⓞ 15:22:23	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 98 B7		

Figura 87

Información en la trama LoRaWAN en prueba 3.1

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXj5g+4FgQvn2u3UrScg==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 4,
  "frm_payload": "ASNfZ4k8I0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3026098900,
      "rssi": -91,
      "channel_rssi": -91,
      "snr": 7.8,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQScLgn6//+og34E",
      "channel_index": 4,
      "received_at": "2023-09-02T20:23:12.316343958Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 10,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924000000",
    "timestamp": 3026098900
  }
}

```

Prueba 3.2: Configuramos el SF a 9

Figura 88

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 3.2

↑ 15:23:12	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7 <> 📄
↑ 15:23:08	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7 <> 📄 Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <> 📄 FPort: 2 Data rate: SF9BW125 SNR: 12.5 RSSI: -91
↑ 15:22:48	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7 <> 📄
↑ 15:22:36	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7 <> 📄
↑ 15:22:24	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 98 B7 <> 📄
↑ 15:22:23	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 9C 46 <> 📄
🔊 15:22:23	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 98 B7 <> 📄

Figura 89

Información en la trama LoRaWAN en prueba 3.2

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXj5g+4FgQvn2u3UrScg==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 3,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRweJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3013913588,
      "rssi": -91,
      "channel_rssi": -91,
      "snr": 12.5,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWwQSClg",
      "channel_index": 6,
      "received_at": "2023-09-02T20:23:00.13050"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 9,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924400000",
    "timestamp": 3013913588
  }
},

```

Prueba 3.3: Configuramos el SF a 8

Figura 90

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 3.3

↑ 15:23:12	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7 <>	
↑ 15:23:08	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7 <>	
↑ 15:22:48	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7 <>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 ... <> FPort: 2 Data rate: SF8BW125 SNR: 10.8 RSSI: -91
↑ 15:22:36	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7 <>	
↑ 15:22:24	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 98 B7 <>	
↑ 15:22:23	eui-ac1f09fffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 9C 46 <>	
Ⓞ 15:22:23	eui-ac1f09fffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 98 B7 <>	

Figura 91

Información en la trama LoRaWAN en prueba 3.3

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXj5g+4FgQvn2u3UirScg==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 2,
  "frm_payload": "ASNFZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3001820964,
      "rssi": -91,
      "channel_rssi": -91,
      "snr": 10.8,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWwQSClg6//",
      "channel_index": 1,
      "received_at": "2023-09-02T20:22:48.03013867"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 8,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923400000",
    "timestamp": 3001820964
  }
},

```

Prueba 3.4: Configuramos el SF a 7

Figura 92

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 3.4

↑ 15:23:12	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7	<>	
↑ 15:23:08	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7	<>	
↑ 15:22:48	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7	<>	
↑ 15:22:36	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 98 B7	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 ... <> FPort: 2 Data rate: SF7BW125 SNR: 9 RSSI: -89
↑ 15:22:24	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 98 B7	<>	
↑ 15:22:23	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 9C 46	<>	
Ⓞ 15:22:23	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 98 B7	<>	

Figura 93

Información en la trama LoRaWAN en prueba 3.4

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXj5g+4FgQvn2u3UrScg==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 1,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRweJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 2989754163,
      "rssi": -89,
      "channel_rssi": -89,
      "snr": 9,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQScLgn6/",
      "channel_index": 4,
      "received_at": "2023-09-02T20:22:35.9710396"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 7,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924000000",
    "timestamp": 2989754163
  }
},

```

Prueba 4: Reubicamos el prototipo a **148,41** m del gateway

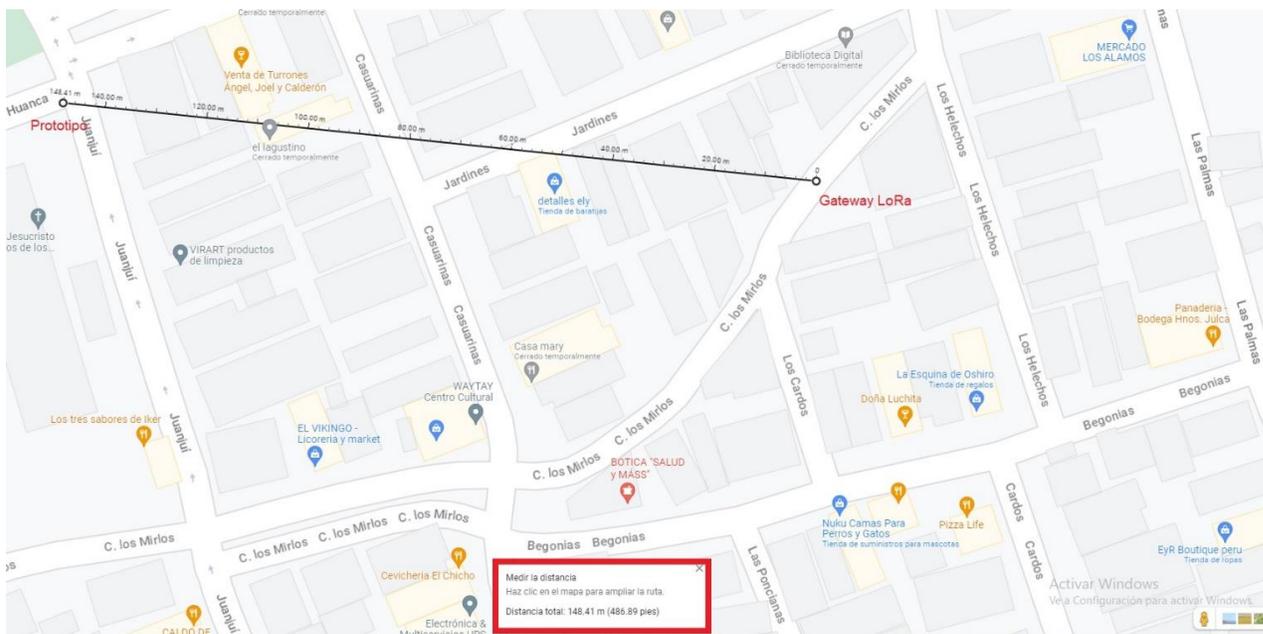
Tabla 7

Especificaciones técnicas en prueba 4

Parámetro	Gateway	Prototipo
Ubicación	Latitud: -12.03289	Latitud: --12.03277
	Longitud: -76.99532	Longitud: -76.99670
Altura	10 m (3er piso)	1 m (calle)
Cobertura	0 m	148,41 m
Potencia de transmisión	-	+16 dBm
Ganancia de la antena	2 dBi	2,3 dBi
Pérdidas en el cable	-	-
Frecuencia central	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz

Figura 94

Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 4



Nota. Adaptado de “[Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 4]”, por Google, s.f.-g (<https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>).

Prueba 4.1: Configuramos el SF a 10

Figura 95

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 4.1

↑ 15:26:27	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3 <>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <>	FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -3.2 RSSI: -109
↑ 15:26:14	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3 <>		
↑ 15:26:02	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3 <>		
↑ 15:25:50	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3 <>		
↑ 15:25:43	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 90 F3 <>		
↑ 15:25:41	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C C0 98 <>		
⌵ 15:25:41	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 90 F3 <>		

Figura 96

Información en la trama LoRaWAN en prueba 4.1

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXkqCtyacrRc0IxxtGPA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 4,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827E8FFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3220651548,
      "rssi": -109,
      "channel_rssi": -109,
      "snr": -3.2,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ21vZ3R3aWQScLgn6//+og3",
      "channel_index": 3,
      "received_at": "2023-09-02T20:26:26.872935946Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "loras": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 10,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923800000",
    "timestamp": 3220651548
  }
},

```

Prueba 4.2: Configuramos el SF a 9

Figura 97

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 4.2

↑ 15:26:27	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	
↑ 15:26:14	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <> FPort: 2 Data rate: SF9BW125 SNR: -5 RSSI: -113
↑ 15:26:02	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	
↑ 15:25:50	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	
↑ 15:25:43	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 90 F3	
↑ 15:25:41	eui-ac1f09fffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C C0 98	
⌂ 15:25:41	eui-ac1f09fffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 90 F3	

Figura 98

Información en la trama LoRaWAN en prueba 4.2

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXkqCtyacrRcOIxxtGPA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 3,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3208453524,
      "rssi": -113,
      "channel_rssi": -113,
      "snr": -5,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQScLgnt",
      "channel_index": 5,
      "received_at": "2023-09-02T20:26:14.668496"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 9,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924200000",
    "timestamp": 3208453524
  }
},

```

Prueba 4.3: Configuramos el SF a 8

Figura 99

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 4.3

↑ 15:26:27	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	
↑ 15:26:14	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	
↑ 15:26:02	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <> FPort: 2 Data rate: SF8BW125 SNR: -6 RSSI: -109
↑ 15:25:50	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	
↑ 15:25:43	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	
↑ 15:25:41	eui-ac1f09fffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C C0 98	<>	
⊞ 15:25:41	eui-ac1f09fffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	

Figura 100

Información en la trama LoRaWAN en prueba 4.3

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXkqCtyacrRcOIxxtGPA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 2,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827E8FFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3196373628,
      "rssi": -109,
      "channel_rssi": -109,
      "snr": -6,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQsSCLgn6/",
      "channel_index": 6,
      "received_at": "2023-09-02T20:26:02.5858359"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 8,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924400000",
    "timestamp": 3196373628
  },
}

```

Prueba 4.4: Configuramos el SF a 7

Figura 101

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 4.4

↑ 15:26:27	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	
↑ 15:26:14	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	
↑ 15:26:02	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	
↑ 15:25:50	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <> FPort: 2 Data rate: SF7BW125 SNR: -3 RSSI: -112
↑ 15:25:43	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	
↑ 15:25:41	eui-ac1f09fffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C C0 98	<>	
⊞ 15:25:41	eui-ac1f09fffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 90 F3	<>	

Figura 102

Información en la trama LoRaWAN en prueba 4.4

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpXkqCtyacrRcOIxxtGPA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 1,
  "frm_payload": "ASNFZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827E8FFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3184306828,
      "rssi": -112,
      "channel_rssi": -112,
      "snr": -3,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ21vZ3R3aWQSClgn6",
      "channel_index": 5,
      "received_at": "2023-09-02T20:25:50.5202146"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 7,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924200000",
    "timestamp": 3184306828
  }
},

```

Prueba 5: Reubicamos el prototipo a **238,63 m** del gateway

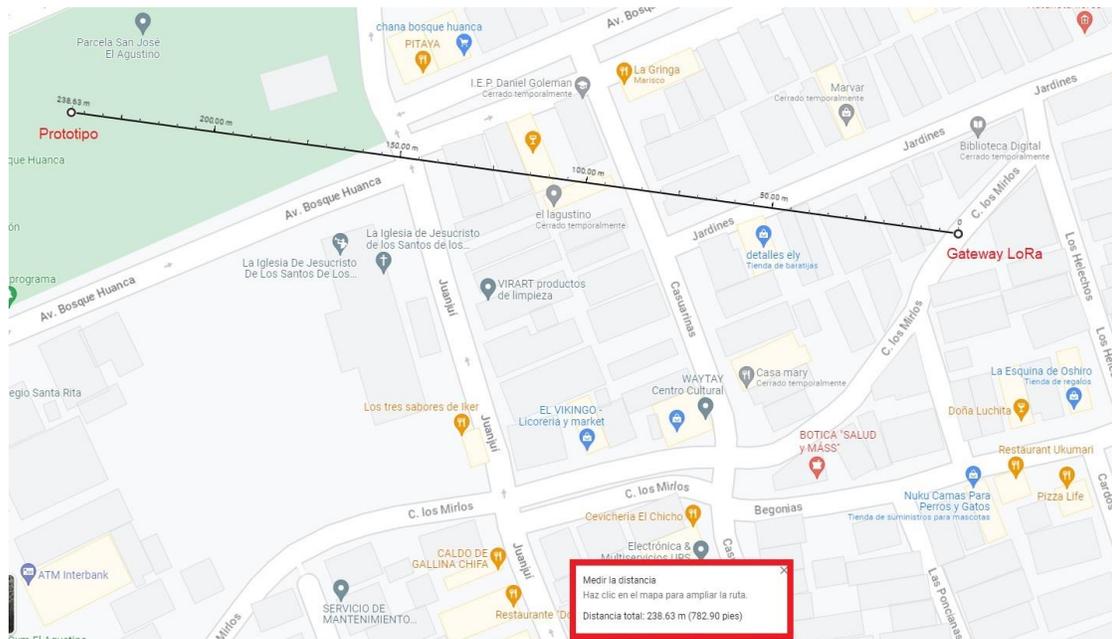
Tabla 8

Especificaciones técnicas en prueba 5

Parámetro	Gateway	Prototipo
Ubicación	Latitud: -12.03289	Latitud: -12.03265
	Longitud: -76.99532	Longitud: -76.997507
Altura	10 m (3er piso)	1 m (calle)
Cobertura	0 m	238,63 m
Potencia de transmisión	-	+16 dBm
Ganancia de la antena	2 dBi	2,3 dBi
Pérdidas en el cable	-	-
Frecuencia central	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz

Figura 103

Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 5



Nota. Adaptado de “[Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 5]”, por Google, s.f.-h (<https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>).

Prueba 5.1: Configuramos el SF a 10

Figura 104

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 5.1

↑ 16:38:42	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6 <>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <>	FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -4.5 RSSI: -109
↑ 16:38:30	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6 <>		
↑ 16:38:17	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6 <>		
↑ 16:38:05	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6 <>		
↑ 16:37:56	eui-ac1f09fffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C E8 A6 <>		
↑ 16:37:55	eui-ac1f09fffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 25 B0 <>		
⌵ 16:37:55	eui-ac1f09fffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C E8 A6 <>		

Figura 105

Información en la trama LoRaWAN en prueba 5.1

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpX1L+IsHKYxafFQLIpxA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 4,
  "frm_payload": "ASNfZ4k8I0VniQEjRweJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3260757412,
      "rssi": -109,
      "channel_rssi": -109,
      "snr": -4.5,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQSClgn6",
      "channel_index": 6,
      "received_at": "2023-09-02T21:38:41.943297"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 10,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924400000",
    "timestamp": 3260757412
  }
}

```

Prueba 5.2: Configuramos el SF a 9

Figura 106

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 5.2

↑ 16:38:42	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>		
↑ 16:38:38	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _	FPort: 2 Data rate: SF9BW125 SNR: -8.5 RSSI: -109
↑ 16:38:17	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>		
↑ 16:38:05	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>		
↑ 16:37:56	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>		
↑ 16:37:55	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 25 B0	<>		
⌂ 16:37:55	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>		

Figura 107

Información en la trama LoRaWAN en prueba 5.2

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpX1L+IsHKYxafFQLIpxA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 3,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3248572116,
      "rssi": -109,
      "channel_rssi": -109,
      "snr": -8.5,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQoSCLgn",
      "channel_index": 1,
      "received_at": "2023-09-02T21:38:29.753816"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 9,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923400000",
    "timestamp": 3248572116
  }
},

```

Prueba 5.3: Configuramos el SF a 8

Figura 108

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 5.3

↑ 16:38:42	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>	
↑ 16:38:38	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>	
↑ 16:38:17	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 ... <> FPort: 2 Data rate: SF8BW125 SNR: -6 RSSI: -109
↑ 16:38:05	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>	
↑ 16:37:56	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>	
↑ 16:37:55	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 25 B0	<>	
⌂ 16:37:55	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C E8 A6	<>	

Figura 109

Información en la trama LoRaWAN en prueba 5.3

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpX1L+IsHKYxafQLIpxA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 2,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRweJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3236479484,
      "rssi": -109,
      "channel_rssi": -109,
      "snr": -6,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQScLgn6",
      "channel_index": 2,
      "received_at": "2023-09-02T21:38:17.654299"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 8,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923600000",
    "timestamp": 3236479484
  }
},

```

Prueba 5.4: Configuramos el SF a 7

Figura 110

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 5.4

↑ 16:38:42	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<> 📄	
↑ 16:38:38	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<> 📄	
↑ 16:38:17	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<> 📄	
↑ 16:38:05	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<> 📄	Payload: 01 23 46 67 09 01 23 46 ... 📄 FPort: 2 Data rate: SF7BW125 SNR: -6.8 RSSI: -109
↑ 16:37:56	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C E8 A6	<> 📄	
↑ 16:37:55	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 25 B0	<> 📄	
⌂ 16:37:55	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C E8 A6	<> 📄	

Figura 111

Información en la trama LoRaWAN en prueba 5.4

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYpX1L+IsHKYxafQLIpxA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 1,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 3224399971,
      "rssi": -109,
      "channel_rssi": -109,
      "snr": -5.8,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQScLgn",
      "channel_index": 2,
      "received_at": "2023-09-02T21:38:05.578621"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 7,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923600000",
    "timestamp": 3224399971
  }
},

```

Prueba 6: Reubicamos el prototipo a **321,71 m** del gateway

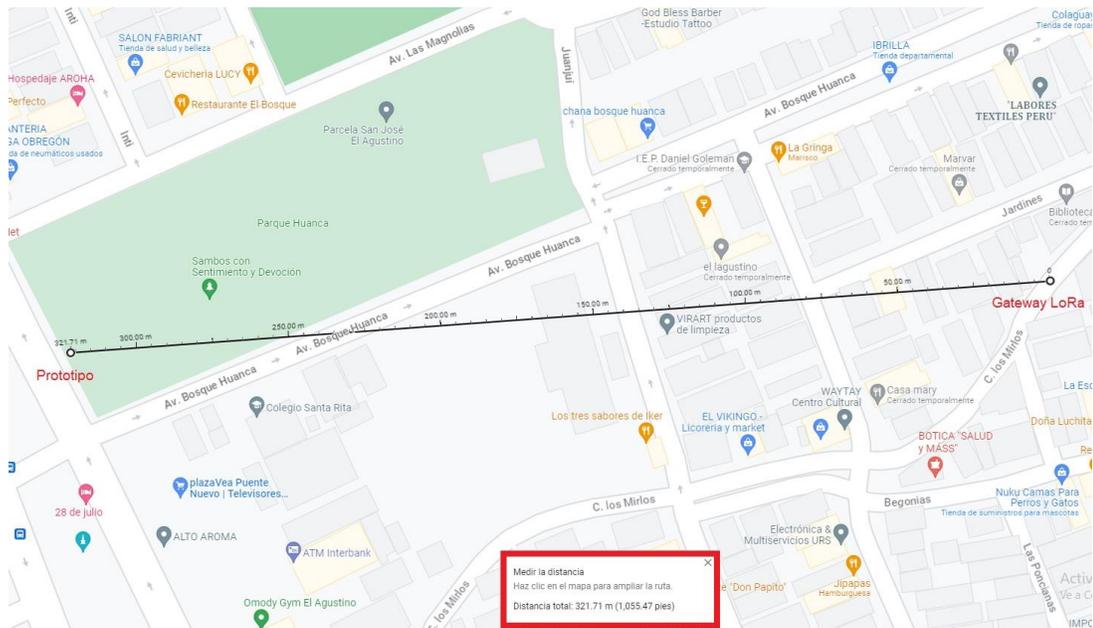
Tabla 9

Especificaciones técnicas en prueba 6

Parámetro	Gateway	Prototipo
Ubicación	Latitud: -12.03289	Latitud: -12.03313
	Longitud: -76.99532	Longitud: -76.99828
Altura	10 m (3er piso)	1 m (calle)
Cobertura	0 m	321,71 m
Potencia de transmisión	-	+16 dBm
Ganancia de la antena	2 dBi	2,3 dBi
Pérdidas en el cable	-	-
Frecuencia central	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz

Figura 112

Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 6



Nota. Adaptado de “[Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 6]”, por Google, s.f.-i (<https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>).

