



Diseño de un prototipo IoT para la monitorización de la infraestructura civil subterránea

Jiménez González, Brenda Silvana y Moposita Zavala, Christian Xavier

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones

Ing. Montoya Lara, Luis Hernán, Msc.

10 de febrero del 2023

10/2/23, 12:12

revisión lora

Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO

Revisión TESIS - LORA

NOMBRE DEL ALUMNO

BRENDA SILVANA JIMENEZ GONZALEZ



NOMBRE DEL ARCHIVO

BRENDA SILVANA JIMENEZ GONZALEZ - revisionLoRa

SE HA CREADO EL INFORME

10 feb 2023

Resumen

Fragmentos marcados	2	0,3 %
Fragmentos citados o entrecuillados	0	0 %

Coincidencias de la Web

udistrital.edu.co	1	0,2 %
andinalinksmartcities.com	1	0,1 %



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Diseño de un prototipo IoT para la monitorización de la infraestructura civil subterránea”** fue realizado por la señorita **Jiménez González, Brenda Silvana** y el señor **Moposita Zavala, Christian Xavier**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 10 de febrero del 2023



Ing. Montoya Lara, Luis Hernán MSc.

C. C.: 1715480412



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Jiménez González, Brenda Silvana**, con cédula de ciudadanía n° 1752670818 y **Moposita Zavala, Christian Xavier**, con cédula de ciudadanía n° 1715996813, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño de un prototipo IoT para la monitorización de la infraestructura civil subterránea** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 10 de febrero del 2023

Jiménez González, Brenda Silvana
C.C.: 1752670818

Moposita Zavala, Christian Xavier
C.C.: 1715996813



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Autorización de Publicación

Nosotros, **Jiménez González, Brenda Silvana**, con cédula de ciudadanía n° 1752670818 y **Moposita Zavala, Christian Xavier**, con cédula de ciudadanía n° 1715996813, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño de un prototipo IoT para la monitorización de la infraestructura civil subterránea** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 10 de febrero del 2023

Jiménez González, Brenda Silvana
C.C.: 1752670818

Moposita Zavala, Christian Xavier
C.C.: 1715996813

Dedicatoria

Nuestro trabajo va dedicado principalmente a Dios y a nuestras familias que han sido el pilar fundamental para no decaer en los momentos difíciles y seguir adelante.

A todos aquellos estudiantes que todavía siguen en la lucha por culminar la carrera universitaria, nunca pierdan la esperanza.

Brenda Jiménez y Christian Moposita

Agradecimiento

Al finalizar nuestra etapa de vida universitaria, agradecemos a Dios por la fortaleza, sabiduría, paciencia y protección que nos ha brindado en este arduo camino para alcanzar una de nuestras metas.

Nuestro agradecimiento muy especial a nuestros padres que han sido testigos de los esfuerzos y sacrificios que vivimos durante nuestra formación profesional; gracias por su motivación, amor, comprensión y tolerancia.

Agradecer a la empresa HighSpeed Sistemas de Telecomunicación por su confianza y colaboración en el proyecto de grado.

Por último, agradecemos a nuestros amigos y compañeros con los cuales compartimos experiencias llenas de alegrías, tristezas y preocupaciones.

Brenda Jiménez y Christian Moposita

Índice de Contenido

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	6
Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo I	21
Introducción	21
Antecedentes	21
Justificación e Importancia	23
Alcance	25
Objetivos.....	26
Objetivo General	26
Objetivos Específicos	26
Capítulo II	27
Marco Teórico.....	27
Infraestructura.....	27
Infraestructura subterránea	28
Infraestructura civil subterránea de la ciudad de Quito	29
Internet de las Cosas	35
Ciudades Inteligentes.....	41
Seguridad Inteligente	43

Redes LPWAN.....	44
Tecnología Sigfox	47
Tecnología NB-IoT	48
Tecnología LoRa.....	49
Tecnología WiFi aplicado al Internet de las Cosas	57
Puntos de acceso gratuitos en el Distrito Metropolitano de Quito.....	58
Red de sensores inalámbricos	63
Plataforma IoT.....	67
Capítulo III	69
Materiales y Métodos	69
Método cualitativo	69
Método cuantitativo	69
Tecnologías empleadas en el prototipo IoT	70
Tarjeta de desarrollo LoRa	71
Heltec WiFi LoRa 32	72
Ra-01SH	73
Tarjeta de desarrollo WiFi	75
Microcontrolador	77
Raspberry Pi 3	77
Tarjeta RFID	78
Sensores.....	80

Sensor ultrasónico.....	80
Sensor de inclinación	83
Plataforma IoT.....	84
Energización de los componentes.....	84
Router D-Link DIR – 615	88
Empaquetamiento de los componentes	90
Capítulo IV	92
Desarrollo e Implementación.....	92
Tecnología LoRa.....	92
Arquitectura de la red	92
Diagrama de Bloques.....	93
Diseño del nodo final de LoRa	94
Definición del payload de LoRa	110
Diseño del Gateway	111
Configuración del servidor de la tecnología LoRa	115
Tecnología WiFi	121
Diagrama de Bloques.....	121
Diseño del nodo final.....	122
Configuración del router WiFi	132
Configuración del servidor de la tecnología WiFi.....	135
Acceso al usuario.....	136

Capítulo V	138
Pruebas y Resultados	138
Definición de escenarios	138
Implementación en los pozos de revisión	142
Pruebas de funcionamiento.....	145
Cobertura	150
Zona rural.....	150
Zona urbana.....	153
Campus Sangolquí.....	155
Análisis de resultados	156
Zona rural.....	157
Zona urbana.....	159
Dentro del campus con tecnología LoRa.....	160
Dentro del campus con tecnología WiFi	165
Conectividad	170
Consumo de energía.....	172
Costos del prototipo	176
Capítulo VI	180
Conclusiones y Recomendaciones	180
Trabajos futuros	183
Bibliografía.....	184

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Infraestructura y servicios asociados</i>	27
Tabla 2 <i>Polígonos del Distrito Metropolitano de Quito</i>	29
Tabla 3 <i>Sectores beneficiados por IoT</i>	40
Tabla 4 <i>Enfoques de las Ciudades Inteligentes</i>	41
Tabla 5 <i>Componentes de un sistema de Seguridad Inteligente</i>	44
Tabla 6 <i>Requisitos de una red LPWAN</i>	45
Tabla 7 <i>Comparación entre las diferentes tecnologías LPWAN</i>	47
Tabla 8 <i>Características de la tecnología WiFi enfocado a IoT</i>	57
Tabla 9 <i>Puntos WiFi cercanos a polígonos</i>	58
Tabla 10 <i>Componentes de los nodos sensores</i>	64
Tabla 11 <i>Características de una plataforma IoT</i>	67
Tabla 12 <i>Características de la plataforma ThingSpeak</i>	68
Tabla 13 <i>Características técnicas de la placa Heltec WiFi LoRa 32</i>	72
Tabla 14 <i>Características técnicas de la placa Ra-01SH</i>	74
Tabla 15 <i>Características técnicas de la placa NodeMCU ESP8266</i>	75
Tabla 16 <i>Características Técnicas de Heltec WiFi Kit 32</i>	77
Tabla 17 <i>Características técnicas de la tarjeta Raspberry Pi 3</i>	78
Tabla 18 <i>Características técnicas Módulo RFID MFRC 522</i>	80
Tabla 19 <i>Características técnicas del sensor ultrasónico HC – SR04</i>	82
Tabla 20 <i>Características técnicas del sensor de inclinación</i>	84
Tabla 21 <i>Características técnicas de la batería</i>	85
Tabla 22 <i>Características técnicas del módulo de carga TP4056</i>	87
Tabla 23 <i>Características técnicas del módulo elevador de voltaje</i>	88
Tabla 24 <i>Características técnicas del router D-Link DIR-615</i>	89