Prueba 6.1: Configuramos el SF a 10

Figura 113

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 6.1

↑ 15:29:57	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 06 8D	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 ...	FPort: 2 Data rate: SF160M25 SNR: -12.8 RSSI: -109
↑ 15:29:15	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 06 8D		
↑ 15:29:13	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 90 F3		
Ⓞ 15:29:13	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 06 8D		

Prueba 6.2: Configuramos el SF a 9

Figura 114

Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 6.2

↑ 15:29:57	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 06 8D		
↑ 15:29:15	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 06 8D		
↑ 15:29:13	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 90 F3		
Ⓞ 15:29:13	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 06 8D		

Prueba 6.3: Configuramos el SF a 8

Figura 115

Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 6.3

↑ 15:29:57	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 06 8D		
↑ 15:29:15	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 06 8D		
↑ 15:29:13	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 90 F3		
Ⓞ 15:29:13	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 06 8D		

Prueba 6.4: Configuramos el SF a 7

Figura 116

Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 6.4

↑ 15:29:57	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 06 8D		
↑ 15:29:15	eui-ac1f09ffffe0824f2	Forward join-accept message	DevAddr: 26 0C 06 8D		
↑ 15:29:13	eui-ac1f09ffffe0824f2	Successfully processed join-request	DevAddr: 26 0C 90 F3		
Ⓞ 15:29:13	eui-ac1f09ffffe0824f2	Accept join-request	DevAddr: 26 0C 06 8D		

Prueba 7: Reubicamos el prototipo a **217,35 m** del gateway.

Reemplazamos la antena del gateway de 2 dBi por una de mayor ganancia 2,3 dBi.

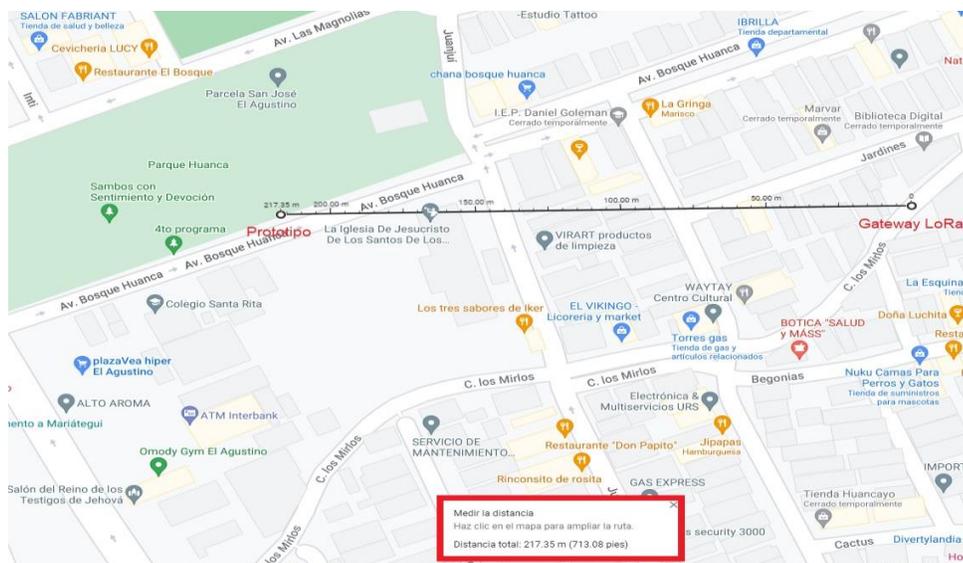
Tabla 10

Especificaciones técnicas en prueba 7

Parámetro	Gateway	Prototipo
Ubicación	Latitud: -12.03289	Latitud: -12.03292
	Longitud: -76.99532	Longitud: -76.99732
Altura	10 m (3er piso)	1 m (calle)
Cobertura	0 m	217,35 m
Potencia de transmisión	-	+16 dBm
Ganancia de la antena	2,3 dBi	2,3 dBi
Pérdidas en el cable	-	-
Frecuencia central	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz

Figura 117

Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 7



Nota. Adaptado de “[Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 7]”, por Google, s.f.-j (<https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>).

Prueba 7.1: Configuramos el SF a 10

Figura 118

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 7.1

↓ 15:16:51	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	
↑ 15:16:51	Forward uplink data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <> FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -7 RSSI: -111
↑ 15:16:51	Successfully processed data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	
↓ 15:16:39	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	
↑ 15:16:39	Forward uplink data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	
↑ 15:16:39	Successfully processed data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	
↓ 15:16:27	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	

Figura 119

Información en la trama LoRaWAN en prueba 7.1

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYp2cAGxmHROxmP18ezNow==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 4,
  "frm_payload": "ASNFZ4kBI8VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "8827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 1591025988,
      "rssi": -111,
      "channel_rssi": -111,
      "snr": -7,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQsSCLgn6//+og34",
      "channel_index": 3,
      "received_at": "2023-09-08T20:16:50.950831705Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 10,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923800000",
    "timestamp": 1591025988
  }
}

```

Prueba 7.2: Configuramos el SF a 9

Figura 120

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 7.2

↓ 15:16:51	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr:	26 0C 71 B6	⟨⟩	
↑ 15:16:51	Forward uplink data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	⟨⟩	
↑ 15:16:51	Successfully processed data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	⟨⟩	
↓ 15:16:39	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr:	26 0C 71 B6	⟨⟩	
↑ 15:16:39	Forward uplink data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	⟨⟩	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ ⟨⟩ FPort: 2 Data rate: SF9BW125 SNR: -3.2 RSSI: -114
↑ 15:16:39	Successfully processed data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	⟨⟩	
↓ 15:16:27	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr:	26 0C 71 B6	⟨⟩	

Figura 121

Información en la trama LoRaWAN en prueba 7.2

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYp2cAGxmHRoXmP18ezNow==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 3,
  "frm_payload": "ASNFZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 1578861180,
      "rssi": -114,
      "channel_rssi": -114,
      "snr": -3.2,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ21vZ3R3aWQsSCLgn6",
      "channel_index": 5,
      "received_at": "2023-09-08T20:16:38.784743"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 9,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924200000",
    "timestamp": 1578861180
  }
},

```

Prueba 7.3: Configuramos el SF a 8

Figura 122

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 7.3

↑ 15:16:51	Successfully processed data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	
↓ 15:16:39	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	
↑ 15:16:39	Forward uplink data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	
↑ 15:16:39	Successfully processed data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	
↓ 15:16:27	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	
↑ 15:16:26	Forward uplink data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <> FPort: 2 Data rate: SF8BW125 SNR: -2.5 RSSI: -112
↑ 15:16:26	Successfully processed data message	DevAddr:	26 0C 71 B6	<>	

Figura 123

Información en la trama LoRaWAN en prueba 7.3

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYp2cAGxmHRoXmP18ezNow==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 2,
  "frm_payload": "ASNFZ4k8I0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 1566750508,
      "rssi": -112,
      "channel_rssi": -112,
      "snr": -2.5,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQSClgn6/",
      "channel_index": 5,
      "received_at": "2023-09-08T20:16:26.6803093"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 8,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924200000",
    "timestamp": 1566750508
  }
},

```

Prueba 7.4: Configuramos el SF a 7

Figura 124

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 7.4

↑ 15:16:39 Forward uplink data message DevAddr: 26 0C 71 B6 <> 📄

↑ 15:16:39 Successfully processed data message DevAddr: 26 0C 71 B6 <> 📄

↓ 15:16:27 Schedule data downlink for transmis... DevAddr: 26 0C 71 B6 <> 📄

↑ 15:16:26 Forward uplink data message DevAddr: 26 0C 71 B6 <> 📄

↑ 15:16:26 Successfully processed data message DevAddr: 26 0C 71 B6 <> 📄

↓ 15:16:15 Schedule data downlink for transmis... DevAddr: 26 0C 71 B6 <> 📄

↑ 15:16:14 Forward uplink data message DevAddr: 26 0C 71 B6 <> 📄 Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <> 📄 FPort: 2 Data rate: SF7BW125 SNR: -6.5 RSSI: -113

Figura 125

Información en la trama LoRaWAN en prueba 7.4

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYp2cAGxmHROXmP18ezNow==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 1,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827E8FFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 1554693963,
      "rssi": -113,
      "channel_rssi": -113,
      "snr": -5.5,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQScLgn6",
      "channel_index": 1,
      "received_at": "2023-09-08T20:16:14.614936"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 7,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923400000",
    "timestamp": 1554693963
  }
},

```

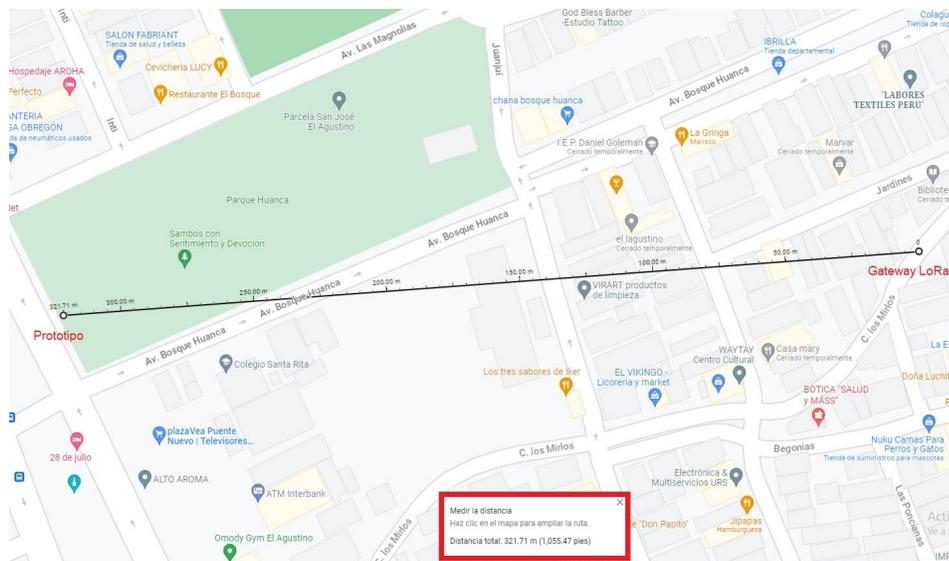
Prueba 8: Reubicamos el prototipo nuevamente a **321,71 m** del gateway

Punto en que en la prueba 6 sólo establecía señal en SF10.

Tabla 11
Especificaciones técnicas en prueba 8

Parámetro	Gateway	Prototipo
Ubicación	Latitud: -12.03289	Latitud: -12.03313
	Longitud: -76.99532	Longitud: -76.99828
Altura	10 m (3er piso)	1 m (calle)
Cobertura	0 m	321,71 m
Potencia de transmisión	-	+16 dBm
Ganancia de la antena	2,3 dBi	2,3 dBi
Pérdidas en el cable	-	-
Frecuencia central	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz

Figura 126
Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 8



Nota. Adaptado de “[Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 8]”, por Google, s.f.-k (<https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>).

Prueba 8.1: Configuramos el SF a 10

Figura 127

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 8.1

↓ 15:19:40	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	
↑ 15:19:40	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 ... <>
↑ 15:19:40	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	FPort: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -5.8 RSSI: -114
↓ 15:19:28	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	
↑ 15:19:28	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	
↑ 15:19:28	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	
↓ 15:19:16	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	

Figura 128

Información en la trama LoRaWAN en prueba 8.1

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYp2cpVgId/BGsEk9WnYpA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 4,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRweJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 1760074492,
      "rssi": -114,
      "channel_rssi": -114,
      "snr": -5.8,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQsSCLgn6//+
      "channel_index": 6,
      "received_at": "2023-09-08T20:19:39.999938183"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 10,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924400000",
    "timestamp": 1760074492
  }
},

```

Prueba 8.2: Configuramos el SF a 9

Figura 129

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 8.2

↓ 15:19:40	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	
↑ 15:19:40	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	
↑ 15:19:40	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	
↓ 15:19:28	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	
↑ 15:19:28	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 _ <> FPort: 2 Data rate: SF9BW125 SNR: -6 RSSI: -113
↑ 15:19:28	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	
↓ 15:19:16	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C 54 6E	<>	

Figura 130

Información en la trama LoRaWAN en prueba 8.2

```
"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYp2cpVgId/BGsEk9WnYpA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 3,
  "frm_payload": "ASNFZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 1747922396,
      "rssi": -113,
      "channel_rssi": -113,
      "snr": -6,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQoSCLgn6//+o",
      "channel_index": 1,
      "received_at": "2023-09-08T20:19:27.843882399Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 9,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923400000",
    "timestamp": 1747922396
  }
},
```

Prueba 8.3: Configuramos el SF a 8

Figura 131

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 8.3



Figura 132

Información en la trama LoRaWAN en prueba 8.3

```
"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYp2cpVgId/BGsEk9WnYpA==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 2,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 1735799004,
      "rssi": -112,
      "channel_rssi": -112,
      "snr": -6.8,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQsCLgn6/",
      "channel_index": 6,
      "received_at": "2023-09-08T20:19:15.7270934"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 8,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924400000",
    "timestamp": 1735799004
  }
},
```

Prueba 8.4: Configuramos el SF a 7

Figura 133

Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 8.4

↓ 15:19:48	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr:	26 8C 54 6E	<>	📄
↑ 15:19:48	Forward uplink data message	DevAddr:	26 8C 54 6E	<>	📄
↑ 15:19:48	Successfully processed data message	DevAddr:	26 8C 54 6E	<>	📄
↓ 15:19:28	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr:	26 8C 54 6E	<>	📄
↑ 15:19:28	Forward uplink data message	DevAddr:	26 8C 54 6E	<>	📄
↑ 15:19:28	Successfully processed data message	DevAddr:	26 8C 54 6E	<>	📄
↓ 15:19:16	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr:	26 8C 54 6E	<>	📄

Prueba 9: Reubicamos el prototipo a **394,77 m** del gateway

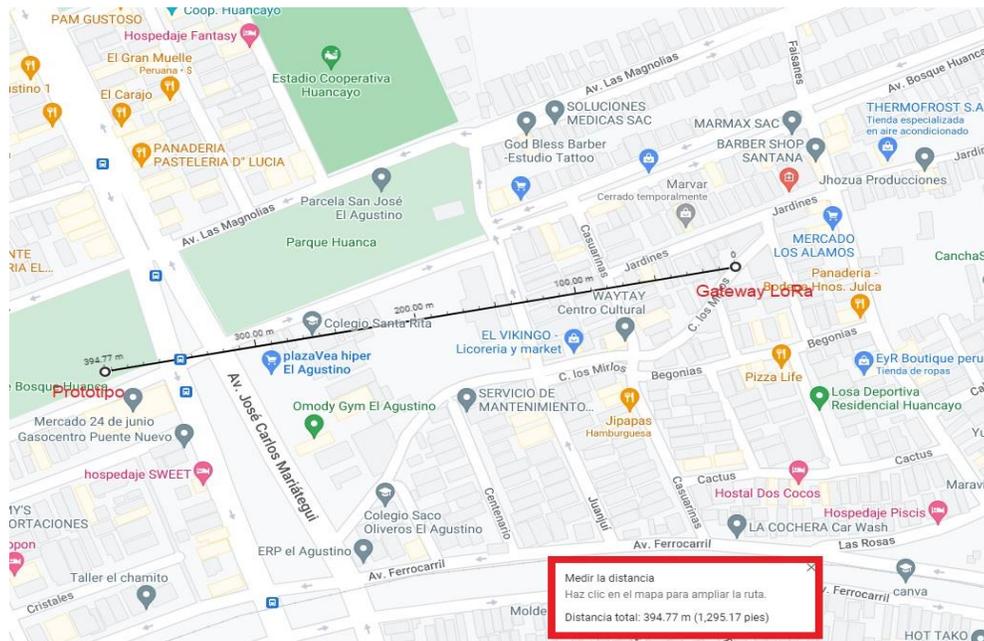
Tabla 12

Especificaciones técnicas en prueba 9

Parámetro	Gateway	Prototipo
Ubicación	Latitud: -12.03289	Latitud: -12.03353
	Longitud: -76.99532	Longitud: -76.99889
Altura	10 m (3er piso)	1 m (calle)
Cobertura	0 m	394,77 m
Potencia de transmisión	-	+16 dBm
Ganancia de la antena	2,3 dBi	2,3 dBi
Pérdidas en el cable	-	-
Frecuencia central	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz

Figura 134

Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 9



Nota. Adaptado de “[Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 9]”, por Google, s.f.-l (<https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>).

Prueba 9.1: Configuramos el SF a 10

Figura 135

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 9.1

↓ 15:23:31	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C AE 7E	<>	
↑ 15:23:30	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 ... FPport: 2 Data rate: SF10BW125 SNR: -10.2 RSSI: -114
↑ 15:23:30	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	<>	
↓ 15:23:06	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C AE 7E	<>	
↑ 15:23:06	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	<>	
↑ 15:23:06	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	<>	
↓ 15:22:54	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C AE 7E	<>	

Figura 136

Información en la trama LoRaWAN en prueba 9.1

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYp2dhjWT1l8huhntfmuKw==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 4,
  "frm_payload": "ASNfZ4k8I0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "8827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 1990596356,
      "rssi": -114,
      "channel_rssi": -114,
      "snr": -10.2,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ2lvZ3R3aWQScLgn6//",
      "channel_index": 5,
      "received_at": "2023-09-08T20:23:30.53021424"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lorawan": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 10,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924200000",
    "timestamp": 1990596356
  }
},

```

Prueba 9.2: Configuramos el SF a 9

Figura 137

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 9.2

↓ 15:23:31	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr:	26 0C AE 7E	<>	
↑ 15:23:30	Forward uplink data message	DevAddr:	26 0C AE 7E	<>	
↑ 15:23:30	Successfully processed data message	DevAddr:	26 0C AE 7E	<>	
↓ 15:23:06	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr:	26 0C AE 7E	<>	
↑ 15:23:06	Forward uplink data message	DevAddr:	26 0C AE 7E	<>	Payload: 01 23 45 67 89 01 23 45 ... <> FPort: 2 Data rate: SF9BW125 SNR: -3.5 RSSI: -113
↑ 15:23:06	Successfully processed data message	DevAddr:	26 0C AE 7E	<>	
↓ 15:22:54	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr:	26 0C AE 7E	<>	

Figura 138

Información en la trama LoRaWAN en prueba 9.2

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYp2dhjwTl18huhntfmuKw==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 2,
  "frm_payload": "ASNFZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "8827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 1966305708,
      "rssi": -113,
      "channel_rssi": -113,
      "snr": -3.5,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ21vZ3R3aWQsClgn6",
      "channel_index": 1,
      "received_at": "2023-09-08T20:23:06.230196"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 9,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "923400000",
    "timestamp": 1966305708
  }
},

```

Prueba 9.3: Configuramos el SF a 8

Figura 139

Trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 9.3



Figura 140

Información en la trama LoRaWAN en prueba 9.3