Tabla 25	<i>Distribución de pines de la tarjeta Heltec LoRa y componentes del nodo final</i>	95
Tabla 26	<i>Distribución de pines de la tarjeta Ra-01SH y componentes del nodo final</i>	97
Tabla 27	<i>Distribución de pines de la tarjeta WiFi y componentes del nodo final</i>	123
Tabla 28	<i>Tapas de los pozos de revisión, ubicación y distancia al Gateway</i>	140
Tabla 29	<i>Nombre del AP, ubicación y distancia del TX al RX</i>	142
Tabla 30	<i>Parámetros para la simulación de cobertura LoRa</i>	151
Tabla 31	<i>Parámetros para la simulación de la cobertura WiFi</i>	155
Tabla 32	<i>Valores RSSI de zona rural</i>	158
Tabla 33	<i>Valores RSSI en el polígono República del Salvador</i>	159
Tabla 34	<i>Valores RSSI en el polígono Naciones Unidas</i>	160
Tabla 35	<i>Valores RSSI de los puntos de prueba con tecnología LoRa</i>	165
Tabla 36	<i>Valores RSSI de los puntos de prueba con tecnología WiFi</i>	170
Tabla 37	<i>Consumo de corriente teórico del nodo final LoRa</i>	172
Tabla 38	<i>Consumo de corriente teórico del nodo final WiFi</i>	174
Tabla 39	<i>Costo del Nodo 1</i>	176
Tabla 40	<i>Costo del Nodo 2</i>	177
Tabla 41	<i>Costo del Gateway</i>	177
Tabla 42	<i>Costo del Nodo 3</i>	178
Tabla 43	<i>Costos finales del proyecto</i>	178

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Contribución de la infraestructura al desarrollo, la producción y bienestar de empresas y ciudades.</i>	28
Figura 2 <i>Polígonos del Norte 1</i>	32
Figura 3 <i>Polígonos del Norte 2</i>	32
Figura 4 <i>Polígonos del Centro - Sur</i>	33
Figura 5 <i>Polígonos del Sur-Valle</i>	33
Figura 6 <i>Polígonos del Oriente de la Ciudad</i>	34
Figura 7 <i>Proceso actual para el uso de la infraestructura civil subterránea</i>	35
Figura 8 <i>Comunicación Device to Device</i>	36
Figura 9 <i>Comunicación Device to Cloud</i>	37
Figura 10 <i>Comunicación Device to Gateway</i>	38
Figura 11 <i>Comunicación Back End Data Sharing</i>	39
Figura 12 <i>Dominios de las Ciudades Inteligentes</i>	42
Figura 13 <i>Pila del protocolo LoRaWAN</i>	50
Figura 14 <i>Arquitectura de LoRaWAN</i>	51
Figura 15 <i>Formato de mensaje de la capa física de enlace ascendente</i>	54
Figura 16 <i>Formato de mensaje de la capa física de enlace descendente</i>	54
Figura 17 <i>Formato de mensaje de la capa MAC</i>	55
Figura 18 <i>Puntos de acceso Norte 1</i>	61
Figura 19 <i>Puntos de acceso Norte 2</i>	61
Figura 20 <i>Puntos de acceso Norte – Centro</i>	62
Figura 21 <i>Puntos de acceso Sur - Valle</i>	62
Figura 22 <i>Puntos de acceso Oriente de la ciudad</i>	63
Figura 23 <i>Arquitectura de la red de sensores inalámbricos</i>	64

Figura 24	<i>Topología en estrella y malla</i>	66
Figura 25	<i>Topología en estrella y malla</i>	67
Figura 26	<i>Placa Heltec WiFi LoRa 32</i>	72
Figura 27	<i>Placa Ra-01SH</i>	74
Figura 28	<i>NodeMCU ESP8266</i>	75
Figura 29	<i>Heltec WiFi Kit 32</i>	76
Figura 30	<i>Tarjeta Raspberry Pi 3</i>	78
Figura 31	<i>Módulo RFID MFRC522 y TAGs</i>	79
Figura 32	<i>Sensor ultrasónico HC – SR04</i>	81
Figura 33	<i>Principio de funcionamiento del sensor ultrasónico</i>	81
Figura 34	<i>Tilt Switch</i>	83
Figura 35	<i>Batería de Litio 3.7 V</i>	85
Figura 36	<i>Panel Solar</i>	86
Figura 37	<i>Módulo Cargador de Batería Li-ion</i>	86
Figura 38	<i>Módulo Elevador de voltaje</i>	87
Figura 39	<i>Router D-Link DIR-615</i>	89
Figura 40	<i>Caja diseñada para el nodo final 1 y 2</i>	90
Figura 41	<i>Caja diseñada para el Gateway LoRa</i>	91
Figura 42	<i>Caja diseñada para el nodo final con tecnología WiFi</i>	91
Figura 43	<i>Arquitectura de la red</i>	92
Figura 44	<i>Diagrama de Bloques de la tecnología LoRa</i>	93
Figura 45	<i>Diagrama esquemático de la tecnología LoRa con tarjeta Heltec</i>	94
Figura 46	<i>Diagrama esquemático de la tecnología LoRa con tarjeta Ra-01SH</i>	96
Figura 47	<i>Diagrama de flujo del transmisor</i>	98
Figura 48	<i>Diagrama de flujo de la función medirDistancia</i>	99
Figura 49	<i>Diagrama de flujo de la función inclinación</i>	100