```

"uplink_message": {
  "session_key_id": "AYp2dhjWT1l8huhntfmuKw==",
  "f_port": 2,
  "f_cnt": 1,
  "frm_payload": "ASNfZ4kBI0VniQEjRWeJ",
  "rx_metadata": [
    {
      "gateway_ids": {
        "gateway_id": "giogtwid",
        "eui": "B827EBFFFEA20DF8"
      },
      "timestamp": 1954238892,
      "rssi": -112,
      "channel_rssi": -112,
      "snr": -4,
      "uplink_token": "ChYKFAoIZ21vZ3R3aWQSClg6//+og",
      "channel_index": 6,
      "received_at": "2023-09-08T20:22:54.160267148Z"
    }
  ],
  "settings": {
    "data_rate": {
      "lora": {
        "bandwidth": 125000,
        "spreading_factor": 8,
        "coding_rate": "4/5"
      }
    },
    "frequency": "924400000",
    "timestamp": 1954238892
  }
},

```

Prueba 9.4: Configuramos el SF a 7

Figura 141

Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 9.4

↓ 15:23:31	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	📄
↑ 15:23:30	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	📄
↑ 15:23:30	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	📄
↓ 15:23:06	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	📄
↑ 15:23:06	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	📄
↑ 15:23:06	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	📄
↓ 15:22:54	Schedule data downlink for transmis...	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	📄

Prueba 10: Reubicamos el prototipo a **403,2 m** del gateway

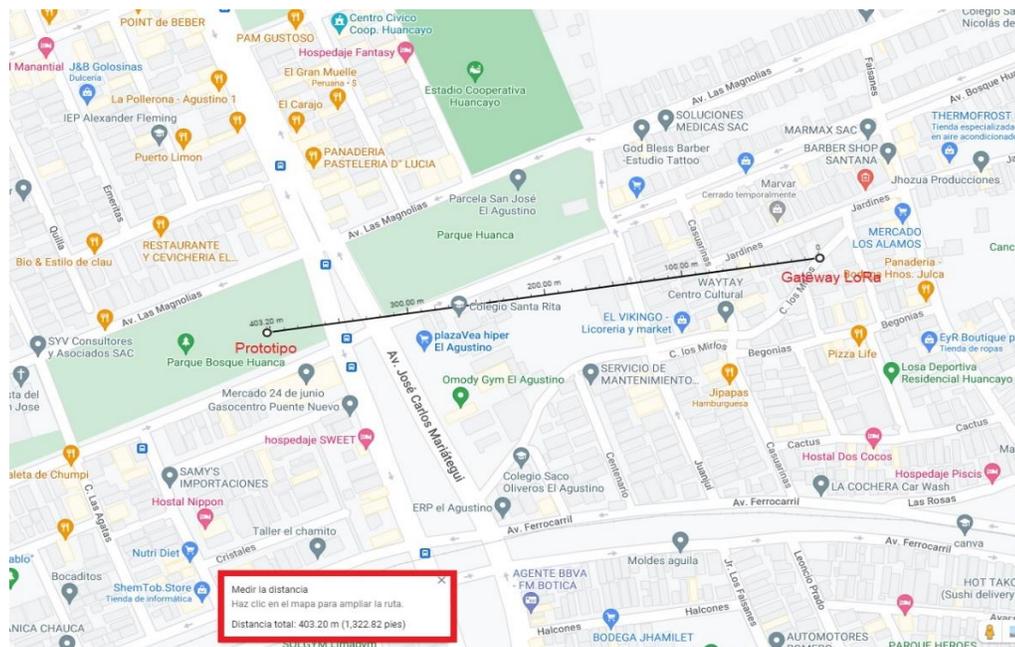
Tabla 13

Especificaciones técnicas en prueba 10

Parámetro	Gateway	Prototipo
Ubicación	Latitud: -12.03289	Latitud: -12.03342
	Longitud: -76.99532	Longitud: -76.99899
Altura	10 m (3er piso)	1 m (calle)
Cobertura	0 m	403,2 m
Potencia de transmisión	-	+16 dBm
Ganancia de la antena	2,3 dBi	2,3 dBi
Pérdidas en el cable	-	-
Frecuencia central	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz

Figura 142

Ubicación del prototipo respecto al gateway en prueba 10



Nota. Adaptado de “[Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 10]”, por Google, s.f.-m (<https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>).

Prueba 10.1: Configuramos el SF a 10

Figura 143

Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 10.1

↓ 15:23:31	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:38	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:38	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↓ 15:23:06	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:06	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:06	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↓ 15:22:54	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️

Prueba 10.2: Configuramos el SF a 9

Figura 144

Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 10.2

↓ 15:23:31	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:38	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:38	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↓ 15:23:06	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:06	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:06	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↓ 15:22:54	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️

Prueba 10.3: Configuramos el SF a 8

Figura 145

Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 10.3

↓ 15:23:31	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:38	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:38	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↓ 15:23:06	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:06	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↑ 15:23:06	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️
↓ 15:22:54	Schedule data downlink for transmis_	DevAddr: 26 0C AE 7E	↔	🗑️

Prueba 10.4: Configuramos el SF a 7

Figura 146

Sin trama LoRaWAN recibida en el gateway en prueba 10.4



4.3 Diseño del dashboard

4.3.1 Servidor de Alojamiento en Nube

4.3.1.1 Evaluación por Almacenamiento

El tipo de almacenamiento y los discos empleados por un proveedor de servicios de computación en la nube desempeñan un papel crucial, ya que tienen un impacto directo en el rendimiento.

Tabla 14

Matriz de selección de proveedor por almacenamiento

Criterio	GOOGLE CLOUD		AWS		AZURE	
	Descripción	Valor	Descripción	Valor	Descripción	Valor
Tipos de almacenamiento	Bloque y objetos	3	Bloque, archivo y objetos	2	Bloque y objetos	3
Tipos de Disco	Almacenamiento estándar (HDD), almacenamiento premium (SSD)	3	Almacenamiento estándar (HDD), almacenamiento premium (SSD)	3	Almacenamiento estándar (HDD), almacenamiento premium (SSD)	3

Tamaño máximo de almacenamiento	>=400TB de datos	2	>=500TB de datos	1	>=400TB de datos	2
Replicación	Redundancia incorporada	3	Redundancia incorporada	3	Redundancia incorporada	3
Archivado y Backup	Google Cloud Storage Nearline	3	Amazon Elastic File System (EFS)	3	Microsoft Azure Storage	2
Snapshots	Si	3	Si	3	Si	3
TOTAL		7		5		16

4.3.1.2 Evaluación por Infraestructura de Red

Google Cloud, AWS y Azure continúan utilizando y ampliando sus propias infraestructuras de red para conectar sus centros de datos distribuidos a nivel mundial.

Tabla 15

Matriz de selección de proveedor por infraestructura de red

	GOOGLE CLOUD		AWS		AZURE	
Criterio	Descripción	Valor	Descripción	Valor	Descripción	Valor
Equilibrio de carga	Equilibrio de la carga de la nube	3	Equilibrio de carga elástica	3	Equilibrador de carga Azure	3
CDN	Google Cloud CDN	3	Amazon CloudFront	3	Azure CDN	3
DNS	Cloud DNS	3	Amazon Route 53	3	Azure DNS	3

Interconexión dedicada	Interconexión de nubes	3	AWS Direct Connect	3	ExpressRoute	3
Redes Virtuales	Nube privada virtual	3	Amazon VPC	3	Azure VNet	3
Niveles	Niveles de servicio de la red	2	N/A	1	N/A	1
TOTAL		17		16		16

4.3.1.3 Evaluación por Costo

Los proveedores de servicios en la nube emplean varios modelos de facturación, cada uno con sus características y ventajas particulares. La elección del proveedor adecuado se realiza en función de las necesidades específicas del proyecto.

Tabla 16

Matriz de selección de proveedor por costo

	GOOGLE CLOUD		AWS		AZURE	
Criterio	Descripción	Valor	Descripción	Valor	Descripción	Valor
Soporte	Básico: Gratis Desarrollo: \$100 Producción: \$200 Premium: a Cotizar	3	Developer: Desde \$29 o 3% del consumo mensual Business: Desde \$100 o % del consumo mensual	1	Basic: Gratis Developer: \$28 Standard: \$ 96 Professional Direct: \$ 964	2

			Enterprise: Desde \$15000 o % del consumo mensual			
Modelo de suscripción	Compra por segundo, minuto, hora, día, mes o año	3	Compra por segundo, minuto, hora, día, mes o año	3	Compra por segundo, minuto, hora, día, mes o año	3
Costo mensual de 50 TB de almacenamiento	Pago por uso Uso general \$0.005/hora	3	S3 Infrequent: 50TB/mes \$ 0.004 por GB	1	Estándar: 50TB/mes \$ 0.010 por GB	1
Calculadora de Precios	Si	3	Si	3	Si	3
Horas de uso por tipo de instancia	Propósito general \$0.166/hora Optimización de la computación \$0.199/hora Memoria optimizada \$0.252/hora GPU \$0.9/hora	2	Propósito general \$0.150/hora Optimización de la computación \$0.167/hora Memoria optimizada \$0.166/hora GPU \$1.40/hora	2	Propósito general \$0.214/hora Optimización de la computación \$0.162/hora Memoria optimizada \$0.269/hora GPU \$2.4/hora	2

Modelo de Pago por uso	Pay-As-You-Go	3	Pay-As-You-Go	3	Pay-As-You-Go Costo exacto de uso de potencia de cómputo	3
Descuento	Uso Comprometido	2	Instancias Reservadas	2	Instancias Reservadas	2
TOTAL		19		15		16

Tabla 17
Matriz final de criterios de selección

		GOOGLE CLOUD		AWS		AZURE	
Categoría	Peso	Valor Total	Puntaje Obtenido	Valor Total	Puntaje Obtenido	Valor Total	Puntaje Obtenido
Almacenamiento	40 %	17	6,8	16	6,4	16	6,4
Networking	30 %	17	5,1	16	4,8	14	4,2
Coste	30 %	20	6,0	15	4,5	16	4,8
Total 100 %			17,9		15,7		15,4

Tras examinar los resultados en las matrices de criterios de evaluación de los proveedores de servicios en nube, se decide seleccionar Google Cloud, otorgándole un puntaje de 17,9.

4.3.2 Servidor de Base de Datos en Nube

Tabla 18

Cuadro comparativo de bases de datos

CARACTERÍSTICAS	ORACLE	MYSQL	SQL SERVER
Interfase	GUI, SQL	SQL	GUI, SQL, Otros
Lenguaje de programación	C, C#, C++, Java, Ruby, y Objective C	C, C#, C++, D, Java, Ruby, y Objective C	Java, Ruby, Python, VB, .Net, y PHP
Sistema Operativo	Windows, Linux, Solaris, entre otros	Windows, Linux, Solaris, OS X	Windows
Licencia	Propietario	Código Libre	Propietario

Asimismo, después de revisar los resultados en el cuadro comparativo de motores de bases de datos, se opta por MySQL debido a su distribución gratuita y su capacidad de instalarse en el sistema operativo Linux, que es de código abierto.

Figura 147

Servidor de base de datos en Google Cloud

The screenshot shows the Google Cloud console interface for 'My First Project'. The main content area is titled 'Instancias de VM' and includes a search bar and a list of actions: CREAR INSTANCIA, IMPORTAR VM, ACTUALIZAR, INICIAR/REANUDAR, DETENER, SUSPENDER, RESTABLECER, BORRAR, and CREAR PF. Below this, there is a section for 'INSTANCIAS' with a message about visibility and a table of VM instances. The table has columns for Estado, Nombre, Zona, Recomendaciones, En uso por, IP interna, IP externa, and Conectar. One instance is listed with the name 'garbage', zone 'us-central1-a', a recommendation to 'Ahorrar \$24/mes', internal IP '10.128.0.2', and external IP '34.171.255.220'. The 'Conectar' column shows 'SSH' and a dropdown menu.

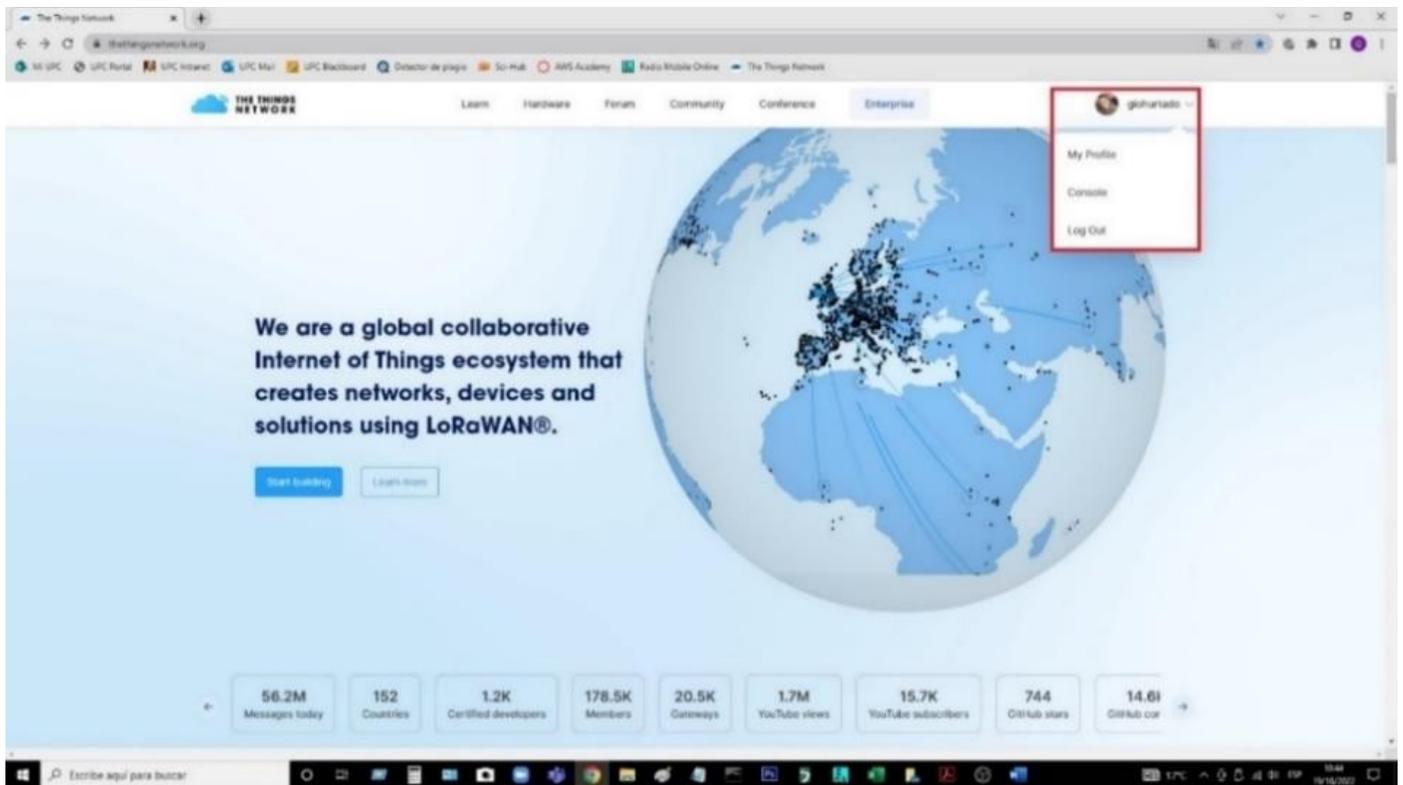
En cada envío de datos (uplink), estos se almacenan en una sola tabla que contiene diversos campos. A partir de la información cargada en la base de datos, se genera la información sobre cada uno de los contenedores que se encuentran dentro de la red LoRa, la misma que se utilizará con los algoritmos de selección de rutas para determinar la mejor ruta que deberá tomar el camión recolector durante el proceso de recolección.

4.3.3 Conexión a The Things Network (TTN)

Se ingresa a la consola mediante la URL <https://www.thethingsnetwork.org>, se selecciona la región, y se ingresan las credenciales registradas.

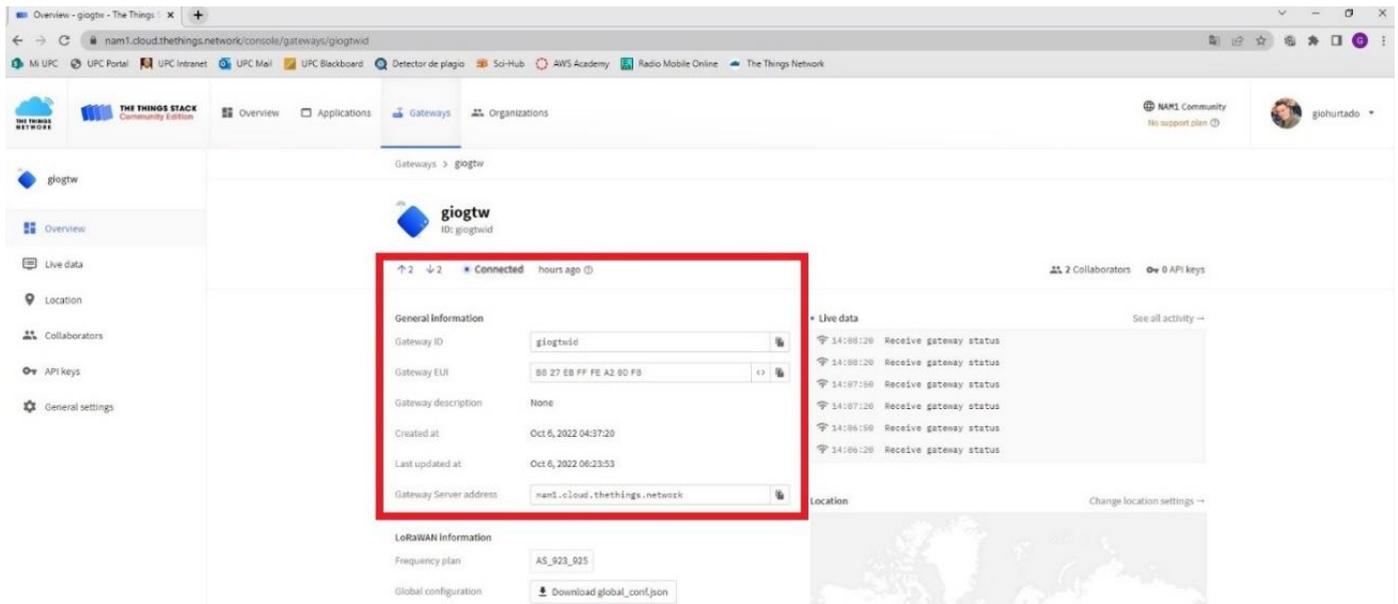
Figura 148

Plataforma de The Things Network



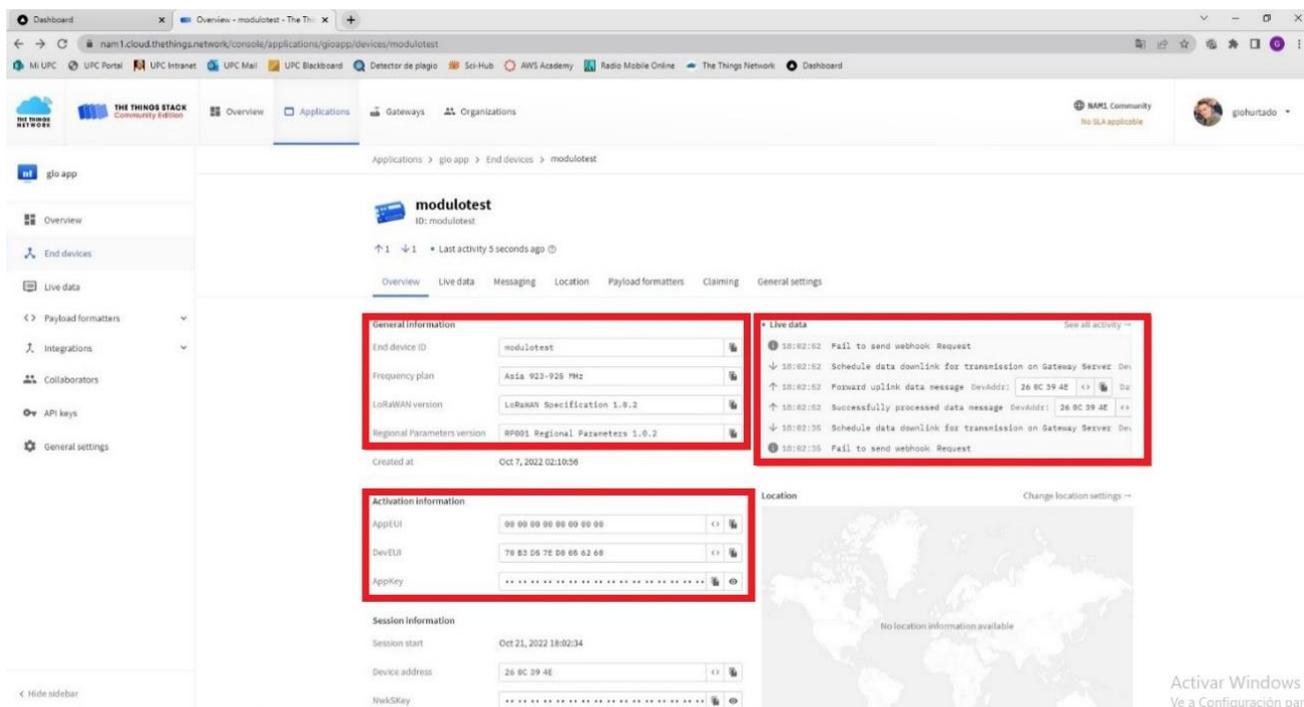
Luego, en la sección Ir a Gateways se encuentra el gateway LoRaWAN previamente registrado.

Figura 149
ID del gateway



Antes de la activación, las llaves AppEUI , DevEUI y AppKey entregadas por la consola, deben almacenarse en el prototipo para fines de identificación única a nivel global.

Figura 150
Llaves a almacenarse en el prototipo



4.3.4 Generación de la Ruta

Para la visualización de los datos obtenidos de los parámetros en los dispositivos usaremos un visualizador eficiente y de código abierto, que se integre fácilmente con la base de datos bajo entorno web. Para ello implementamos Google Maps Platform,

Figura 151

Muestra de programación de API

```
import React, { FC, useEffect, useState } from 'react';
import { GoogleMap, useJsApiLoader, DirectionsRenderer, Marker } from '@react-google-maps/api';
import { Container } from '../../interfaces';
import { calculateRoute, mapCenter, routeOrigin, greenDotIcon, redDotIcon, truckIcon } from '../../utils';

interface Props {
  containers: Container[];
}

export const Map: FC<Props> = ({ containers = [] }) => {

  const [direction, setDirection] = useState<google.maps.DirectionsResult | null>(null);

  // Calculate the best route every time the ws containers data changes
  useEffect(() => {
    if (!isLoading) return;
    const getDirections = async() => {
      setDirection(await calculateRoute(containers, routeOrigin));
    }
    getDirections();
  }, [containers]);

  // Connection with Google Maps API service, Return if the app is connected.
  const { isLoading } = useJsApiLoader({
    googleMapsApiKey: process.env.NEXT_PUBLIC_MAPS_API_KEY!,
  });

  // If not connected to Google Maps API service, then return other render
  if (!isLoading) return <</>;

  return (
    <>
      <GoogleMap
        center={ mapCenter }
        zoom={ 15 }
        mapContainerStyle={ { width: '100%', height: '100%' } }
      />
    </>
  );
};
```

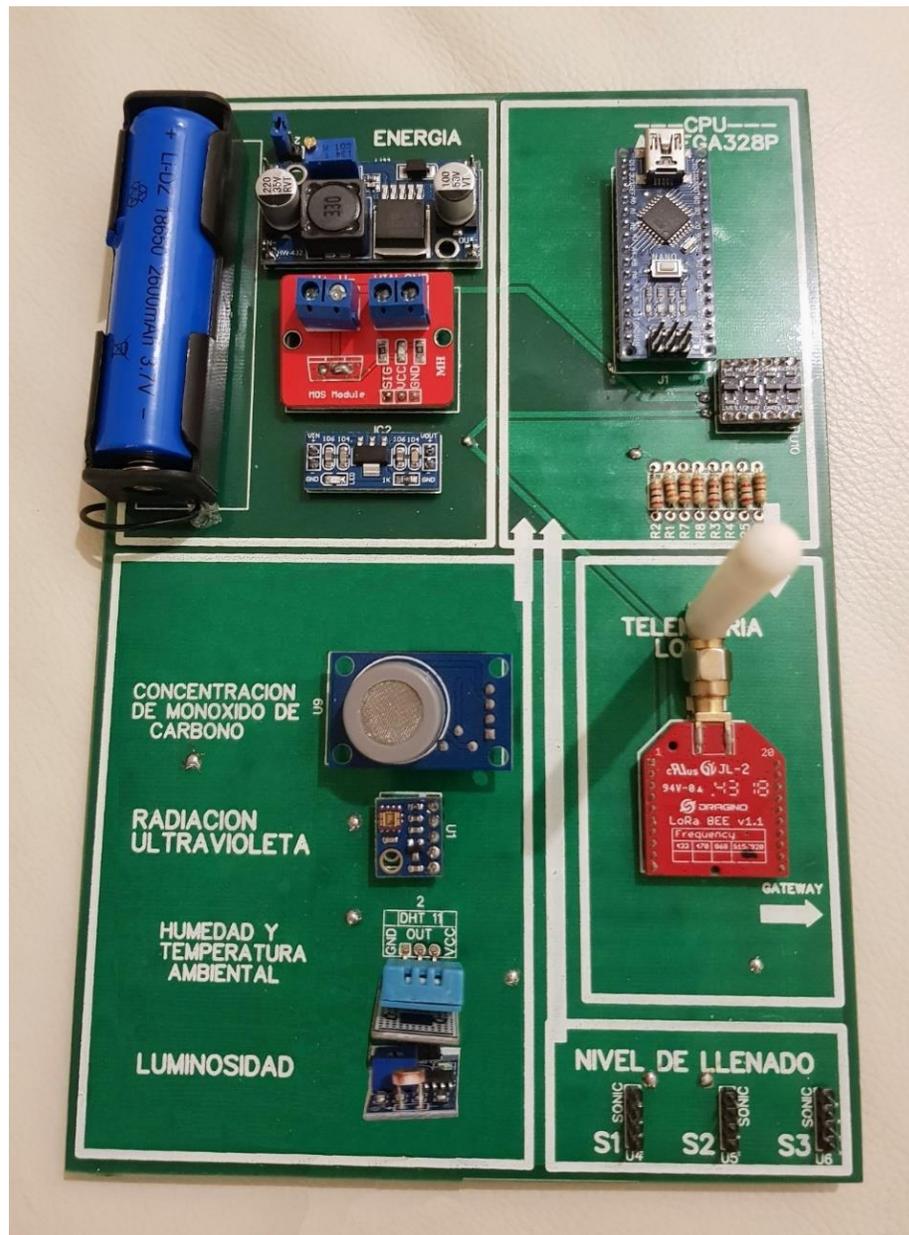
5. CAPÍTULO V:

5.1 Resultados de Calibración del Sensor de Nivel de Llenado

El resultado final es un prototipo el cual tiene instalado sensores que miden el nivel de llenado de los contenedores de basura; así como, de los diversos parámetros ambientales como: polución, humedad, temperatura, luminosidad y radiación solar.

Figura 152

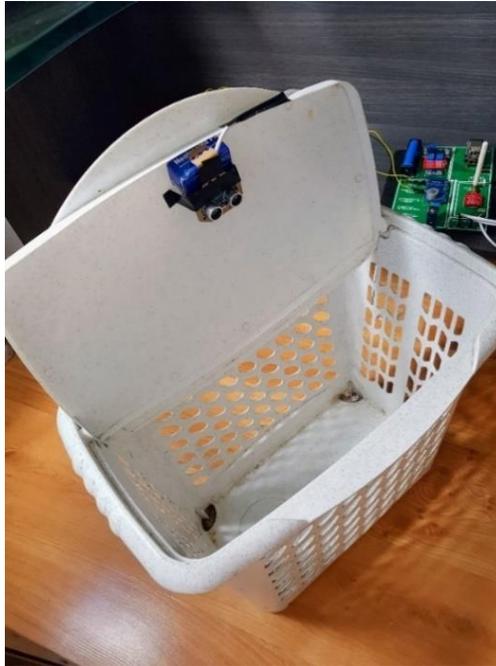
Prototipo de transmisión LoRa



La ubicación del prototipo es fuera del contenedor, pero el sensor de ultrasonido estará debajo de la tapa del contenedor. Para ello, se simula un contenedor de basura con una altura aprox. de 1,2 m, el cual iremos incrementando o decrementando su capacidad.

Figura 153

Contenedor de basura simulado



Se demuestra que el prototipo tiene total autonomía a la red eléctrica, para ello cuenta con una batería de litio recargable de 3.7 V.

Figura 154

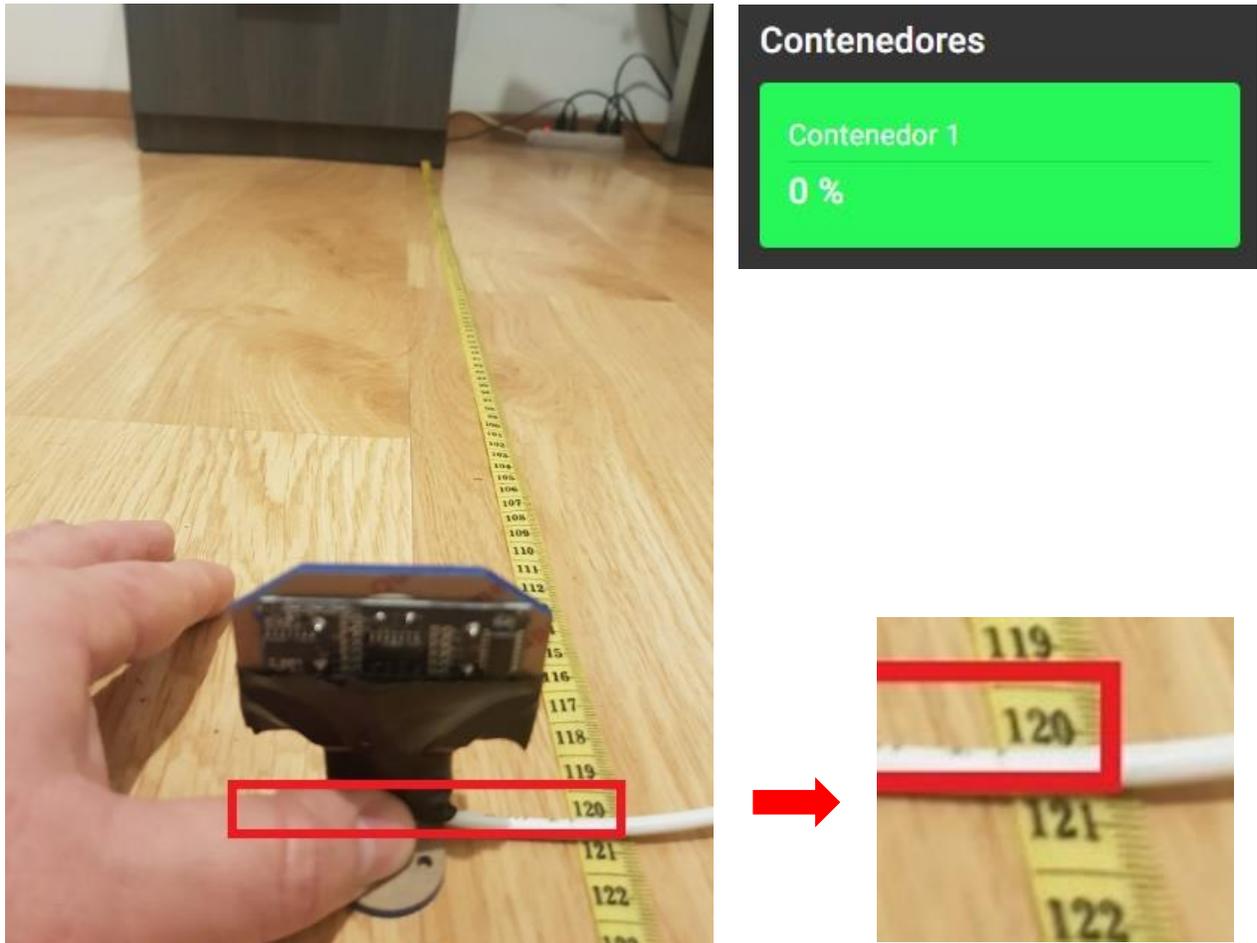
Etapa de energía con batería autónoma



Se demuestra que los sensores ultrasónicos están calibrados a 1,2 m (0 % capacidad = contenedor vacío). Para las pruebas en el dashboard, se muestra el porcentaje de capacidad y el ícono es **verde**.

Figura 155

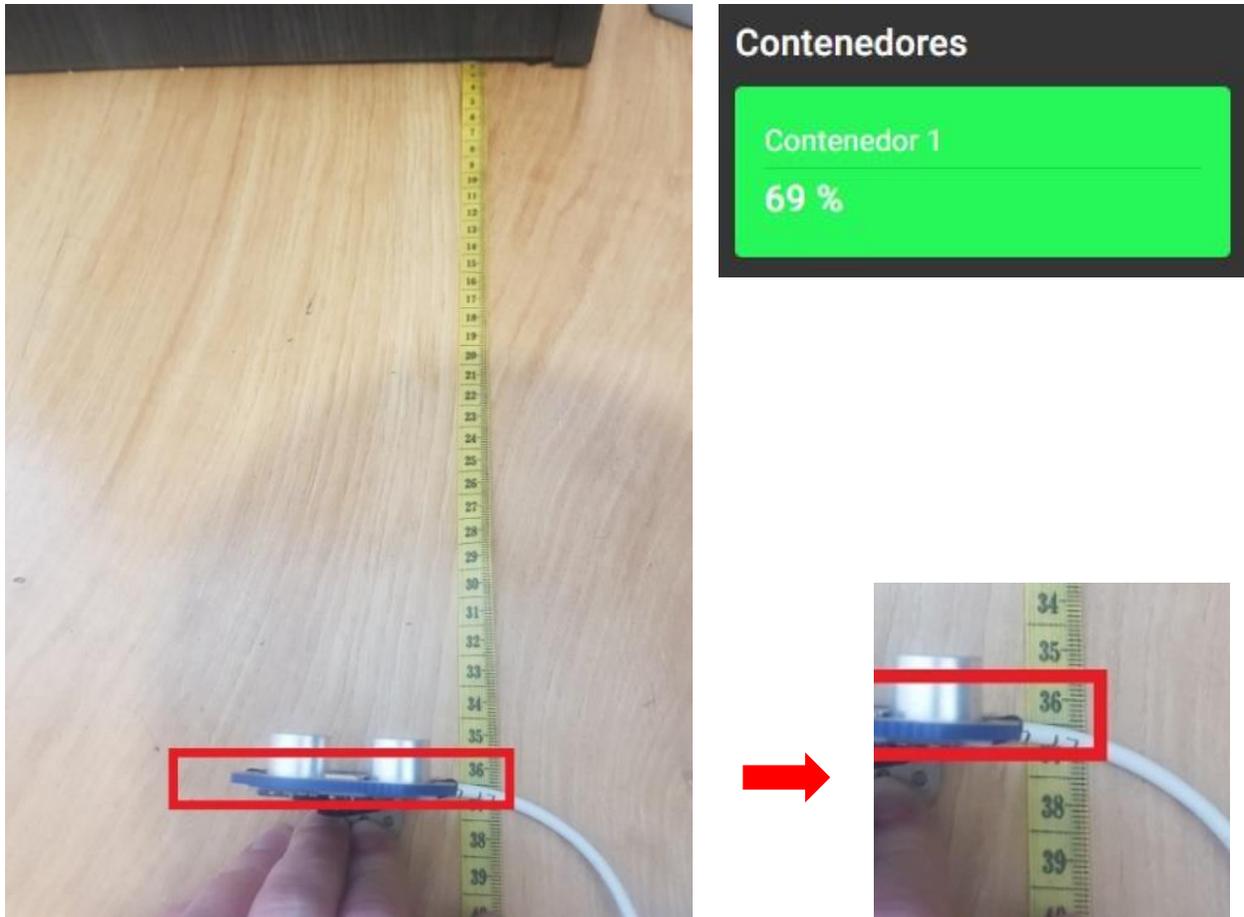
Resultado de simulación de un contenedor vacío de 1,2 m



Si el nivel de llenado es menor al 70 % de su capacidad (0,84 m lleno; 0,36 m vacío), se muestra el porcentaje de capacidad y el ícono es verde.

Figura 156

Resultado de simulación de un contenedor casi lleno



Si el nivel de llenado es igual o mayor al 70 % de la capacidad (0,85 m lleno, 0,35 m vacío), se muestra el porcentaje de capacidad y el ícono es rojo.

Figura 157

Resultado de simulación de un contenedor lleno



5.2 Resultados de Comparativas de las Pruebas de Envío de Información

Comparativas de Prueba 1: Prototipo a 25,05 m del gateway

Tabla 19

Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 25,05 m

Parámetro	Prueba 1.1	Prueba 1.2	Prueba 1.3	Prueba 1.4
Nivel de recepción	-53 dBm	-57 dBm	-54 dBm	-57 dBm
SNR	5,8 dB	13 dB	8,2 dB	7,5 dB
Canal de transmisión	4	6	7	2
Frecuencia de canal	924 000 000 Hz	924 400 000 Hz	924 600 000 Hz	923 600 000 Hz
Ancho de banda de canal	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz
Factor de ensanchamiento	SF10	SF9	SF8	SF7
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	4/5

Referencia: Se considera que un enlace de radio para LoRaWAN es estable cuando $RSSI > -115$ dB y $SNR > -7$ dB. Por otro lado, se considera que no es estable cuando $RSSI \leq -120$ dB o $SNR \leq -13$ dB, lo que significa que el dispositivo probablemente esté lejos del gateway.

Resultado: En la prueba 1, con SF10 al SF7, a 25,05 m, y a línea de vista; los valores en la trama LoRaWAN que llegaron al gateway permiten considerar que es un enlace de radio estable.

Comparativas de Prueba 2: Prototipo a 73,8 m del gateway

Tabla 20

Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 73,8 m

Parámetro	Prueba 2.1	Prueba 2.2	Prueba 2.3	Prueba 2.4
Nivel de recepción	-70 dBm	-72 dBm	-71 dBm	-71 dBm
SNR	11 dB	12 dB	11,2 dB	9,5 dB
Canal de transmisión	1	4	6	3
Frecuencia de canal	923 400 000 Hz	924 000 000 Hz	924 400 000 Hz	923 800 000 Hz
Ancho de banda de canal	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz
Factor de ensanchamiento	SF10	SF9	SF8	SF7
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	4/5

Referencia: Se considera que un enlace de radio para LoRaWAN es estable cuando $RSSI > -115$ dB y $SNR > -7$ dB. Por otro lado, se considera que no es estable cuando $RSSI \leq -120$ dB o $SNR \leq -13$ dB, lo que significa que el dispositivo probablemente esté lejos del gateway.

Resultado: En la prueba 2, con SF10 al SF7, a 73,8 m, y con algunas paredes de obstrucción; los valores en la trama LoRaWAN que llegaron al gateway permiten considerar que es un enlace de radio estable.

Comparativas de Prueba 3: Prototipo a 135,93 m del gateway

Tabla 21

Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 135,93 m

Parámetro	Prueba 3.1	Prueba 3.2	Prueba 3.3	Prueba 3.4
Nivel de recepción	-91 dBm	-91 dBm	-91 dBm	-89 dBm
SNR	7,8 dB	12,5 dB	10,8 dB	9 dB
Canal de transmisión	4	6	1	4
Frecuencia de canal	924 000 000 Hz	924 400 000 Hz	923 400 000 Hz	924 000 000 Hz
Ancho de banda de canal	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz
Factor de ensanchamiento	SF10	SF9	SF8	SF7
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	4/5

Referencia: Se considera que un enlace de radio para LoRaWAN es estable cuando $RSSI > -115$ dB y $SNR > -7$ dB. Por otro lado, se considera que no es estable cuando $RSSI \leq -120$ dB o $SNR \leq -13$ dB, lo que significa que el dispositivo probablemente esté lejos del gateway.

Resultado: En la prueba 3, con SF10 al SF7, a 135,93 m, y con varias paredes de obstrucción; los valores en la trama LoRaWAN que llegaron al gateway permiten considerar que es un enlace de radio estable.

Comparativas de Prueba 4: Prototipo a 148,41 m del gateway

Tabla 22

Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 148,41 m

Parámetro	Prueba 4.1	Prueba 4.2	Prueba 4.3	Prueba 4.4
Nivel de recepción	-109 dBm	-113 dBm	-109 dBm	-112 dBm
SNR	-3,2 dB	-5 dB	-6 dB	-3 dB
Canal de transmisión	3	5	6	5
Frecuencia de canal	923 800 000 Hz	924 200 000 Hz	924 400 000 Hz	924 200 000 Hz
Ancho de banda de canal	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz
Factor de ensanchamiento	SF10	SF9	SF8	SF7
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	4/5

Referencia: Se considera que un enlace de radio para LoRaWAN es estable cuando $RSSI > -115$ dB y $SNR > -7$ dB. Por otro lado, se considera que no es estable cuando $RSSI \leq -120$ dB o $SNR \leq -13$ dB, lo que significa que el dispositivo probablemente esté lejos del gateway.

Resultado: En la prueba 4, con SF10 al SF7, a 148,41 m, y con más paredes de obstrucción; los valores en la trama LoRaWAN que llegaron al gateway permiten considerar que es un enlace de radio estable.

Comparativas de Prueba 5: Prototipo a 238,63 m del gateway

Tabla 23

Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 238,63 m

Parámetro	Prueba 5.1	Prueba 5.2	Prueba 5.3	Prueba 5.4
Nivel de recepción	-109 dBm	-109 dBm	-109 dBm	-109 dBm
SNR	-4,5 dB	-8,5 dB	-6 dB	-5,8 dB
Canal de transmisión	6	1	2	2
Frecuencia de canal	924 400 000 Hz	923 400 000 Hz	923 600 000 Hz	923 600 000 Hz
Ancho de banda de canal	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz
Factor de ensanchamiento	SF10	SF9	SF8	SF7
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	4/5

Referencia: Se considera que un enlace de radio para LoRaWAN es estable cuando $RSSI > -115$ dB y $SNR > -7$ dB. Por otro lado, se considera que no es estable cuando $RSSI \leq -120$ dB o $SNR \leq -13$ dB, lo que significa que el dispositivo probablemente esté lejos del gateway.

Resultado: En la prueba 5, con SF10 al SF7, a 238,63 m, y con igual número de obstrucciones que en la prueba 4; los valores en la trama LoRaWAN que llegaron al gateway permiten considerar que es un enlace de radio estable.

Comparativas de Prueba 6: Prototipo a 321,71 m del gateway

Tabla 24

Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 321,71 m

Parámetro	Prueba 6.1	Prueba 6.2	Prueba 6.3	Prueba 6.4
Nivel de recepción	-109 dBm	NR	NR	NR
SNR	-12,8 dB	NR	NR	NR
Canal de transmisión	2	NR	NR	NR
Frecuencia de canal	923 600 000 Hz	NR	NR	NR
Ancho de banda de canal	125 000 Hz	NR	NR	NR
Factor de ensanchamiento	SF10	NR	NR	NR
Tasa de codificación	4/5	NR	NR	NR

Referencia: Se considera que un enlace de radio para LoRaWAN es estable cuando $RSSI > -115$ dB y $SNR > -7$ dB. Por otro lado, se considera que no es estable cuando $RSSI \leq -120$ dB o $SNR \leq -13$ dB, lo que significa que el dispositivo probablemente esté lejos del gateway.

Resultado: En la prueba 6, con SF10 al SF7, a 321,71 m, y con más paredes de obstrucción; los valores en la trama LoRaWAN indican que sólo hay enlace de radio estable para SF10.

Comparativas de Prueba 7: Prototipo a 217,35 m del gateway

Tabla 25

Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 217,35 m

Parámetro	Prueba 7.1	Prueba 7.2	Prueba 7.3	Prueba 7.4
Nivel de recepción	-111 dBm	-114 dBm	-112 dBm	-113 dBm
SNR	-7 dB	-3,2 dB	-2,5 dB	-5,5 dB
Canal de transmisión	3	5	5	1
Frecuencia de canal	923 400 000 Hz	924 200 000 Hz	924 200 000 Hz	923 800 000 Hz
Ancho de banda de canal	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz
Factor de ensanchamiento	SF10	SF9	SF8	SF7
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	4/5

Referencia: Se considera que un enlace de radio para LoRaWAN es estable cuando $RSSI > -115 \text{ dB}$ y $SNR > -7 \text{ dB}$. Por otro lado, se considera que no es estable cuando $RSSI \leq -120 \text{ dB}$ o $SNR \leq -13 \text{ dB}$, lo que significa que el dispositivo probablemente esté lejos del gateway.

Resultado: En la prueba 7, con SF10 al SF7, a 217,35 m, con reemplazo de una antena por otra de mayor ganancia, y con casi igual número de obstrucciones que en la prueba 5; los valores en la trama LoRaWAN que llegaron al gateway permiten considerar que es un enlace de radio estable.

Comparativas de Prueba 8: Prototipo a 321,71 m del gateway

Tabla 26

Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 321,71 m

Parámetro	Prueba 8.1	Prueba 8.2	Prueba 8.3	Prueba 8.4
Nivel de recepción	-114 dBm	-113 dBm	-112 dBm	NR
SNR	-5,8 dB	-6 dB	-6,8 dB	NR
Canal de transmisión	6	1	6	NR
Frecuencia de canal	924 400 000 Hz	923 400 000 Hz	924 400 000 Hz	NR
Ancho de banda de canal	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz	NR
Factor de ensanchamiento	SF10	SF9	SF8	NR
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	NR

Referencia: Se considera que un enlace de radio para LoRaWAN es estable cuando $RSSI > -115 \text{ dB}$ y $SNR > -7 \text{ dB}$. Por otro lado, se considera que no es estable cuando $RSSI \leq -120 \text{ dB}$ o $SNR \leq -13 \text{ dB}$, lo que significa que el dispositivo probablemente esté lejos del gateway.