Figura 50	<i>Diagrama de la función selector</i>	101
Figura 51	<i>Diagrama de flujo de la función inicial</i>	102
Figura 52	<i>Diagrama de flujo de la función encenderR</i>	102
Figura 53	<i>Diagrama de flujo de la función encenderV</i>	103
Figura 54	<i>Diagrama de flujo de la función RFID_check</i>	104
Figura 55	<i>Diagrama de flujo de la función spi_select</i>	105
Figura 56	<i>Diagrama de flujo de la función sensores</i>	106
Figura 57	<i>Diagrama de flujo de la función comparaUID</i>	107
Figura 58	<i>Diagrama de flujo de la función LORA_send</i>	108
Figura 59	<i>Implementación del primer nodo final LoRa</i>	109
Figura 60	<i>Implementación del segundo nodo final LoRa</i>	110
Figura 61	<i>Payload de LoRa definido</i>	111
Figura 62	<i>Diagrama de flujo del receptor</i>	112
Figura 63	<i>Diagrama de flujo del Gateway</i>	113
Figura 64	<i>Implementación de Gateway LoRa</i>	114
Figura 65	<i>Página oficial de ThingSpeak</i>	115
Figura 66	<i>Registro de usuario</i>	116
Figura 67	<i>Interfaz gráfica de usuario</i>	116
Figura 68	<i>Creación de canales</i>	117
Figura 69	<i>Dashboard del nodo final</i>	117
Figura 70	<i>Configuración de las gráficas de los campos</i>	118
Figura 71	<i>Tipos de widgets</i>	119
Figura 72	<i>Configuración del widget indicador de lámpara</i>	119
Figura 73	<i>Configuración del widget display numérico</i>	120
Figura 74	<i>Canales creados para la tecnología LoRa</i>	120
Figura 75	<i>Diagrama de Bloques de la tecnología WiFi</i>	121

Figura 76	<i>Diagrama esquemático de la tecnología WiFi</i>	122
Figura 77	<i>Diagrama de flujo principal de la tecnología WiFi</i>	124
Figura 78	<i>Diagrama de flujo de la función medirDistancia</i>	125
Figura 79	<i>Diagrama de flujo de la función inclinación</i>	126
Figura 80	<i>Diagrama de la función selector</i>	127
Figura 81	<i>Diagrama de flujo de la función inicial</i>	128
Figura 82	<i>Diagrama de flujo de la función encenderR</i>	128
Figura 83	<i>Diagrama de flujo de la función encenderV</i>	129
Figura 84	<i>Diagrama de flujo de la función RFID_check</i>	130
Figura 85	<i>Diagrama de flujo de la función comparaUID</i>	131
Figura 86	<i>Implementación del nodo final WiFi</i>	132
Figura 87	<i>Ingreso a la red del router DIR-615</i>	132
Figura 88	<i>Configuración del router en modo repetidor</i>	133
Figura 89	<i>Direccionamiento por DHCP del router</i>	133
Figura 90	<i>Selección de la red inalámbrica a amplificar</i>	134
Figura 91	<i>Configuración del nombre y contraseña de la red</i>	134
Figura 92	<i>Resumen de las configuraciones del router</i>	135
Figura 93	<i>Dashboard del nodo final WiFi</i>	136
Figura 94	<i>Visualización de canales</i>	137
Figura 95	<i>Interfaz gráfica en el ordenador</i>	137
Figura 96	<i>Ubicación del Gateway en zona rural</i>	138
Figura 97	<i>Ubicación del Gateway en zona urbana</i>	139
Figura 98	<i>Ubicación de las tapas y Gateway LoRa en la Universidad de las Fuerzas Armadas</i>	140
Figura 99	<i>Ubicación de tapas y Access Point WiFi en la Universidad de las Fuerzas Armadas</i>	141

Figura 100	<i>Implementación del nodo final con tecnología LoRa</i>	143
Figura 101	<i>Implementación del Gateway</i>	144
Figura 102	<i>Implementación del nodo final con tecnología WiFi</i>	145
Figura 103	<i>Escenarios para pruebas de funcionamiento</i>	146
Figura 104	<i>Indicador de alarma no autorizado activado por sensores</i>	147
Figura 105	<i>Indicador de alarma no autorizado</i>	148
Figura 106	<i>Indicador de alarma autorizado</i>	148
Figura 107	<i>Archivo de datos exportados de la plataforma ThingSpeak</i>	149
Figura 108	<i>Pruebas de funcionamiento del Gateway</i>	150
Figura 109	<i>Ubicación del Gateway sobre la Ruta Viva</i>	151
Figura 110	<i>Cobertura Gateway 1 – Ruta Viva</i>	152
Figura 111	<i>Cobertura Gateway 2 – Ruta Viva</i>	152
Figura 112	<i>Ubicación del Gateway en zona urbana</i>	153
Figura 113	<i>Cobertura Zona Urbana</i>	154
Figura 114	<i>Cobertura dentro del campus Tecnología LoRa</i>	155
Figura 115	<i>Cobertura dentro del campus Tecnología WiFi</i>	156
Figura 116	<i>Valores RSSI de zona rural</i>	157
Figura 117	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N1 Bar</i>	161
Figura 118	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N2 Canchas 1</i>	161
Figura 119	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N3 Laboratorios Electrónica</i>	162
Figura 120	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N4 Bloque D</i>	162
Figura 121	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N5 Ed. Administrativo</i>	163
Figura 122	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N6 Residencia</i>	163
Figura 123	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N7 Canchas 2</i>	164
Figura 124	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N8 CICTE</i>	164
Figura 125	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N1 Bar</i>	166

Figura 126	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N2 Canchas 1</i>	166
Figura 127	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N3 Laboratorios Electrónica</i>	167
Figura 128	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N4 Bloque D</i>	167
Figura 129	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N5 Ed. Administrativo</i>	168
Figura 130	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N6 Residencias</i>	168
Figura 131	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N7 Canchas 2</i>	169
Figura 132	<i>Gráfica de valores de RSSI de la tapa N8 CICTE</i>	169
Figura 133	<i>Dispositivos conectados a la red</i>	171
Figura 134	<i>Petición ICMP a la Raspberry Pi</i>	171
Figura 135	<i>Petición ICMP al módulo WiFi</i>	172
Figura 136	<i>Consumo de corriente práctico del nodo final LoRa</i>	173
Figura 137	<i>Consumo de corriente práctico del nodo final WiFi</i>	175

Resumen

Como sociedad se necesita estar interconectados entre empresas, hogares, áreas públicas y privadas, por lo que, ha existido un aumento de las redes físicas que se instalan en la ciudad de Quito como redes de telecomunicaciones y energía provocando la saturación de cables, contaminación visual y falta de estética urbana. Para mejorar estos problemas se ha empezado a construir una infraestructura civil subterránea que alojan componentes de telecomunicación de uso exterior, siendo una característica de las ciudades inteligentes. Sin embargo, existe una problemática con la gestión de acceso al sistema de soterramiento puesto que el proceso no es ordenado y carece de automatización. En la última década ha cobrado gran importancia el Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*) brindando facilidades de monitorización, prevención y reacción oportuna en diferentes entornos. La tecnología IoT y las ciudades inteligentes se relacionan directamente, por lo cual se plantea el uso de una red de área amplia de baja potencia (LPWAN, del inglés *Low Power Wide Area Networks*) debido a sus ventajas como la larga duración y bajo consumo energético, específicamente, se usó la tecnología LoRa (del inglés *Long Range*). Además, se ocupó la tecnología (WiFi, del inglés *Wireless Fidelity*) debido a que actualmente existen redes inalámbricas desplegadas y gratuitas dentro de la ciudad. El presente proyecto se enfocó en la detección de la apertura de la tapa del pozo a través de variables como la inclinación y proximidad, de igual forma se determina el acceso autorizado mediante una identificación y para la visualización de datos se ocupó una plataforma IoT.