Resultado: En la prueba 8, con SF10 al SF7, a 321,71 m, con reemplazo de una antena por otra de mayor ganancia, y con igual número de obstrucciones que en la prueba 6, en la que sólo había enlace de radio estable para SF10; los valores en la trama LoRaWAN que llegaron al gateway permiten considerar que es un enlace de radio estable para los SF10, SF9 y SF8.

Comparativas de Prueba 9: Prototipo a **394,77 m** del gateway

Tabla 27

Comparación de valores en la trama LoRaWAN a 394,77 m

Parámetro	Prueba 9.1	Prueba 9.2	Prueba 9.3	Prueba 9.4
Nivel de recepción	-114 dBm	-113 dBm	-112 dBm	NR
SNR	-10,2 dB	-3,5 dB	-4 dB	NR
Canal de transmisión	5	1	6	NR
Frecuencia de canal	924 200 000 Hz	923 400 000 Hz	924 400 000 Hz	NR
Ancho de banda de canal	125 000 Hz	125 000 Hz	125 000 Hz	NR
Factor de ensanchamiento	SF10	SF9	SF8	NR
Tasa de codificación	4/5	4/5	4/5	NR

Referencia: Se considera que un enlace de radio para LoRaWAN es estable cuando $RSSI > -115 \text{ dB}$ y $SNR > -7 \text{ dB}$. Por otro lado, se considera que no es estable cuando $RSSI \leq -120 \text{ dB}$ o $SNR \leq -13 \text{ dB}$, lo que significa que el dispositivo esté lejos del gateway.

Resultado: En la prueba 9, con SF10 al SF7, a 394,77 m, con reemplazo de una antena por otra de mayor ganancia, y con mayor número de obstrucciones; los valores en la trama LoRaWAN que llegaron al gateway permiten considerar que es un enlace de radio estable para los SF10, SF9 y SF8.

Comparativas de Prueba 10: Prototipo a **403,2 m** del gateway

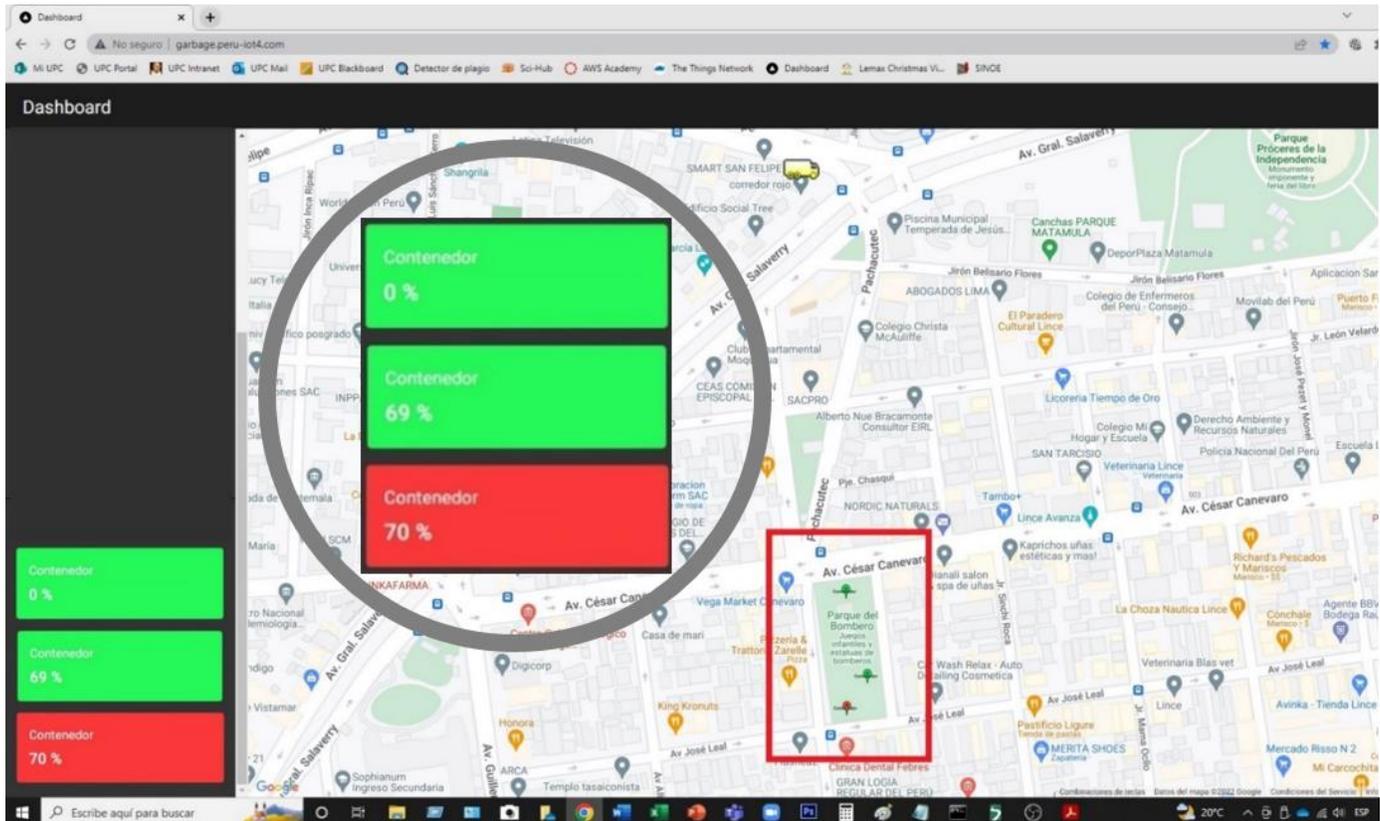
Resultado: En la prueba 10, con SF10 al SF7, a 403,2 m, con reemplazo de una antena por otra de mayor ganancia, y con mayor número de obstrucciones; no se establece enlace de radio.

5.3 Resultados del Monitoreo de la Información Enviada y Trazado de la Ruta Óptima

5.3.1 Medición de Nivel de Llenado

Figura 158

Monitoreo del nivel de llenado en el dashboard



Resultado:

Se visualiza que un contenedor de basura está vacío (0 % capacidad = contenedor vacío). En el dashboard, se muestra el porcentaje de capacidad y el ícono es **verde**.

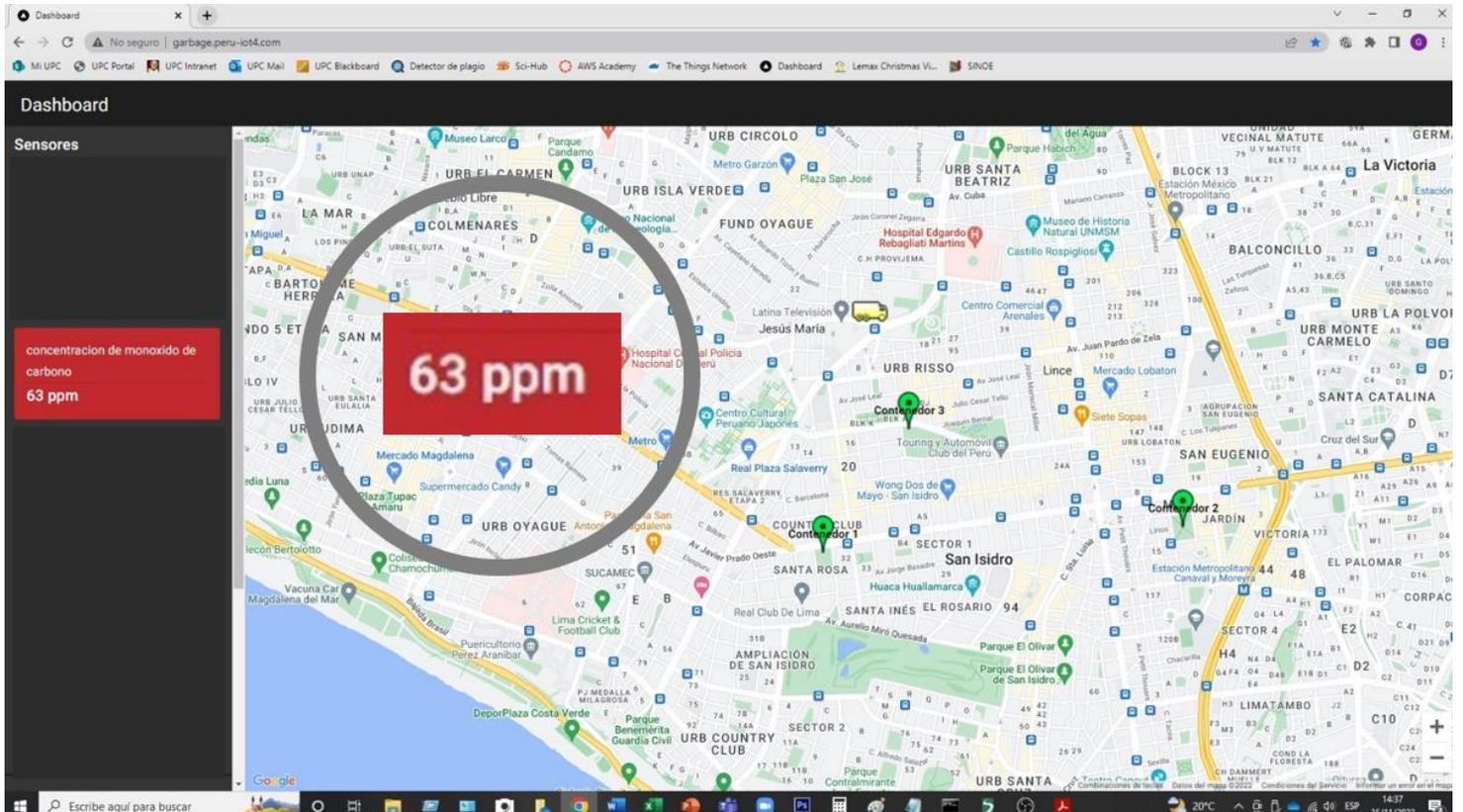
Se visualiza que un contenedor de basura está casi al 70 % de su capacidad (0,84 m lleno; 0,36 m vacío), se muestra el porcentaje de capacidad y el ícono es **verde**.

Se visualiza que un contenedor de basura está lleno, ya que el contenido es igual o mayor al 70 % de su capacidad (0,85 m lleno, 0,35 m vacío), se muestra el porcentaje de capacidad y el ícono es **rojo**.

5.3.2 Medición de Polución Ambiental

Figura 159

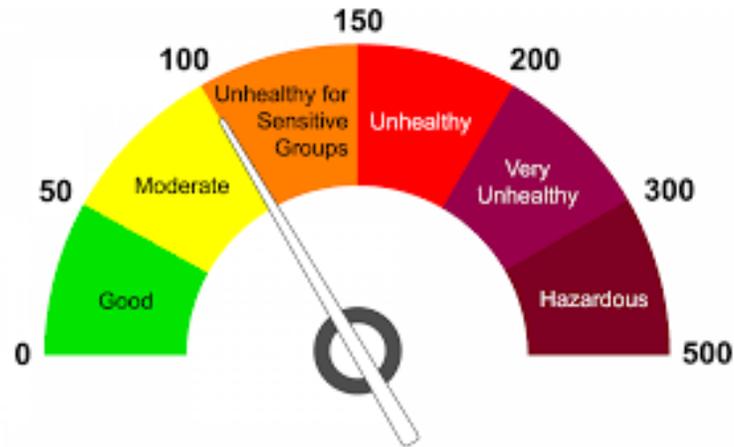
Monitoreo de la polución ambiental en el dashboard



Referencia: La calidad del aire se evalúa mediante un índice que se expresa en partes por millón (ppm) en una escala que abarca desde 0 hasta 500, definiendo seis niveles de riesgo. Cuanto mayor sea el valor del índice, peor será la calidad del aire. En el Perú, se ha implementado el índice de calidad del aire siguiendo las directrices técnicas establecidas por la Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality.

Figura 160

Índice de calidad del aire



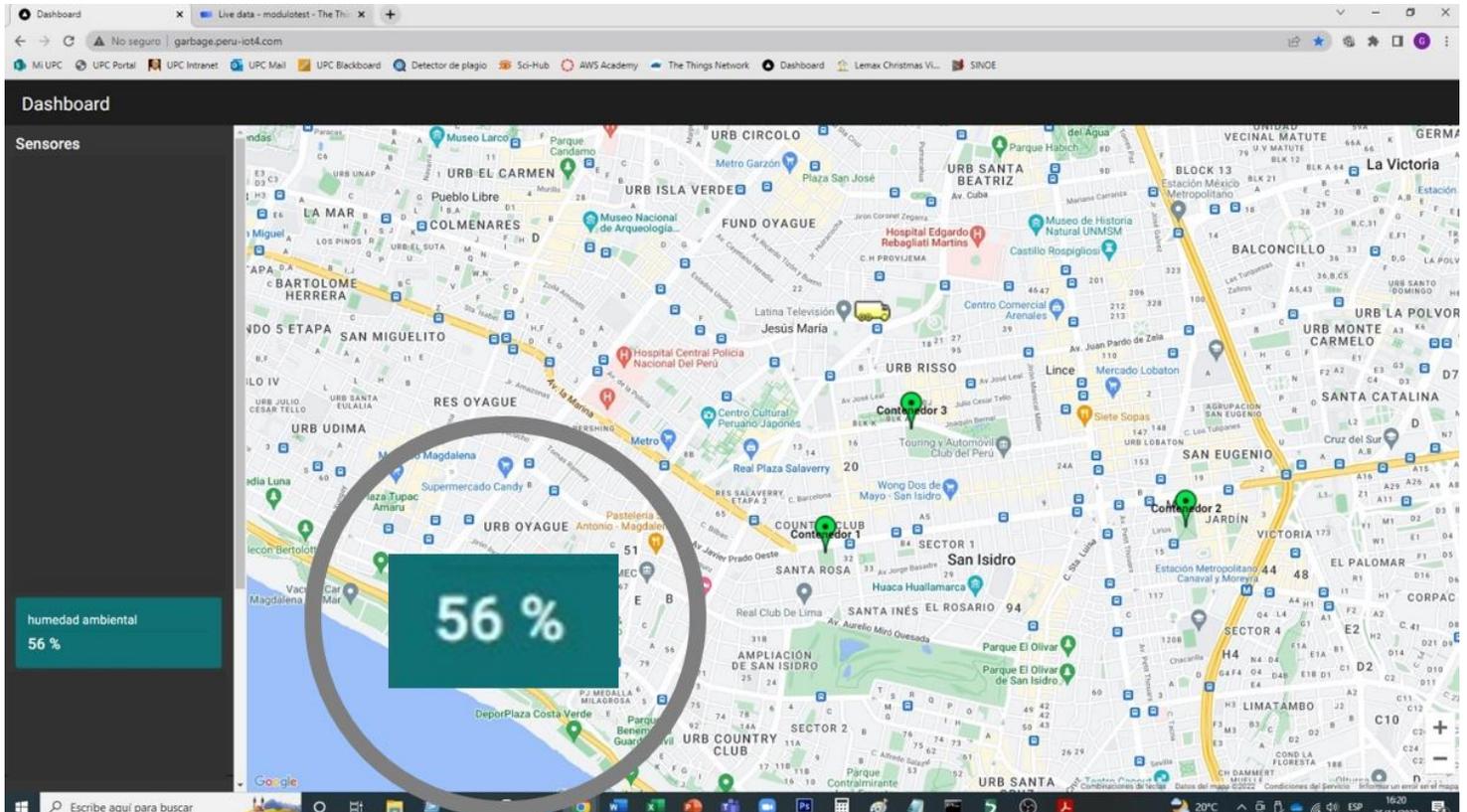
Nota. De "Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)", por Airnow, 2018 (<https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf>).

Resultado: La medición del índice de contaminación ambiental indica una concentración de monóxido de 63 ppm; por lo tanto, comparando este valor con el índice de calidad del aire (ICA) tenemos una calidad de aire aceptable.

5.3.3 Medición de Humedad Ambiental

Figura 161

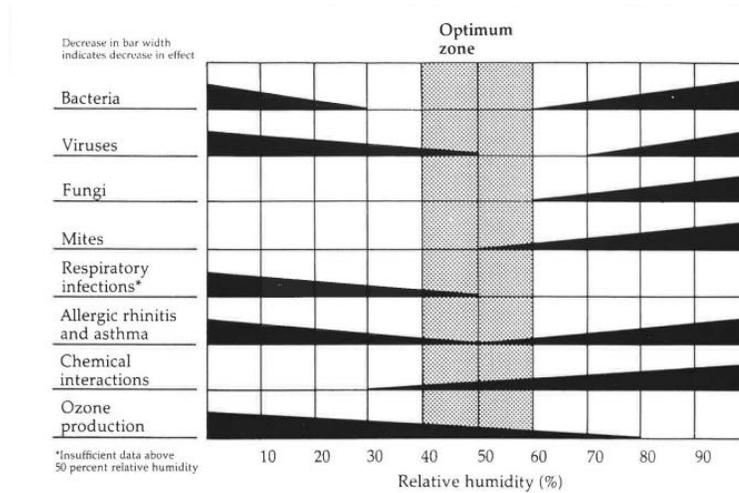
Monitoreo de la humedad ambiental en el dashboard



Referencia: La humedad relativa se refiere al porcentaje de vapor de agua contenido en el aire. Cuando la humedad relativa es del 0%, esto indica que el aire carece por completo de humedad, mientras que un valor del 100% sugiere que el aire está saturado de humedad y que podría comenzar a condensar en forma de niebla o rocío. Según la Air Infiltration and Ventilation Centre (2023), el rango de humedad relativa óptima es de 40 % a 60 % para una temperatura de 20 °C a 25 °C.

Figura 162

Rango óptimo de humedad relativa



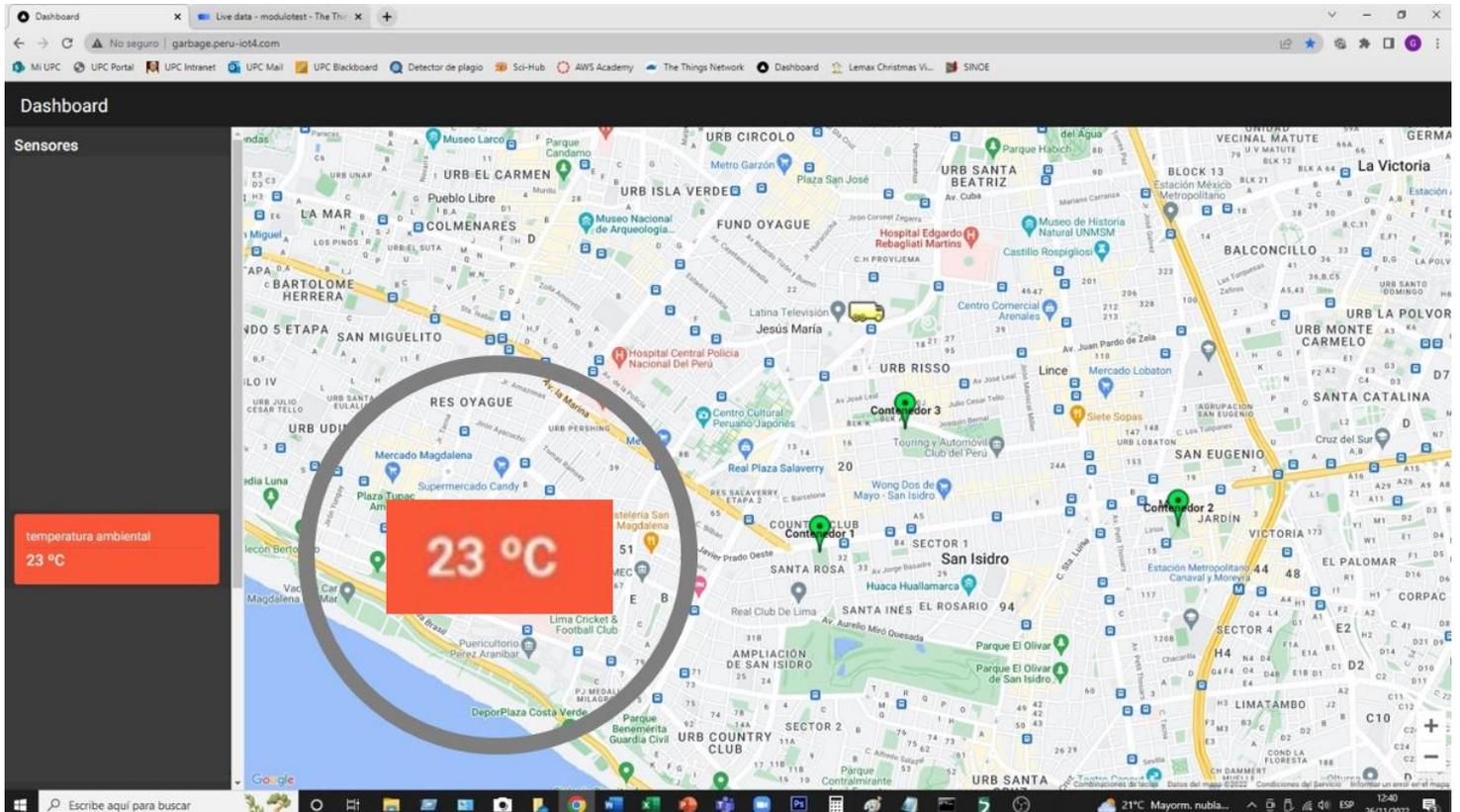
Nota. De "Relative humidity: What is acceptable?", por Air Infiltration and Ventilation Centre, 1988 (https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_3401.pdf).

Resultado: La medición de humedad ambiental indica que el porcentaje de humedad relativa es del 56 %; por lo tanto, comparando este valor con el rango señalado por AIVC, se tiene una humedad relativa dentro de la zona de confort.

5.3.4 Medición de Temperatura Ambiental

Figura 163

Monitoreo de la temperatura ambiental en el dashboard



Referencia: Los puntos de referencia principales de la escala Celsius son el punto de congelación del agua: 0 °C y el punto de ebullición del agua: 100 °C. Según el Instituto Geofísico del Perú (2023), la temperatura del ambiente que se considera confortable está en el rango de 20 °C a 25 °C, y su criterio de clasificación climática es la siguiente:

Figura 164*Criterio de clasificación climática*

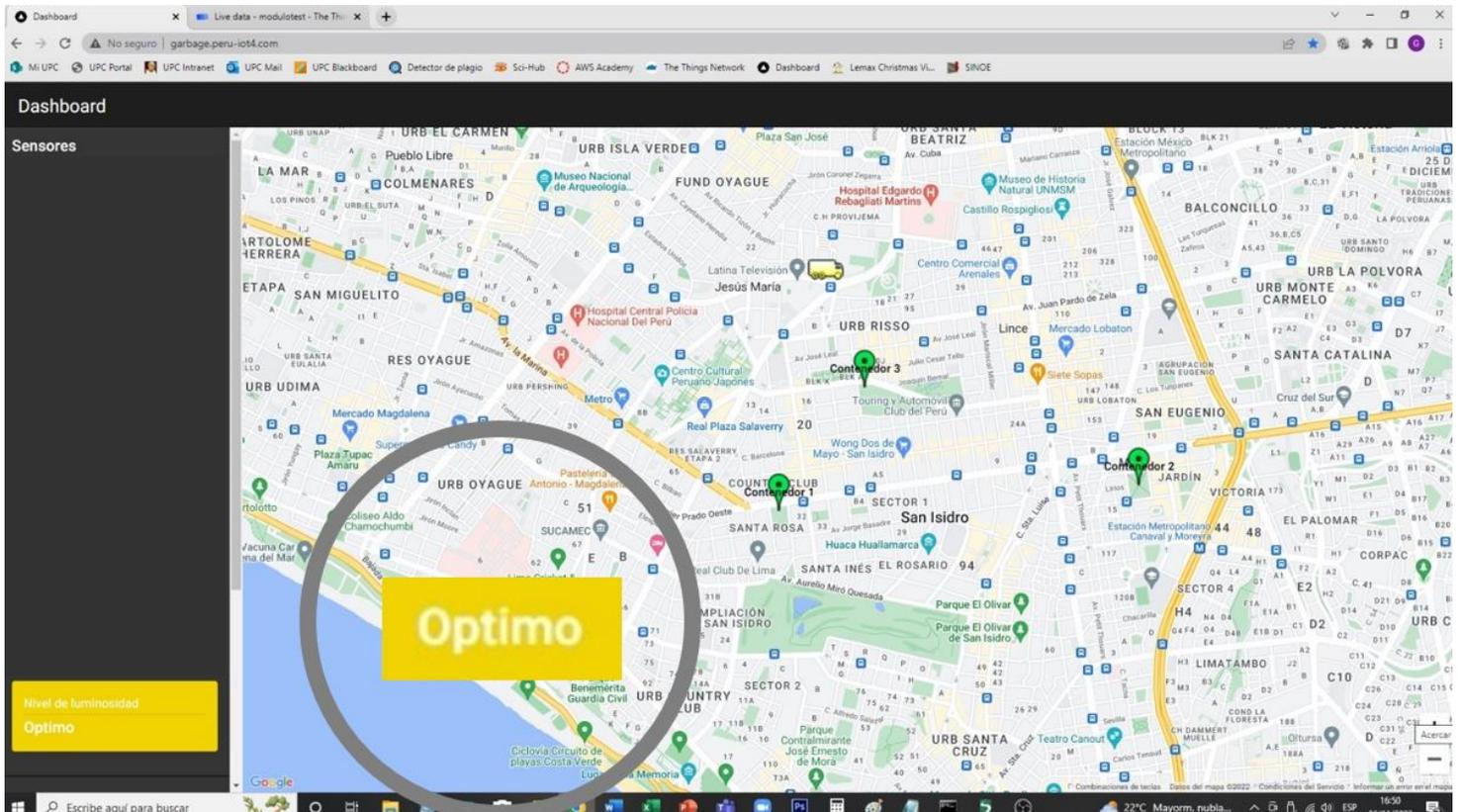
Por temperatura	
Muy frío	Temperatura media anual inferior a 0°C.
Frío	Temperatura media anual entre 0 y 10°C.
Templado	Temperatura media anual entre 10 y 20°C.
Cálido	Temperatura media anual entre 20 y 25°C.
Muy cálido	Temperatura media anual superior a 25°C.

Nota. De "Criterio de clasificación climática", por Instituto Geofísico del Perú, 2023

(<http://met.igp.gob.pe/clima/clasif.html>).

Resultado: La medición de temperatura ambiental indica 23 °C; por lo tanto, comparando este valor con el rango proporcionado por el criterio de clasificación climática del IGP, tenemos una temperatura cálida.5.3.5 Medición de Luminosidad Ambiental

Figura 165
Monitoreo de la luminosidad ambiental en el dashboard



Referencia: El alumbrado general de vías peatonales, como las que están dentro de un parque, deberá conllevar una iluminación media equivalente a 5 lx, el cual se considera como óptimo; en caso sea menor a dicho umbral, se considera como bajo/averiado. Respecto a las reglas de alumbrado de vías públicas, el Ministerio de Energía y Minas (2003), señala los siguientes niveles de iluminancia:

Figura 166*Niveles de iluminancia*

Tipo de alumbrado	Luminancia media revestimiento seco (cd/m2)	Iluminancia media (lux)		Indice de control de deslumbramiento (G)
		Calzada clara	Calzada oscura	
I	1,5 – 2,0	15 – 20	30 – 40	≥ 6
II	1,0 – 2,0	10 – 20	20 – 40	5 - 6
III	0,5 – 1,0	5 – 10	10 – 20	5 - 6
IV		2 – 5	5 – 10	4 - 5
V		1 – 3	2 – 6	4 - 5

En caso de vías exclusivamente peatonales, deberá considerarse un nivel de iluminancia media equivalente al tipo de alumbrado V.

Nota. De "Norma Técnica DGE: Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución", por Ministerio de Energía y Minas, 2003

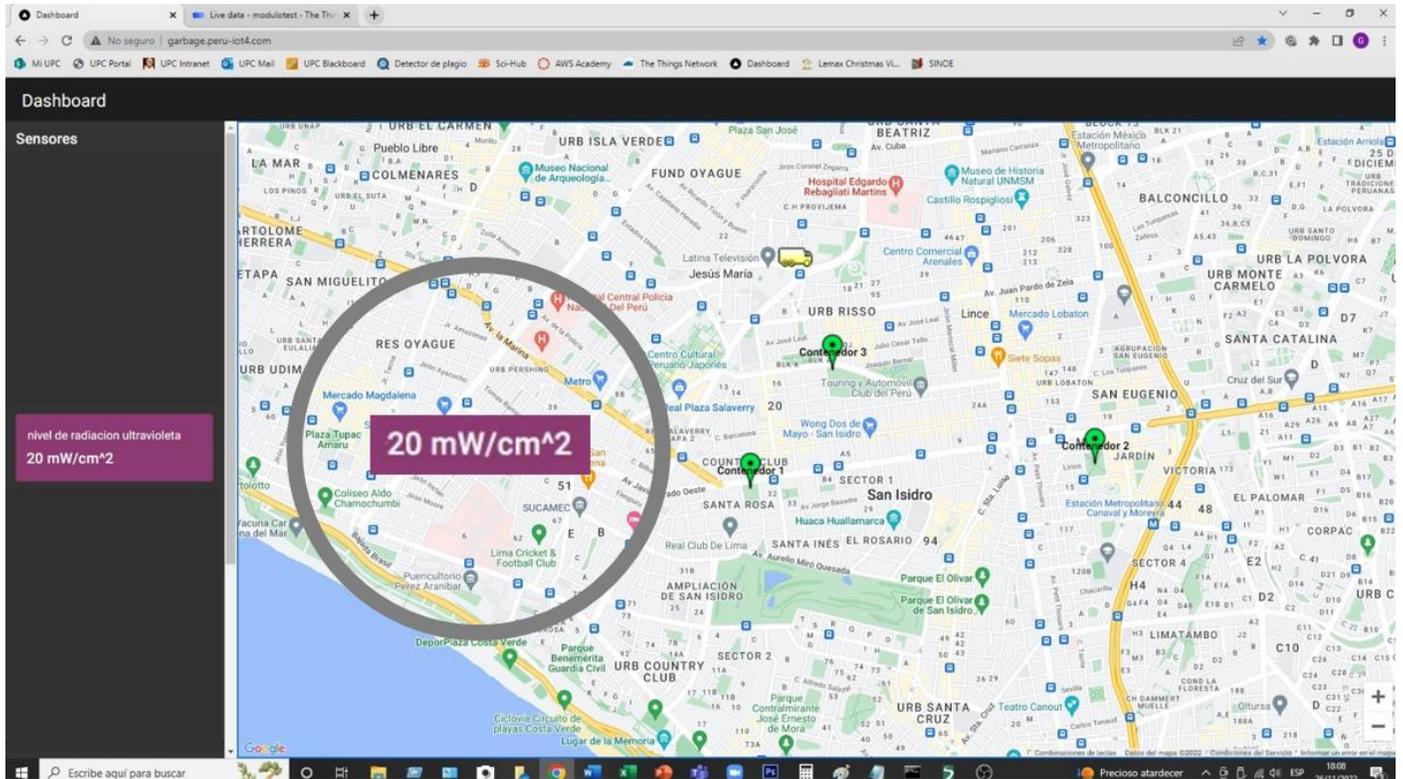
(https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/95576/RM_013_2003_DM.pdf).

Resultado: La medición de la iluminación ambiental indica un estado de óptimo, lo que quiere decir que es ≥ 5 lx tal como lo señala OSINERGMIN; por lo que tenemos una iluminación óptima.

5.3.6 Medición de Radiación Solar

Figura 167

Monitoreo de la radiación solar en el dashboard



Referencia: El índice de radiación ultravioleta (UV) es una medida que indica la intensidad de la radiación UV y su relación con el riesgo para la salud. Se clasifica en una escala que va del 1 al 11+, donde valores más altos indican un mayor riesgo de exposición a los rayos UV. En el Perú, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú informa, contantemente, los niveles de radiación ultravioleta UV que afectan a la ciudadanía.

Figura 168*Categorías de exposición a la radiación UV*

ÍNDICE UV		Potencia mW/cm ²
BAJO	1	2.78
	2	5.57
MEDIO	3	8.35
	4	11.1
	5	13.9
ALTO	6	16.7
	7	19.5
MUY ALTO	8	22.2
	9	25.0
	10	27.8
EXTREMO	11	30.5
	12	33.3
	13	36.1
	14	38.9
	15	41.7

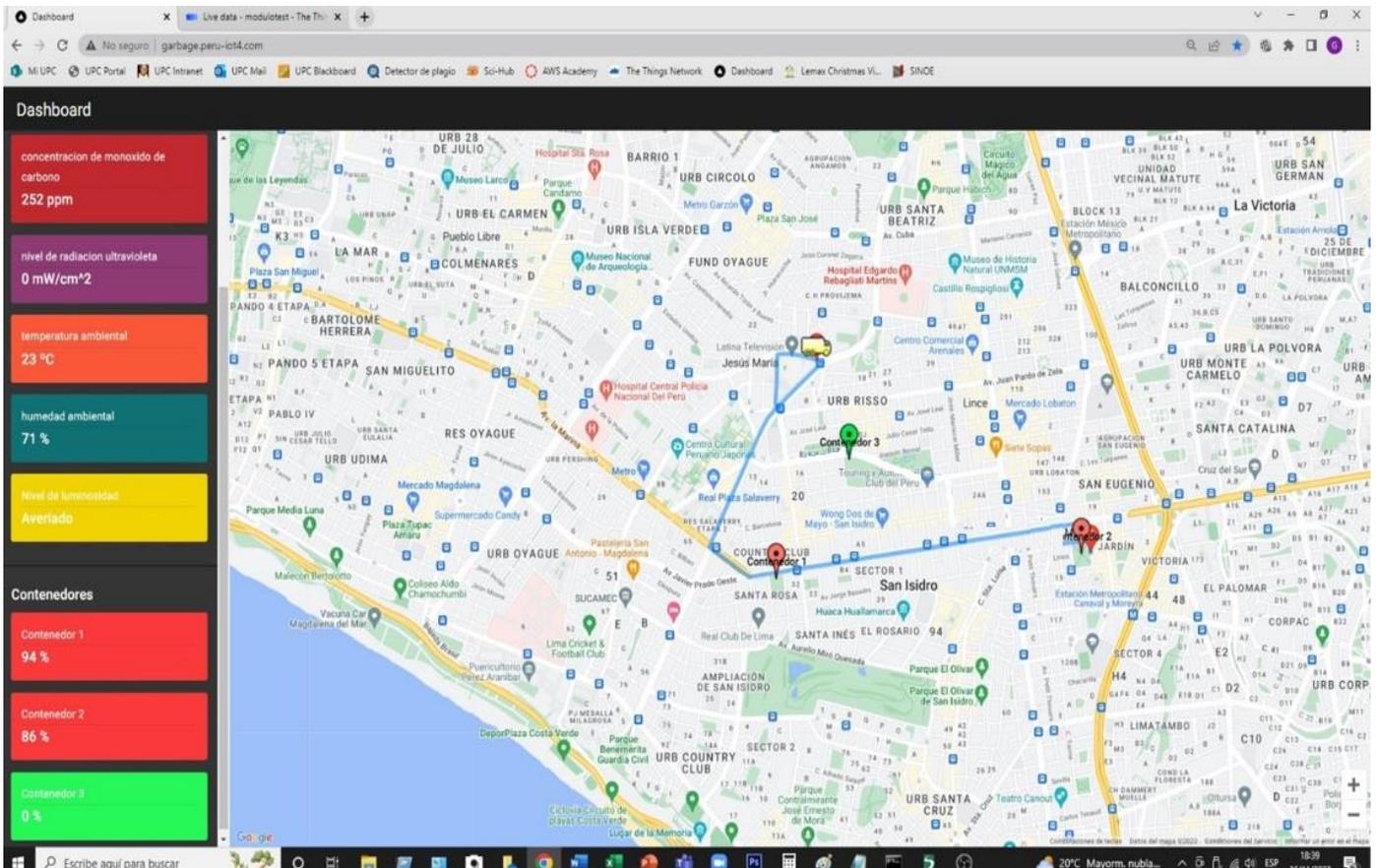
Nota. De "Nota Técnica N° 002-2016", por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2016

(https://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/meteo_2016_pro_cob_nac_ind_rad_sol_ult.pdf).

Resultado: La medición de radiación solar indica una potencia de 20 mW/cm²; por lo tanto, comparando este valor con las categorías de exposición a la radiación ultravioleta señalado por el SENAMHI, se tiene un índice UV de 7 (Alto), el cual es considerado de riesgo para la salud de las personas.

5.3.7 Generación de la Ruta Óptima

Figura 169
Generación de la ruta óptima en el dashboard



La generación de la ruta óptima está en función al nivel de llenado de los contenedores. El algoritmo de ruta aplicado simplemente tiene en cuenta la ubicación inicial del camión de recolección y solamente considera a los contenedores con una capacidad > 70 % (ícono rojo).

Resultado: Los camiones recolectores toman una ruta que sólo pasa por los contenedores llenos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Debido a las múltiples obstrucciones en el recorrido desde el prototipo al gateway, se determinó mantener el factor de ensanchamiento en SF10 y antenas de mayor ganancia para cubrir el alcance de pruebas hasta 0,4 km y con ello lograr la recepción de los datos.

Se supera el alcance de los cables UTP o coaxial; así como de la cobertura en equipos con tecnología Wi-Fi.

La solución demuestra que la tecnología LoRa se presenta como una opción altamente adecuada para llevar a cabo comunicaciones de largo alcance con un consumo energético reducido. La implementación de la red de nodos basada en LoRa se hace viable debido a su bajo costo, rápida puesta en marcha y amplia cobertura.

A pesar de que la tecnología LoRa es de reciente desarrollo, su adopción inicial ha sido limitada. No obstante, las pruebas realizadas con esta tecnología confirman sus grandes ventajas.

6.2 Recomendaciones

El prototipo se desarrolló en las frecuencias de 923,6 y 924,5 MHz, con una potencia de transmisión de 16 dBm, y los datos se transmiten automáticamente cada 5 minutos. No obstante, esta frecuencia de envío constante resulta en un mayor consumo de energía, lo que podría llevar a la transmisión de datos incompletos si la batería alcanza su nivel mínimo de voltaje. Por lo tanto, se aconseja asegurarse de cargar la batería con la anticipación debida.

La adquisición de un gateway outdoor, el cual brinda una mayor cobertura que el gateway indoor como el utilizado en este proyecto. Estos dispositivos son especialmente idóneos para abarcar áreas tanto rurales como urbanas, y pueden ser instalados en diversas

estructuras, como torres, techos de edificios de gran altura o mástiles. Son reconocibles por su antena externa, que se conecta mediante un cable coaxial.

Para la adquisición del transceptor LoRa y del gateway, hay que considerar que operen bajo la misma clase y frecuencia de trabajo, ya que hay diversas frecuencias por defecto para cada región: Asia 433 MHz; Europa 868 MHz; América 915 MHz.

Asimismo, para la adquisición del gateway, se recomienda realizar la importación del equipo con anticipación, ya que podría existir demoras en la llegada del mismo. Adicionalmente, revisar si el modelo del gateway a importar está homologado por el MTC. Caso contrario, podría no tener la autorización de ingreso por Aduanas.

7. REFERENCIAS

Air Infiltration and Ventilation Centre. (1988). *Relative humidity: What is acceptable?*,

Recuperado el 26 de noviembre de 2023, de

https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_3401.pdf

Airnow. (2018, septiembre). *Technical assistance document for the reporting of daily air*

quality – the air quality index (AQI), Recuperado el 26 de noviembre de 2023, de

<https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance->

[document-sept2018.pdf](https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf)

Andrade, R. O., & Yoo, S. G. (2019). A comprehensive study of the use of LoRa in the

development of smart cities. *Applied Sciences*, 9(22), 4753. DOI:

10.3390/app9224753

Banco Mundial. (2018). *What a waste: A global snapshot of solid waste management to*

2050. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de

<https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>

Buestán, J.C. (2019). *Desarrollo de una red IoT con tecnología LoRa para detección de*

automóviles [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio

Institucional de la UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16897>

Burbano, C.Y. (2017). *Implementación de una red de sensores inalámbricos LPWAN*

mediante módulos LoRa para el monitoreo de la calidad del agua en 2 ríos [Tesis de

licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio

Institucional de la UDFJC. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6433>

- Carrión, M. (2017). *Desarrollo de una pasarela LoRa y evaluación de prestaciones* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional de la UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/91597>
- Defensoría del Pueblo. (2019). *Informe Defensorial 181: ¿Dónde va nuestra basura?*. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2019/11/INFORME-DEFENSORIAL-181.pdf>
- Ferreira, A.E., Ortiz, F.M., Costa, L.H.M.K., Foubert, B., Amadou, I., & Mitton, N. (2020). A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments. *Annals of Telecommunications*. 75, 333–351. DOI:10.1007/s12243-020-00789-w
- Google. (s.f.-a). [Ubicación de contenedores en algunos parques de San Isidro]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0997133,-77.0252686,16z?authuser=0&entry=ttu>
- Google. (s.f.-b). [Ubicación de contenedores vacíos en algunos parques de San Isidro]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0997133,-77.0252686,16z?authuser=0&entry=ttu>
- Google. (s.f.-c). [Cobertura ideal para todos los parques de San Isidro]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0997133,-77.0252686,16z?authuser=0&entry=ttu>
- Google. (s.f.-d). [Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 1]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>

Google. (s.f.-e). [Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 2]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>

Google. (s.f.-f). [Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 3]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>

Google. (s.f.-g). [Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 4]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>

Google. (s.f.-h). [Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 5]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>

Google. (s.f.-i). [Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 6]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>

Google. (s.f.-j). [Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 7]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>

Google. (s.f.-k). [Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 8]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>

- Google. (s.f.-l). [Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 9]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>
- Google. (s.f.-m). [Distancia entre el prototipo y el gateway en la prueba 10]. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-12.0333176,-76.9959242,19.5z?authuser=0&entry=ttu>
- Google Maps Platform. (2023). API de roads. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://developers.google.com/maps/documentation/roads>
- Haribabu, P., Kassa, S.R., Nagaraju, J., Karthik, R., Shirisha, N., & Anila, M. (2017, diciembre 7-8). *Implementation of an Smart Waste Management System using IoT* [Conferencia]. International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), Palladam, India. DOI: 10.1109/ISS1.2017.8389367
- Hernández, S. (2020). *Estudio en detalle de LoRaWAN. Comparación con otras tecnologías LPWAN considerando diferentes patrones de tráfico* [Tesis de maestría, Universitat Oberta de Catalunya]. Repositorio Institucional de la UOC. <https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/106369>
- Idwan, S., Zubairi, J.A., & Mahmood, I. (2016, octubre 31-noviembre 4). *Smart solutions for smart cities: Using wireless sensor network for smart dumpster management* [Conferencia]. International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS), Orlando, FL, USA. DOI: 10.1109/CTS.2016.0092
- Innova Ambiental (2023). *Recolección y Transporte de Residuos Sólidos*. Servicios Públicos. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://innova.com.pe/>

- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2020, septiembre 25). *IEEE 802.15.4w-2020: IEEE Standard for Low Rate Wireless Networks - Low Power Wide Area Network (LPWAN)*. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4w/7288/>
- Instituto Geofísico del Perú. (2023). *Criterio de clasificación climática*. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de <http://met.igp.gob.pe/clima/clasif.html>
- Jino, S.R., Vishnu, S., Kirubaraj, A., Anagnostopoulos, T., & Abu-Mahfouz, A. (2021). A LoRaWAN IoT-enabled trash bin level monitoring system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(2), 786-795. DOI: 10.1109/TII.2021.3078556
- LoRa Alliance. (2023a). *RP002-1.0.4 regional parameters*. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>
- LoRa Alliance. (2023b). *TS001-1.0.4 LoRaWAN L2 1.0.4 specification*. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification>
- LoRa Alliance. (2023c). *What is LoRaWAN specification*. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://lora-alliance.org/about-lorawan>
- Loriot, M., Aljer, A., & Shahrour I. (2017, septiembre 12-14). *Analysis of the use of LoRaWAN technology in a large-scale smart city demonstrator* [Conferencia]. Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET), Beiriut, Lebanon. DOI: 10.1109/SENSET.2017.8125011

- Manrique, M.A., Buitrago, L.M., & Hernández-Gutiérrez, J. (2019). *Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT* [Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional de la UDFJC. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22411>
- Memon, S.K., Shaikh, F.K., Mahoto, N.A., & Memon, A.A. (2019, enero 30-31). *IoT based smart garbage monitoring & collection system using wemos & ultrasonic sensors* [Conferencia]. 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), Sukkur, Pakistan. DOI: 10.1109/ICOMET.2019.8673526
- Ministerio de Energía y Minas. (2003, 14 de enero). *Norma Técnica DGE: Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución*. Recuperado el 26 de noviembre de 2023, de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/95576/RM_013_2003_DM.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2023). *Plan Nacional de Atribución de Frecuencias*. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4229456/Plan%20Nacional%20de%20Atribuci%C3%B3n%20de%20Frecuencias%20-%20PNAF%202023.pdf?v=1678288087>
- Moya, M.A. (2018). *Evaluación de pasarela Lora/LoRaWAN en entornos urbanos* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional de la UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/109791>
- Municipalidad de San Isidro. (2022). *Compendio estadístico 2022*. Recuperado el 23 de noviembre de 2023, de

https://www.munisanisidro.gob.pe/Transparencia/Tema02/Compendio_Estadistico_2022.pdf

- Muyunda, N., & Ibrahim, M. (2017, noviembre 9-11). *Arduino-based smart garbage monitoring system: Analysis requirement and implementation* [Conferencia]. International Conference on Computer and Drone Applications (IConDA), Kuching, Malaysia. DOI: 10.1109/ICONDA.2017.8270394
- Naik, N. (2018, 1-3 de octubre). LPWAN technologies for IoT systems: Choice between ultra narrow band and spread spectrum. *International Systems Engineering Symposium (ISSE)* [Simposio]. Roma, Italia. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8544414>
- Nirde, K., Mulay, P.S., & Chaskar, U.M. (2017, junio 15-16). *IoT based solid waste management system for smart city* [Conferencia]. International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India. DOI: 10.1109/ICCONS.2017.8250546
- Pastrán, N., & López, F. (2021). *Modelo para la gestión de residuos aprovechables incorporando tecnología IoT y servicios en la nube* [Tesis de licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional de la UDFJC. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/28307>
- Polonelli, T., Brunelli, D., Marzocchi, A., & Benini, L. (2019). Slotted ALOHA on LoRaWAN-design, analysis, and deployment. *Sensors*, 19(4), 838. DOI: 10.3390/s19040838

- RAK. (2023a). *RAK7246G wisgate developer D0 gateway datasheet*. Recuperado el 26 de noviembre de 2023, de <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7246G/Datasheet/#hardware>
- RAK. (2023b). *WisGate developer D0/D0+ RAK7246/RAK7246G*. Recuperado el 26 de noviembre de 2023, de <https://store.rakwireless.com/products/rak7246-lpwan-developer-gateway?variant=36313275367582>
- Ricatti, A. (2017). *Optimización de recolección de residuos con IoT* [Tesis de licenciatura, Universidad Siglo 21]. Repositorio Institucional de la UES21. <https://repositorio.21.edu.ar/handle/ues21/14049>
- Semtech Corporation. (2023). *What are LoRa and LoRaWAN?*. Documentation. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2016). *Nota Técnica N° 002-2016*, Recuperado el 26 de noviembre de 2023, de https://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/meteo_2016_pro_cob_nac_ind_rad_sol_ultra.pdf
- Techmake. (2020, 12 de mayo). *Empezando con Arduino - 3C: Sensor ultrasónico HC-SR04*. Tutoriales. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://techmake.com/blogs/tutoriales/empezando-con-arduino-3c-sensor-ultrasonico-hc-sr04>

Tecnopapel. (2023). Ficha técnica de contenedor de 240 litros.

<https://www.tecnopapel.cl/wp-content/uploads/2019/07/FICHA-TEC-CONTENEDOR-240-LT.pdf>

The Things Network. (2023). *Welcome to the things fundamentals on LoRaWAN*.

Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://www.thethingsnetwork.org>

Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2021). *Recommendation Y.4480: Low power protocol for wide area wireless networks*. Recuperado el 11 de noviembre de 2023, de <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4480-202111-I/en>

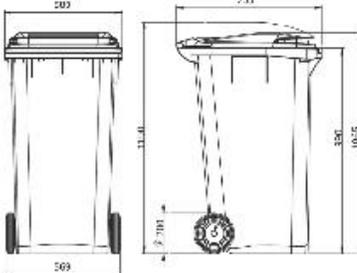
8. GLOSARIO

Término	Definición