Palabras clave: internet de las cosas, ciudades inteligentes, infraestructura civil subterránea, LoRa y WiFi.

Abstract

As a society we need to be interconnected between companies, homes, public and private areas. Therefore, there has been an increase of physical networks that are installed in the city of Quito as telecommunications and energy networks cause cable saturation, visual pollution and a lack of urban aesthetics. To improve these problems, a subway civil infrastructure has started to be built to house telecommunication components for outdoor use, which is a characteristic of smart cities. However, there is a problem with access to this underground system since the process is not orderly and lacks automation. In the last decade, the Internet of Things (IoT) has gained great importance, providing monitoring, prevention and timely reaction facilities in different environments. IoT technology and smart cities are directly related, so the use of a low power wide area network (LPWAN) was proposed due to its advantages, such as long life and low energy consumption, specifically the use of LoRa (Long Range) technology. In addition, WiFi (Wireless Fidelity) technology was also used due to the fact that there are currently free wireless networks deployed in the city. This project focuses on the detection of the opening of the manhole cover through variables such as inclination and proximity, as well as determining authorized access through identification. Finally, for data visualization, an IoT platform was used.

Keywords: internet of things, smart cities, underground civil infrastructure, LoRa and WiFi.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

Actualmente en América Latina se construye y se incentiva a la construcción de ciudades inteligentes, término que hace referencia al cambio urbano, desarrollando tecnologías que mejoren la vida de los ciudadanos. En una ciudad del futuro es importante tener un alto grado de desarrollo en las tecnologías de la información y comunicaciones (TIC), además el uso de aplicaciones y servicios digitales. En (Navas, 2020) presenta el modelo de Ciudad Inteligente para la medición del ranking Índice de Ciudades Inteligentes del Ecuador (ICIE) que tiene seis criterios de evaluación: acceso TIC, uso de internet, capital humano, economía, seguridad y armonía. En base a los parámetros mencionados se posiciona a la ciudad de Quito en tercer lugar, predominando en el acceso a las TIC, uso de internet y economía. Para la formación de una ciudad inteligente es indispensable conocer sobre las actuales tecnologías o mecanismos que permiten desarrollar aplicaciones enfocadas al Internet de las Cosas.

LPWAN y WiFi son dos tecnologías que se implementan en el ámbito de IoT, por lo tanto, es necesario mencionar ciertas características que resaltan entre ellas. LPWAN se destaca por el envío de pequeños paquetes de datos, largo alcance y bajo consumo de energía, mientras que, en WiFi sobresale el ancho de banda, pero no en la duración de la batería, según lo menciona (Moko LoRa, 2021).

En (Kumar et al., 2022) se realiza un estudio sobre la resiliencia de la red mediante la tecnología LPWAN y WiFi, en el cual menciona que para aplicaciones que necesitan seguridad, es indispensable mantener la conectividad permanente para la entrega de mensajes. En el caso de WiFi, si existiera un corte de energía o una falla de conexión se podría retrasar o perder información y el tiempo de recuperación de conectividad sería incierto, para ello se

propone el uso de la tecnología LPWAN, a través de la cual se podrían enviar los datos y adaptarse a los parámetros necesarios. Al trabajar de la mano dichas tecnologías se pretende que el dispositivo IoT de borde seleccione la tecnología en base a los requisitos de la aplicación.

Existen ciertas características que son importantes analizar al momento de seleccionar la tecnología IoT que se ocupará en ciertas aplicaciones. Una de ellas es el consumo de energía, según (García et al., 2019) realizó pruebas en la placa de desarrollo ESP32/SX1278 y menciona que los resultados para WiFi y LoRa son similares con potencias de transmisión de 17 dBm o 18 dBm. Sin embargo, la potencia de transmisión de LoRa es directamente proporcional a la cobertura, pero inversamente proporcional al consumo de batería.

Existen diferentes proyectos donde se han implementado diversas soluciones IoT enfocados a la seguridad. En el trabajo de (Baquero & Martínez, 2020) realizaron un prototipo para la detección del robo de tapas de pozos de inspección a través de un sensor de vibración, el cual activa una alarma si detecta que existe un robo. Además, dicho sensor se encuentra calibrado para limitar las vibraciones que no son normales en un hurto, como el cruce de autos, animales, personas, bicicletas, entre otros. En resumen, mencionan que el proyecto realizado es viable puesto que es de bajo costo, mejorando considerablemente el sistema de seguridad de los elementos internos, de igual forma reduce el costo de la sustitución de una nueva tapa.

Por otro lado, en (Galindo Iván & Acosta Jonathan, 2021) diseñaron un prototipo que tiene la finalidad de monitorear el estado de las tapas de alcantarillado basado en IoT, el cual menciona que el hurto de las mismas trae consecuencias graves como accidentes de tránsito, lesiones en seres humanos, problemas ambientales, entre otros. Para detectar el estado abierto o cerrado de la tapa seleccionaron y ubicaron en la misma dos tipos de sensores, un giroscopio acelerómetro para precisar el movimiento rápido y lento; y un sensor de proximidad

para la detección de objetos a una cierta distancia. Utilizaron dos tecnologías, GPS (del inglés *Global Positioning System*) y LPWAN. Para el análisis y visualización de los datos emplearon la plataforma IoT de Ubidots. Como resultados finales alcanzaron una cobertura de 2800 m con línea de vista para conectividad y una potencia de salida de +20 dBm a una frecuencia de 868/915 MHz.

Justificación e Importancia

Las ciudades inteligentes no son solo un sueño del futuro, son un marco en el cual predomina las Tecnologías de la Información y la Comunicación, para desarrollar, implementar y promover prácticas de desarrollo sostenible para abordar los crecientes desafíos de la urbanización (Llanca, 2017). Hoy en día, existen soluciones formidables e innovadoras gracias al Internet de las Cosas, muchas de ellas se expanden rápidamente debido al desarrollo de la tecnología de dispositivos electrónicos que generalmente son inalámbricos y se pueden integrar a una red de sensores y datos para solventar varias problemáticas que se presentan en las ciudades. Debido a sus características las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) permiten conectar y mejorar la infraestructura, eficiencia, conveniencia y la calidad de vida de los ciudadanos. Por otro lado, actualmente el Municipio de Quito aprovecha la tecnología inalámbrica (WiFi) para dar acceso a internet en espacios públicos a través de puntos de acceso de forma gratuita, por lo cual se considera como otra opción para realizar la implementación (Jimbo et al., 2017).

En el Distrito Metropolitano de Quito se ha observado una gran cantidad de cableado aéreo, por lo que se ha visto en la necesidad de desplazar las redes de servicios de datos y energía hacia una infraestructura civil subterránea, puesto que mejoraría la imagen de la ciudad. Para hacer uso del mismo, el Artículo 7 de la Norma Técnica para Despliegue de Redes Físicas Soterradas de ARCOTEL, señala que se debe establecer un acuerdo de compartición de infraestructura de soterramiento y un manual de convivencia entre los

diferentes prestadores que tengan acceso u ocupen la infraestructura subterránea (ARCOTEL, 2017).