IoT	El Internet de las cosas o IoT son los sistemas de dispositivos físicos que reciben y transfieren datos a través de redes inalámbricas sin la intervención humana.
LoRa	Es una tecnología inalámbrica al igual que Wi-Fi o Bluetooth.
Sensores	Son equipos que convierten una magnitud de entrada (temperatura, humedad, nivel, presión, etc.) en una señal eléctrica medible e interpretable por los dispositivos electrónicos, y capaz de ser almacenada en una base de datos para su posterior uso y proceso.
LPWAN	Tecnología de comunicación inalámbrica que permite transmitir datos entre un dispositivo y una estación base separados por metros o kilómetros con un muy bajo consumo energético.
CLOUD	Computación en la nube. Es un modelo que permite ofrecer servicios de computación a través de una red, comúnmente Internet.

9. SIGLARIO

Abreviatura	Significado
IoT	Internet of Things (Internet de las Cosas)
LoRa	Long Range (Amplia Cobertura)
LPWAN	Low Power Wide Area Network (Red de Área Amplia de Baja Potencia)
RSSI	Received Signal Strength Indicator (Nivel de Señal Recibida)
FSL	Free Space Loss (Pérdidas en el Espacio Libre)
FM	Fade Margin (Margen de Desvanecimiento)

ANEXOS

CONTENEDOR 240 LITROS / MARCA ESE / CARGA MAX. 110 KG					
	COD. COLOR	AZUL	10300225		
	COD. COLOR	ROJO	10300226		
	COD. COLOR	AMARILLO	10300224		
	COD. COLOR	GRIS	100300230		
	COD. COLOR	VERDE	10300204		
10300225					DESCRIPCION VOLUMEN 240 LTS. CARGA 110 KG. MAX. PLASTICO HDPE / PEAD / POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD TAPA CON BISAGRAS DE LABIO / ASA DE BORDE CONTINUO APERTURA DE TAPA MANUAL
					
Los productos no contienen sustancias catalogadas dentro de la lista SVHC de la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA).					
FUNCIONES	MATERIALES	COLOR	MEDIDAS	PESO	CÓDIGO
CUERPO	HDEP, ESTABILIZADO ULTRAVIOLETA	AZUL, ROJO, AMARILLO, NEGRO, VERDE	ALTO 890 MM. ANCHO 580. PROFUNDIDAD 735 MM.	14 KILOS TOTAL / APROX.	
TAPA	ABS	AZUL, ROJO, AMARILLO, NEGRO, VERDE	ALTO 10 MM. ANCHO 580 MM. LARGO 670 MM.		
RUEDAS	2 RUEDAS GOMA / EJE ACERO INOX.	NEGRO	DIAMETRO 200 MM. ANCHO 55 MM.		
LOGÍSTICA					
EL CONTENEDOR SE ENTREGA ARMADO Y PROTEGIDO CON FILM STRETCH					
Este producto debe ser mantenido en ambiente seco y aireado, debe estar lejos de la luz solar directa y se debe MANIPULAR CON CUIDADO Y PRECISIÓN.					
LIMITE DE APILAMIENTO 2 FILAS DE ALTURA SEPARADO POR PLATAFORMA					



Long Range Wireless Transceiver for Arduino

Lora/GPS Shield



Lora/GPS mother board

+



Lora BEE

=



Lora/GPS Shield

OVERVIEW:

The Dragino Lora/GPS Shield is an expansion board for LoRa™/GPS for using with the arduino. This product is intended for those interested in developing LoRa™/GPS solutions. The Lora/GPS Shield is composed of Lora/GPS Shield mother board and Lora BEE.

In the Lora part, the Lora/GPS Shield is based on the SX1276/SX1278 transceiver. The transceiver of the Lora/GPS Shield feature the LoRa™ long range modem that provides ultra-long range spread spectrum communication and high interference immunity whilst minimising current consumption. LoRa™ also provides significant advantages in both blocking and selectivity over conventional modulation techniques, solving the traditional design compromise between range, interference immunity and energy consumption.

In the GPS part, the add on L80 GPS (base on MTK MT3339) is designed for applications that require location or timing info. It connected to the arduino via serial port.

Features:

- Compatible with Arduino Leonardo, UNO, Mega2560, etc
- Frequency Band: one of 433/868/915 MHz (Pre-configure in factory)
- Low power consumption
- FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa™ and OOK modulation
- Support DGPS, SBAS(WAAS/EGNOS/MSAS/GAGAN)
- GPS support short circuit protection and antenna detection
- Automatic RF Sense and CAD with ultra-fast AFC
- Baud rate configurable

Specification:

Lora Spec

- 168 dB maximum link budget
- +20 dBm - 100 mW constant RF output vs
- +14 dBm high efficiency PA
- Programmable bit rate up to 300 kbps
- High sensitivity: down to -148 dBm
- Bullet-proof front end: IIP3 = -12.5 dBm
- Excellent blocking immunity
- Low RX current of 10.3 mA, 200 nA register retention

GPS Spec

- Based on MT3339
- Compliant with GPS, SBAS
- Programmable bit rate up to 300 kbps
- Update rate: 1Hz (Default), up to 10Hz
- Protocols: NMEA 0183, PMTK
- Horizontal Position Accuracy <2.5 m CEP
- Timing Accuracy: 1PPS out 10ns, Reacquisition Time <1s
- Velocity Accuracy Without aid <0.1m/s, Acceleration Accuracy Without aid 0.1m/s²

Dragino Technology Co., Limited

Room 7009, Zi'an Commercial Building, Qian Jin 1 Road,
Xin'an 6th District, Bao'an District; Shenzhen 518101, China
Direct: +86 755 86610829 | Fax: +86 755 86647123

WWW.DRAGINO.COM
sales@dragino.com

RAK7246G WisGate Developer D0 Gateway Datasheet

Overview

Description

The RAK7246G is a LoRaWAN Developer gateway with GPS function. It is a device composed of the RAK2246 Pi HAT LPWAN Concentrator module and a Raspberry Pi Zero W.

The RAK2246 Pi HAT is based on a Semtech SX1308 chip, which allows for simultaneous reception over 8 LoRa channels, which cover the entirety of the international high frequency LoRaWAN space.

The RAK7246G is an ideal choice for prototype design, concept verification and demonstrations, development evaluation and other scenarios. It is developer friendly due to its minimalistic design that reduces cost and allows for easily accessing the internals. It is easy to set-up, which makes it a good choice for both experienced and novice LoRa specialists.

Features

- Using **SX1308** baseband processor couple with dual **SX1257**, full 8 uplink channels and 1 downlink channel LoRaWAN Gateway
- Built-in Ublox **MAX-7Q** GPS module
- The pre-installed radiator guarantees a stable thermal performance
- Tx max **20 dBm**, Rx min **-139 dBm @ SF12** at 125kHz
- Covers the entirety of the **LoRa high frequency band space**: RU864, IN865, EU868, US915, AU915, KR920, AS923;
- Power supply rating **5V / 2.5A (not included)**.

Specifications

Overview

The overview covers the RAK7246G board overview and the block diagram that shows how the components operate.

Board Overview

Module Overview



Tech Support: services@elecfreaks.com

Ultrasonic Ranging Module HC - SR04

Product features:

Ultrasonic ranging module HC - SR04 provides 2cm - 400cm non-contact measurement function, the ranging accuracy can reach to 3mm. The modules includes ultrasonic transmitters, receiver and control circuit. The basic principle of work:

- (1) Using IO trigger for at least 10us high level signal,
- (2) The Module automatically sends eight 40 kHz and detect whether there is a pulse signal back.
- (3) IF the signal back, through high level , time of high output IO duration is the time from sending ultrasonic to returning.

Test distance = (high level time×velocity of sound (340M/S) / 2,

Wire connecting direct as following:

- 5V Supply
- Trigger Pulse Input
- Echo Pulse Output
- 0V Ground

Electric Parameter

Working Voltage	DC 5 V
Working Current	15mA
Working Frequency	40Hz
Max Range	4m
Min Range	2cm
MeasuringAngle	15 degree
Trigger Input Signal	10uS TTL pulse
Echo Output Signal	Input TTL lever signal and the range in proportion
Dimension	45*20*15mm

TECHNICAL DATA MQ-7 GAS SENSOR**FEATURES**

* High sensitivity to carbon monoxide

* Stable and long life

APPLICATION

They are used in gas detecting equipment for carbon monoxide(CO) in family and industry or car.

SPECIFICATIONS**A. Standard work condition**

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remark
Vc	circuit voltage	5V±0.1	Ac or Dc
VH (H)	Heating voltage (high)	5V±0.1	Ac or Dc
VH (L)	Heating voltage (low)	1.4V±0.1	Ac or Dc
RL	Load resistance	Can adjust	
RH	Heating resistance	33 Ω ± 5%	Room temperature
TH (H)	Heating time (high)	60 ± 1 seconds	
TH (L)	Heating time (low)	90 ± 1 seconds	
PH	Heating consumption	About 350mW	

b. Environment conditions

Symbol	Parameters	Technical conditions	Remark
Tao	Using temperature	-20°C-50°C	
Tas	Storage temperature	-20°C-50°C	Advice using scope
RH	Relative humidity	Less than 95%RH	
O ₂	Oxygen concentration	21%(stand condition) the oxygen concentration can affect the sensitivity characteristic	Minimum value is over 2%

c. Sensitivity characteristic

symbol	Parameters	Technical parameters	Remark
Rs	Surface resistance Of sensitive body	2-20k	In 100ppm Carbon Monoxide
a (300/100ppm)	Concentration slope rate	Less than 0.5	Rs (300ppm)/Rs(100ppm)
Standard working condition	Temperature -20°C ± 2°C Vc:5V±0.1V VH:5V±0.1V VH:1.4V±0.1V	relative humidity 65% ± 5%	RL:10K Ω ± 5%
Preheat time	No less than 48 hours	Detecting range: 20ppm-2000ppm carbon monoxide	

D. Structure and configuration, basic measuring circuit

Structure and configuration of MQ-7 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro AL₂O₃ ceramic tube, Tin Dioxide (SnO₂) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-7 have

Arduino Photoresistor Detection Photosensitive Light Sensor



Description:

- Using a wide voltage LM393 comparator
- With a mounting screw hole, easy to install
- Using the sensitive type photosensitive resistance sensor
- The comparator output signal clean waveform is good, driving ability, than 15mA
- With adjustable potentiometer can adjust the brightness of the light detected
- Working voltage: 3.3V-5V
- Size(L*W): Approx 1.26 x 0.55 inch/ 3.2cm x 1.4cm
- Output: DO digital switch output (0 and 1), AO analog voltage output.

Interface Description (4-wire):

- VCC: positive power supply 3.3-5V
- GND: power supply is negative
- DO: TTL switching signal output
- AO: analog output

Usage:

- This module is sensitive to the light, Usually used for detecting the ambient brightness and light intensity.

ML8511

UV Sensor with Voltage Output

GENERAL DISCRIPTION

The ML8511 is a UV sensor, which is suitable for acquiring UV intensity indoors or outdoors. The ML8511 is equipped with an internal amplifier, which converts photo-current to voltage depending on the UV intensity. This unique feature offers an easy interface to external circuits such as ADC. In the power down mode, typical standby current is 0.1 μ A, thus enabling a longer battery life.

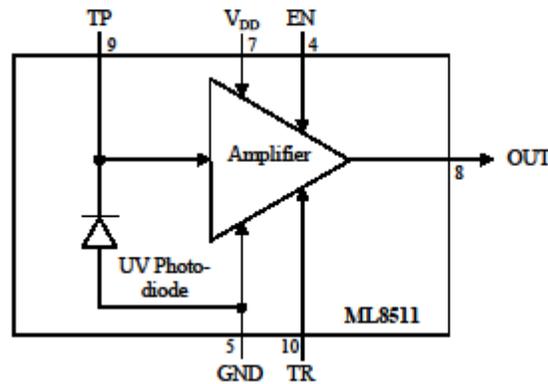
FEATURES

- Photodiode sensitive to UV-A and UV-B
- Embedded operational amplifier
- Analog voltage output
- Low supply current (300 μ A typ.) and low standby current (0.1 μ A typ.)
- Small and thin surface mount package (4.0mm x 3.7mm x 0.73mm, 12-pin ceramic QFN)

APPLICATIONS

- Smart phone, Watch, Weather station, Bicycle navigation, Accessary, Gaming

BLOCK DAIAGRAM



PIN CONFIGURATIONS

Pin	Symbol	I/O	Function
7	VDD	PW	Supply voltage. Decouple this pin to ground with 0.1 μ F capacitor.
5	GND	PW	Ground
4	EN	I	Active high enable pin. (High: Active mode, Low: Standby mode)
8	OUT	O	Output (Low in power down or standby mode)
9	TP	I/O	Test pin. Do not connect.
10	TR	I/O	Internal reference voltage. Decouple this pin to ground with 1 nF capacitor.
1,2,3, 6,11,12	NC	-	No Connection. Do not connect.



DHT11 Humidity & Temperature Sensor

DHT11 Temperature & Humidity Sensor features a temperature & humidity sensor complex with a calibrated digital signal output.

Programación en IDE