Con lo mencionado anteriormente, existe una problemática con la gestión de acceso para hacer uso de la infraestructura puesto que se requiere de un trámite bastante extenso y tedioso, además, el proceso tiene falta de organización porque las solicitudes se realizan de forma física o a través de un correo electrónico, es decir, son métodos de acceso no viables que no garantiza la vigilancia en su totalidad. En consecuencia, se genera un retraso en la aprobación de las solicitudes que muchas veces no son contestadas a tiempo o quedan sin respuesta (Quinga, 2019). Esta mala administración ha hecho que las entidades o empresas de telecomunicaciones no cumplan dicho procedimiento, afectando directamente al Municipio de Quito; en los lugares donde se han construido el sistema de soterramiento no existe la seguridad necesaria por lo que cualquier empresa ajena o ciudadano puede hacer uso del mismo. Por otro lado, al generarse algún desperfecto dentro de las redes ya instaladas en el soterramiento no se podría identificar al responsable de dicho acto porque no se lleva un control de acceso adecuado.

Basado en lo descrito anteriormente se plantea el desarrollo de un sistema de control que detecte la apertura anormal del sistema de soterramiento y emita una señal de alarma. Por lo tanto, el sistema permitirá la adquisición de parámetros provenientes de sensores, a través de un circuito analógico digital que sea capaz de distinguir si se ejecuta una acción permitida o no autorizada. A su vez los parámetros obtenidos serán procesados a través de una plataforma IoT que funciona con las tecnologías LoRa y WiFi, posteriormente se realizará una evaluación de las mismas.

Alcance

El presente proyecto de investigación tiene la finalidad de diseñar un prototipo IoT de bajo costo, orientada a ciudades inteligentes, a través de la tecnología LoRa y WiFi, con el propósito de mejorar la monitorización del acceso a la infraestructura civil subterránea del Distrito Metropolitano de Quito.

En general, el sistema de monitorización cuenta con un módulo RFID (del inglés *Radio Frequency Identification*) que permite la identificación del usuario. Además, se emplea un sensor de inclinación y un sensor de proximidad, que ayudan a detectar la apertura de las tapas de los pozos de revisión cuando no se ha efectuado la lectura de una tarjeta RFID. Dichos sensores se encuentran dentro del pozo de la infraestructura civil subterránea, mientras que, para el ingreso de la tarjeta RFID se ha colocado una ranura en la caja del prototipo. A través de dos indicadores led de estado de alarma se determina si el acceso es autorizado o no. Adicionalmente el equipo dispone de un sistema de energía autónomo para satisfacer el consumo de las cargas eléctricas. El usuario puede visualizar los datos obtenidos a través de un dashboard creado en una plataforma IoT para obtener un registro de alertas y valores mediante gráficos y gadgets.

En el caso de la tecnología LoRa, la red está compuesta por dos nodos y un Gateway, la diferencia entre nodos radica en la utilización de tarjetas de desarrollo LoRa, con la finalidad de comprobar que el Gateway recepte los datos correctamente de diferentes marcas comerciales. En cuanto a la tecnología WiFi, se implementa un nodo final que se conectará a un punto de acceso con conexión a internet para el envío de datos a su respectivo dashboard. Con la implementación de dichas redes con distintas tecnologías se podrá encontrar la mejor solución a la problemática propuesta mediante la evaluación de los niveles de interferencia y atenuación.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un prototipo IoT para la monitorización de la infraestructura civil subterránea.

Objetivos Específicos

- Realizar el marco teórico sobre la monitorización del sistema de soterramiento mediante las tecnologías LoRa y WiFi.
- Dimensionar los dispositivos electrónicos para la construcción del prototipo detector de acceso al sistema de soterramiento.
- Diseñar una red con tecnología LoRa para el envío de datos desde la entrada del sistema de soterramiento hacia el Gateway.
- Emplear la tecnología WiFi para el envío de datos capturados por los sensores hacia su respectiva plataforma IoT.
- Visualizar los datos de acceso al sistema de soterramiento a través de una plataforma IoT.
- Comprobar el rendimiento en función del consumo de energía, transferencia de datos y detección de señales por parte de los sensores.
- Evaluar las tecnologías LoRa y WiFi para su respectivo análisis de desempeño.

Capítulo II

Marco Teórico

Infraestructura

Una infraestructura permite minimizar zonas en conflicto, reduce las barreras comerciales para aumentar las funciones de productividad, producción y el crecimiento económico. Especialmente en áreas urbanas, se alcanza un alto porcentaje en el mercado laboral, bienes o ideas obteniendo un impacto directo sobre la eficiencia socioeconómica de la infraestructura. Su mayor beneficio es su larga vida útil. En la Tabla 1, se presenta los proyectos de infraestructura que son muchos y diversos (Bourguignon & Pleskovic, 2005).

Tabla 1

Infraestructura y servicios asociados

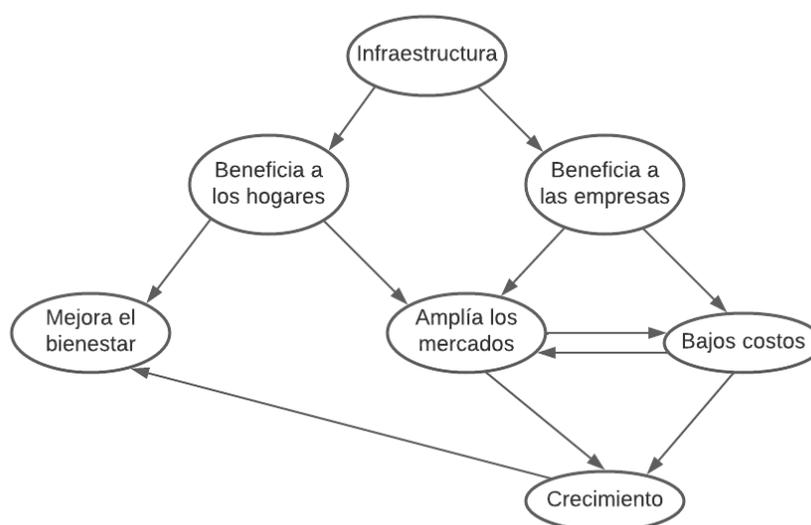
Servicio	Infraestructura asociada
Transporte	Carreteras, puentes, túneles, vías férreas.
Suministro de agua	Represas, reservorios, tuberías, plantas de tratamiento.
Drenaje de agua	Alcantarillas, planta de tratamiento de agua residuales
Irrigación	Represas, canales.
Contenedor de basura	Desechos, incineradores.
Calefacción urbana	Plantas y redes.
Telecomunicaciones	Centrales telefónicas, líneas telefónicas, redes informáticas, internet.
Energía	Plantas de energía, líneas de transmisión y distribución.

Nota. Recuperado de (Bourguignon & Pleskovic, 2005).

Según estudios el uso de infraestructuras depende del servicio, aunque, las empresas presentan un porcentaje más alto de uso. En la Figura 1, se muestra como la infraestructura afecta al desarrollo (Bourguignon & Pleskovic, 2005).

Figura 1

Contribución de la infraestructura al desarrollo, la producción y bienestar de empresas y ciudades.



Nota. Recuperado de (Bourguignon & Pleskovic, 2005)

Una de las ventajas de la infraestructura es que reducen el costo de alguno de los insumos utilizados por las empresas. Acerca de la energía, el transporte y sobre todo las infraestructuras de telecomunicaciones pueden disminuir los costos en grandes cantidades generando un progreso tecnológico (Bourguignon & Pleskovic, 2005).

Infraestructura subterránea

La infraestructura subterránea es un sistema de soporte vital para las ciudades inteligentes, el uso del soterramiento urbano puede ayudar a las ciudades a alcanzar el

desarrollo sostenible siempre y cuando tengan planificaciones a largo plazo. Para ello es necesario tener un enfoque holístico de planificación de usos múltiples, tomando en cuenta efectos geológicos, medio ambientales, eficiencia económica, aceptabilidad social del desarrollo del soterramiento, seguridad y control de acceso. De esta manera los recursos no serán afectados para generaciones futuras. La seguridad de una infraestructura subterránea tiene un gran impacto en relación a los puntos de acceso que suelen ser difíciles de controlar y asegurar, por lo cual no se puede afirmar la no presencia de posibles intrusos o ladrones (Goel et al., 2012).

Infraestructura civil subterránea de la ciudad de Quito

Las zonas urbanas del DMQ (Distrito Metropolitano de Quito) presentan un alto crecimiento y densificación generando grandes demandas de servicios, como el alumbrado público, redes de telecomunicaciones, videovigilancia, entre otros, ofrecidas por empresas públicas o privadas. Por dicha razón, el Municipio ha decidido mejorar la imagen urbana eliminando los tendidos de cables aéreos a través de la construcción de ductos subterráneos en las aceras. Actualmente en el DMQ, existen 84,209 km de redes soterradas y 1694 tapas instaladas en 44 polígonos a una distancia promedio de 50 m entre sí, en la Tabla 2 se describe a mayor detalle su distribución (Secretaría de Territorio, 2022).

Tabla 2

Polígonos del Distrito Metropolitano de Quito

N°	Nombre del polígono	Distancia [m]	N° Tapas
1	Boulevard Amazonas Fase 1 Etapa1	1050	21
2	Av Napo	4500	90
3	Boulevard Colón	3300	66
4	Intercambiador Carapungo	3650	73

N°	Nombre del polígono	Distancia [m]	N° Tapas
5	Intercambiador Eloy Alfaro Granados Río Coca	2900	58
6	José Alemán	2400	48
7	Mariscal 1	5940	119
8	Mariscal 2	12500	250
9	Boulevard NNUU	1450	29
10	República del Salvador	12500	250
11	Arenas	1400	28
12	Intercambiador del Condado	3200	64
13	Gribaldo Miño	700	14
14	Ruta Viva	15200	304
15	Puente Baquerizo Moreno	80	2
16	Estación Metro Cardenal de la Torre	990	20
17	Estación Metro Ñaquito	490	10
18	Estación Metro Jipijapa	1100	22
19	Estación Metro Quitumbe	1850	37
20	Estación Metro Morán Valverde	1000	20
21	Estación Metro Universidad Central	500	10
22	Estación Metro Solanda	500	10
23	Estación Metro Pradera	980	20
24	Fedecomip	180	4
25	Catalina Aldaz	680	14
26	Edificio Torre 6	80	2
27	Aquarela	450	9

N°	Nombre del polígono	Distancia [m]	N° Tapas
28	Yoo Quito	180	4
29	Yoo Cumbaya	300	6
30	Ciclista (Ecopark)	585	12
31	Pucará	98	2
32	CC Scala	310	7
33	Plaza Pomasqui	230	5
34	Equivida	119	3
35	Casanova	70	2
36	JEPP	121	3
37	Paseo San Francisco – Lumbisi	490	10
38	Hospital IESS Sur	670	14
39	Calle Loja	344	7
40	Prados de San Mateo	165	4
41	Urbanización Kentia	91	2
42	Pillagua - Barranco	115	3
43	Edificio Kiro	141	3
44	Plaza Quitumbe	610	13
	TOTAL	84209	1694

Nota. Recuperado de (Secretaría de Territorio, 2022)

A través del software Google Earth se colocaron los polígonos del Distrito Metropolitano de Quito según su distribución y ubicación para tener mejor visibilidad del campo de trabajo. Desde la Figura 2 a la Figura 6 se muestran los polígonos que fueron divididos por varios sectores del Distrito Metropolitano de Quito para su entendimiento.