```

25 // CABECERAS PARA SX1276 LORAWAN CHIP
26 #include "ttn.h"
27 #include <nvs_flash.h>
28 const char *appEui = "0000000000000000"; // AppEUI (sometimes called JoinEUI)
29 const char *devEui = "7083D57ED0056260"; // DevEUI
30 const char *appKey = "752D797729761955489D1F7435DB85C6"; // AppKey
31 #define TTN_SPI_HOST HSPI_HOST
32 #define TTN_SPI_DMA_CHAN 1
33 #define TTN_PIN_SPI_SCLK 26
34 #define TTN_PIN_SPI_MOSI 22
35 #define TTN_PIN_SPI_MISO 23
36 #define TTN_PIN_NSS 12
37 #define TTN_PIN_RXTX TTN_NOT_CONNECTED
38 #define TTN_PIN_RST 13
39 #define TTN_PIN_DIO0 4
40 #define TTN_PIN_DIO1 16
41 bool joined = false;
42
43 // CABECERAS PARA DHT11 (SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTALES)
44 // #include <SimpleDHT.h>
45 #include "DHT.h"
46 int pinDHT11 = 27;
47 // SimpleDHT11 dht11(pinDHT11);
48 DHT dht(pinDHT11, DHT11);
49
50 // CABECERAS PARA LDR (SENSOR DE INTENSIDAD LUMINOSA)
51 int pinLDR = 14;
52
53 // CABECERAS PARA GYML8511 (SENSOR DE RADIACION ULTRAVIOLETA)
54 int UVOUT = 33; // Output from the sensor
55 int REF_3V3 = 25; // 3.3V power on the Arduino board
56
57 // CABECERAS PARA MQ7 (SENSOR DE CONCENTRACION DE CO)
58 int pinMQ7 = 32;
59
60 // CABECERAS PARA SENSORES DE HUMEDAD Y ACIDEZ DE SUELO
61 int pinHumedadSuelo = 35;
62 int pinAcidezSuelo = 34;
63
64 // CABECERAS PARA SENSORES DE LLENADO SR04
65 #define SR04_TRIGGER 19
66 #define SR04_ECHO1 18
67 #define SR04_ECHO2 5
68 #define SR04_ECHO3 17
69 #define SOUND_SPEED 0.034
70 #define CH_TO_INCH 0.393701
71
72 // VARIABLES GLOBALES PARA LAS LECTURAS
73 int s1 = 0;
74 int s2 = 0;
75 int s3 = 0;
76 int s4 = 0;
77 int s5 = 0;
78 int s6 = 0;
79 bool s7 = false;
80 bool s8 = false;
81 bool s9 = false;
82 bool s10 = false;
83
84 void setup() {
85   delay(2000);
86   Serial.begin(115200);
87
88   // setup para SX1276 LORAWAN CHIP
89   lora_init();
90
91   // INICIALIZACION PARA DHT11 (SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTAL)
92   dht.begin();
93
94   // INICIALIZACION PARA LDR (SENSOR DE INTENSIDAD LUMINOSA)
95   pinMode(pinLDR, INPUT);
96
97   // INICIALIZACION PARA GYML8511 (SENSOR DE RADIACION ULTRAVIOLETA)
98   pinMode(UVOUT, INPUT);
99   pinMode(REF_3V3, INPUT);
100
101   // INICIALIZACION PARA MQ7 (SENSOR DE CONCENTRACION DE CO)
102   pinMode(pinMQ7, INPUT);
103
104   // INICIALIZACION PARA SENSORES DE HUMEDAD Y ACIOEZ DE SUELO
105   pinMode(pinHumedadSuelo, INPUT);
106   pinMode(pinAcidezSuelo, INPUT);
107

```

```
108 // INICIALIZACION PARA SENSORES DE LLENADO SR04
109 pinMode(SR04_TRIGGER, OUTPUT);
110 pinMode(SR04_ECHO1, INPUT);
111 pinMode(SR04_ECHO2, INPUT);
112 pinMode(SR04_ECHO3, INPUT);
113 }
114
115 void loop() {
116   read_sensors();
117   send_data();
118
119   // delay de 15 min
120   for (int i = 0; i < 15; i++)
121     delay(60000);//1min
122 }
123
124 // FUNCIONES AUXILIARES
125 void messageReceived(const uint8_t *message, size_t length, ttn_port_t port)
126 {
127   printf("Message of %d bytes received on port %d:", length, port);
128   for (int i = 0; i < length; i++)
129     printf(" %02x", message[i]);
130   printf("\n");
131 }
132 extern "C" void lora_init()
133 {
134   esp_err_t err;
135
136   // Initialize the GPIO ISR handler service
137   err = gpio_install_isr_service(ESP_INTR_FLAG_IRAM);
138   ESP_ERROR_CHECK(err);
139
140   // Initialize the NVS (non-volatile storage) for saving and restoring the keys
141   err = nvs_flash_init();
142   ESP_ERROR_CHECK(err);
143
144   // Initialize SPI bus
145   spi_bus_config_t spi_bus_config = { -1};
146   spi_bus_config.miso_io_num = TTN_PIN_SPI_MISO;
147   spi_bus_config.mosi_io_num = TTN_PIN_SPI_MOSI;
148   spi_bus_config.sclk_io_num = TTN_PIN_SPI_SCLK;
149   spi_bus_config.quadwp_io_num = -1;
150   spi_bus_config.quadhd_io_num = -1;
151   spi_bus_config.max_transfer_sz = 0;
152   spi_bus_config.intr_flags = 0;
153   spi_bus_config.flags = 0;
```

```
155 err = spi_bus_initialize(TTN_SPI_HOST, &spi_bus_config, TTN_SPI_DMA_CHAN);
156 ESP_ERROR_CHECK(err);
157
158 // Initialize TTN
159 ttn_init();
160
161 // Configure the SX127x pins
162 ttn_configure_pins(TTN_SPI_HOST, TTN_PIN_NSS, TTN_PIN_RXTX, TTN_PIN_RST, TTN_PIN_DIO0, TTN_PIN_DIO1);
163
164 // The below line can be commented after the first run as the data is saved in NVS
165 ttn_provision(devEui, appEui, appKey);
166
167 // Register callback for received messages
168 ttn_on_message(messageReceived);
169
170 }
171 bool lora_join()
172 {
173     if (joined)
174         return true;
175
176     ttn_reset();
177     Serial.println("Joining.....");
178     if ( ttn_join_provisioned() )
179     {
180         joined = true;
181         printf("Joined.\n");
182         printf("  appEui:%s\n", appEui);
183         printf("  devEui:%s\n", devEui);
184         printf("  appKey:%s\n", appKey);
185         return true;
186     }
187     Serial.println("Join failed.");
188     return false;
189 }
190
191 bool lora_transmit(uint8_t *data, int size)
192 {
193     printf("Sending LoRa message:%s\n", (char*)data);
194     ttn_response_code_t res = ttn_transmit_message(data, size, 1, false);
195     printf(res == TTN_SUCCESSFUL_TRANSMISSION ? "Message sent.\n" : "Transmission failed.\n");
196     bool result = (res == TTN_SUCCESSFUL_TRANSMISSION) ? true : false;
197     if (result == false)
198         joined = false;
199     return result;
200 }
```

```

201 int averageAnalogRead(int pinToRead)
202 {
203     byte numberOfReadings = 8;
204     unsigned int runningValue = 0;
205
206     for (int x = 0 ; x < numberOfReadings ; x++)
207         runningValue += analogRead(pinToRead);
208     runningValue /= numberOfReadings;
209
210     return (runningValue);
211 }
212
213 float mapfloat(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max)
214 {
215     return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
216 }
217
218 void read_sensors() {
219     // LECTURAS DE ACIDEZ Y HUMEDAD DE SUELO
220     int HumedadSuelo_steps = averageAnalogRead(pinHumedadSuelo);
221     int AcidezSuelo_steps = averageAnalogRead(pinAcidezSuelo);
222     Serial.print("Humedad de suelo steps: ");
223     Serial.println(HumedadSuelo_steps);
224     Serial.print("Acidez de suelo steps: ");
225     Serial.println(AcidezSuelo_steps);
226     s1 = AcidezSuelo_steps;
227
228     s2 = (int)((-0.175438596) * HumedadSuelo_steps + 157.894736);
229     s2 = (s2 >= 100) ? 100 : ( s2 >= 0 ? s2 : 0 );
230     Serial.print("Humedad de suelo(HR): ");
231     Serial.println(s2);
232
233     // LECTURAS DE CONCENTRACION DE CO (MQT7)
234     int co_mv = averageAnalogRead(pinMQ7) * (3300.0 / 4095.0) * 1.73333;
235     Serial.print(" CO concentracion RAW()mv: ");
236     Serial.println(co_mv);
237     s3 = co_mv;
238
239     // LECTURAS DE RADIACION ULTRAVIOLETA (GYML8511)
240     int uvLevel = averageAnalogRead(UVOUT);
241     int refLevel = averageAnalogRead(REF_3V3);
242     float outputVoltage = 3.3 / refLevel * uvLevel;
243     float uvIntensity = mapfloat(outputVoltage, 0.00, 2.9, 0.0, 15.0); //0.99, 2.9, 0.0, 15.0
244     Serial.print(" UV Intensity (mw/cm^2): ");
245     Serial.println(uvIntensity);
246     s4 = (int)uvIntensity;

```

```

248 // LECTURAS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTALES (DHT11)
249 float humidity = dht.readHumidity();
250 float temperature = dht.readTemperature();
251 Serial.print(temperature); Serial.print(" *C, ");
252 Serial.print(humidity); Serial.println(" H");
253 s5 = (int)temperature;
254 s6 = (int)humidity;
255
256 // LECTURAS DE INTENSIDAD LUMINOSA (LDR)
257 byte brillo = digitalRead(pinLDR);
258 if (brillo == 0)
259 {
260   Serial.println("Foco en buen estado");
261   s7 = true;
262 }
263 else
264 {
265   Serial.println("Foco en mal estado");
266   s7 = false;
267 }
268
269 // LECTURAS DE SENSOR DE LLENADO 1
270 delay(100);
271 digitalWrite(SR04_TRIGGER, LOW);
272 delayMicroseconds(2);
273 digitalWrite(SR04_TRIGGER, HIGH);
274 delayMicroseconds(10);
275 digitalWrite(SR04_TRIGGER, LOW);
276 long duration1 = pulseIn(SR04_ECHO1, HIGH);
277 float distanceCm1 = duration1 * SOUND_SPEED / 2;
278 Serial.print("Distance1 (cm): ");
279 Serial.println(distanceCm1);
280 s8 = (distanceCm1 < 30.0) ? false : true;
281
282 // LECTURAS DE SENSOR DE LLENADO 2
283 delay(100);
284 digitalWrite(SR04_TRIGGER, LOW);
285 delayMicroseconds(2);
286 digitalWrite(SR04_TRIGGER, HIGH);
287 delayMicroseconds(10);
288 digitalWrite(SR04_TRIGGER, LOW);
289 long duration2 = pulseIn(SR04_ECHO2, HIGH);
290 float distanceCm2 = duration2 * SOUND_SPEED / 2;
291 Serial.print("Distance2 (cm): ");
292 Serial.println(distanceCm2);
293 s9 = (distanceCm2 < 30.0) ? false : true;
294
295 // LECTURAS DE SENSOR DE LLENADO 3
296 delay(100);
297 digitalWrite(SR04_TRIGGER, LOW);
298 delayMicroseconds(2);
299 digitalWrite(SR04_TRIGGER, HIGH);
300 delayMicroseconds(10);
301 digitalWrite(SR04_TRIGGER, LOW);
302 long duration3 = pulseIn(SR04_ECHO3, HIGH);
303 float distanceCm3 = duration3 * SOUND_SPEED / 2;
304 Serial.print("Distance3 (cm): ");
305 Serial.println(distanceCm3);
306 s10 = (distanceCm3 < 30.0) ? false : true;
307
308 }
309 void send_data() {
310   // EMPAQUETAR DATOS
311   char datos[200] = {};
312   memset(datos, 0, 200);
313
314   sprintf(datos, 200, "{"
315     "\s1\":%i,"
316     "\s2\":%i,"
317     "\s3\":%i,"
318     "\s4\":%i,"
319     "\s5\":%i,"
320     "\s6\":%i,"
321     "\s7\":%s,"
322     "\s8\":%s,"
323     "\s9\":%s,"
324     "\s10\":%s"
325     "}",
326     s1, s2, s3,
327     s4, s5, s6,
328     s7 ? "true" : "false",
329     s8 ? "true" : "false",
330     s9 ? "true" : "false",
331     s10 ? "true" : "false");
332
333   Serial.println(datos);

```

```
335 // CONECTAR CON GATEWAY
336 join:
337
338 if ( !lora_join() ) {
339     Serial.println("Wait 5 seconds ...");
340     delay(5000);
341     goto join;
342 }
343
344 Serial.println("JOINED");
345 delay(2000);
346 Serial.println("ENVIANDO");
347
348 // TRANSMITIR DATOS
349 bool tx_success = lora_transmit((uint8_t*)datos, strlen(datos));
350 if (!tx_success) {
351     Serial.println("Wait 5 seconds ...");
352     delay(5000);
353     goto join;
354 }
355
356 Serial.println("ENVIADO");
357
358 }
```