Figura 2

Polígonos del Norte 1

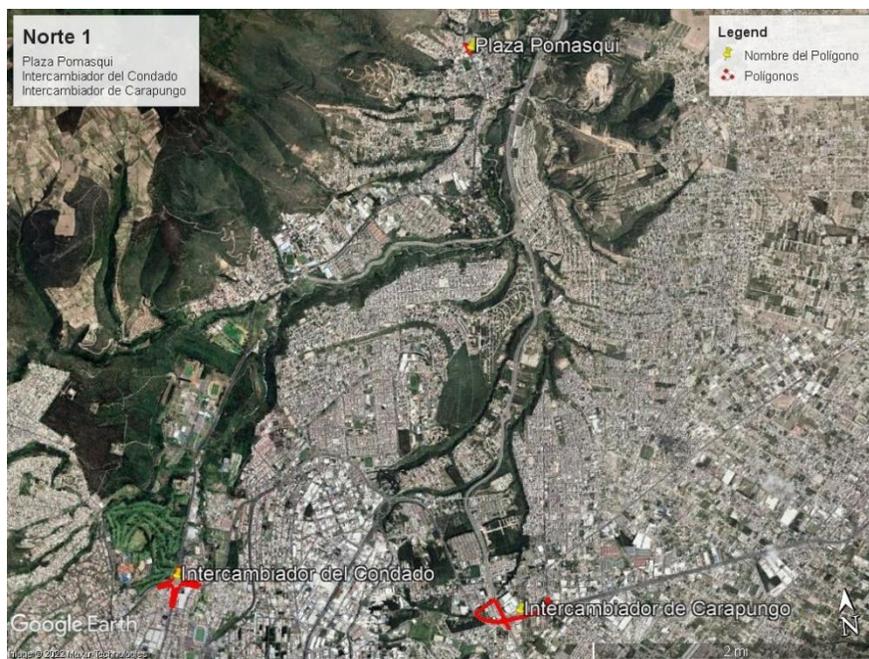


Figura 3

Polígonos del Norte 2

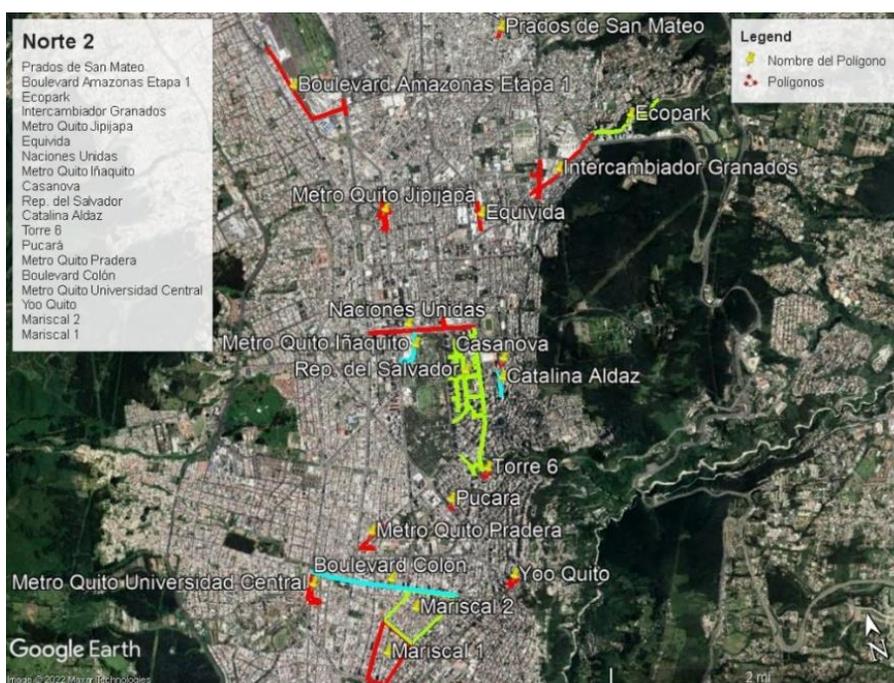


Figura 4

Polígonos del Centro - Sur

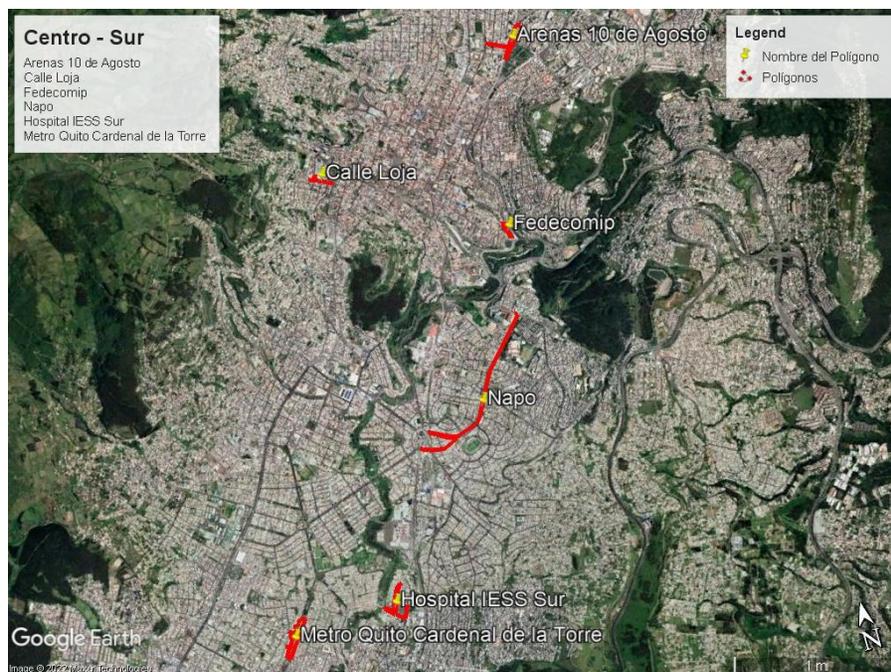


Figura 5

Polígonos del Sur-Valle

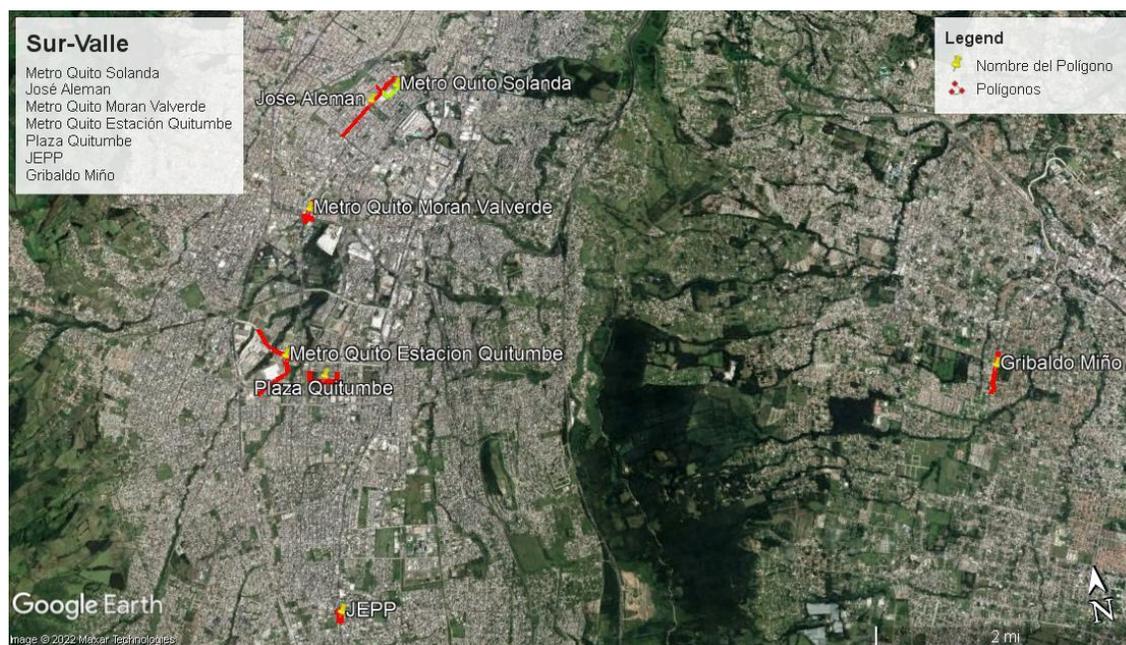
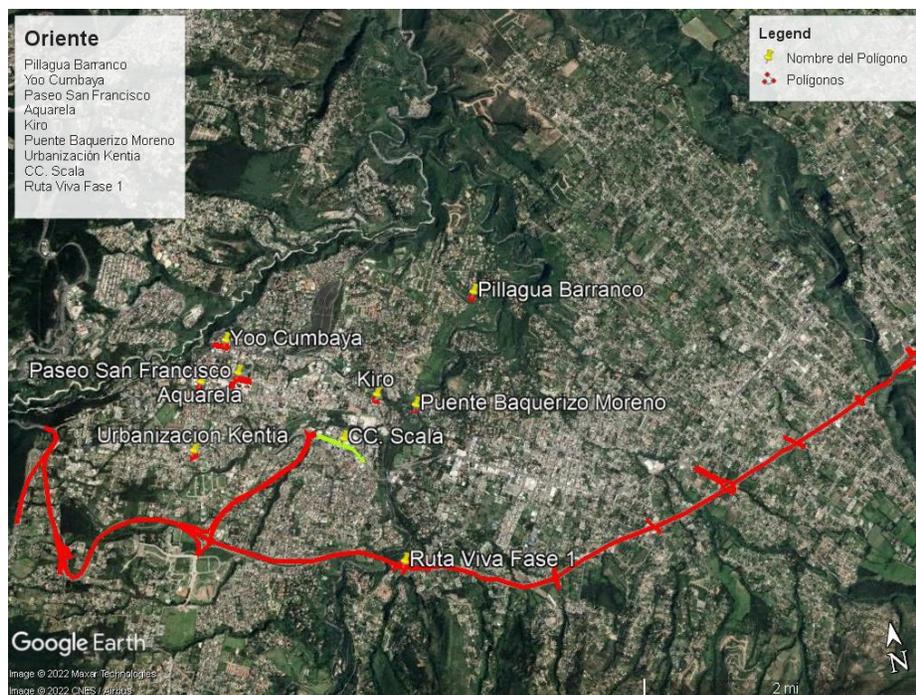
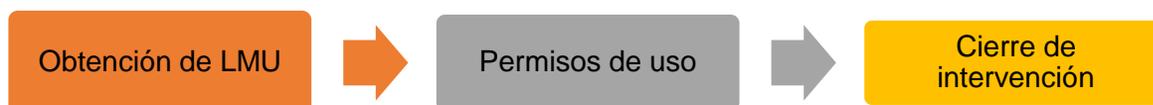


Figura 6*Polígonos del Oriente de la Ciudad***Procedimiento para el uso de la infraestructura**

Para el acceso a la infraestructura civil subterránea es necesario que las empresas públicas y privadas cumplan con una serie de requisitos como formularios y trámites en las entidades que gestionan el uso. Cada uno de los documentos deben ser realizados a detalle con responsabilidad y determinación en las actividades que se van a ejecutar. Durante la instalación se debe llevar los documentos que autoricen el acceso a la infraestructura para evitar inconvenientes con las autoridades competentes (Quinga, 2019). En la Figura 7, se muestra el procedimiento actual para el uso de la infraestructura civil subterránea.

Figura 7

Proceso actual para el uso de la infraestructura civil subterránea



La LMU 40 (Licencia Metropolitana Urbanística de Utilización 40) es otorgado por la Unidad de Reordenamiento de Redes de la Secretaria de Territorio, Hábitat y Vivienda a las empresas públicas y privadas, permite el aprovechamiento del espacio público para la instalación de redes de servicio (Quinga, 2019).

Permisos de uso: para la implementación de redes de servicios de telecomunicaciones es necesario solicitar permisos adicionales a la Corporación Nacional de Telecomunicaciones, es un formulario que detalla la cantidad de redes de servicio que será implementado en la infraestructura subterránea y deberá tener las firmas de la empresa solicitante o el responsable (Quinga, 2019).

Cierre de la intervención: en este punto se realiza la verificación de que la infraestructura haya sido utilizada de manera correcta, basada en el objetivo propuesto y finalizado en perfecto estado por parte de los técnicos responsables (Quinga, 2019).

Internet de las Cosas

El Internet de las Cosas (IoT), fue empleado por primera vez en el año de 1999 por el precursor tecnológico Kevin Ashton para describir una red en el que los dispositivos de todo el mundo físico puedan conectarse a Internet de tal forma que recopilen e intercambien datos con otros dispositivos y sistemas haciendo uso de sensores. En la actualidad, el Internet de las Cosas ha trascendido llegando a convertirse en un término popular el cual describe ambientes donde la conexión a Internet y la capacidad de computación se relacionan con una gran

variedad de dispositivos, sensores y objetos de uso cotidiano, dando paso a una serie de tendencias informáticas y de conectividad que han ido evolucionando y creciendo (Singhania, 2015).

Modelos de comunicación del Internet de las cosas

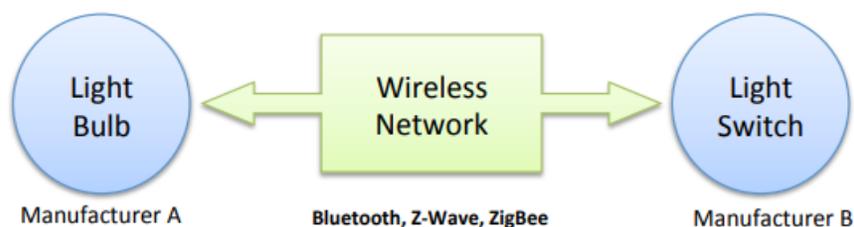
IoT posee diferentes maneras de comunicación entre dispositivos, a continuación, se detallan cuatro de modelos de comunicación que comúnmente utilizan los dispositivos IoT (Manyika et al., 2015).

Comunicación Device to Device

Modelo en el cual se presentan dos o más dispositivos conectados y comunicados directamente entre sí mediante muchos tipos de redes, como redes IP o Internet, sin embargo, emplean protocolos como Bluetooth, Z-Wave⁴¹ o ZigBee⁴² con el fin de establecer comunicaciones directas de dispositivo a dispositivo, como se muestra en la Figura 8 (Manyika et al., 2015).

Figura 8

Comunicación Device to Device



Nota. Recuperado de (Manyika et al., 2015).

Device to Device permite que los dispositivos con un determinado protocolo se comuniquen e intercambien información y así cumplir su función. Se utiliza en sistemas de

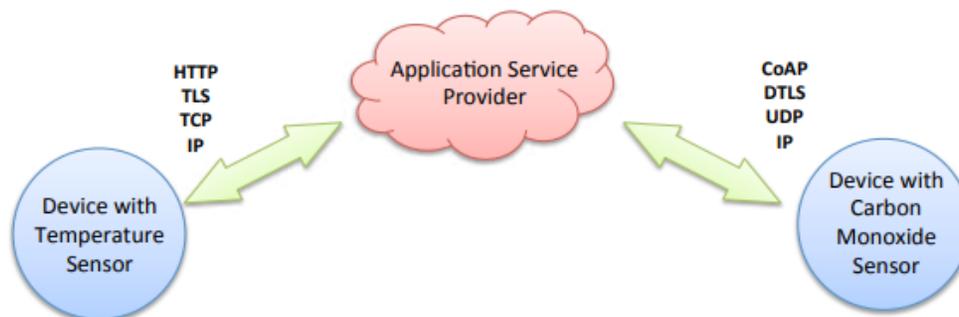
automatización del hogar, ya que para funcionar necesitan relativamente poco ancho de banda y baja velocidad de transferencia de información (Manyika et al., 2015).

Comunicación Device to Cloud

Modelo cuyo dispositivo IoT se conecta directamente a un servicio a Internet en la nube para intercambiar datos y controlar el tráfico de mensajes a través de conexiones tradicionales ya sea Ethernet o Wi-Fi entre el dispositivo y la red IP, que posteriormente se conectará al servicio en la nube, como se muestra en la Figura 9 (Manyika et al., 2015).

Figura 9

Comunicación Device to Cloud



Nota. Recuperado de (Manyika et al., 2015).

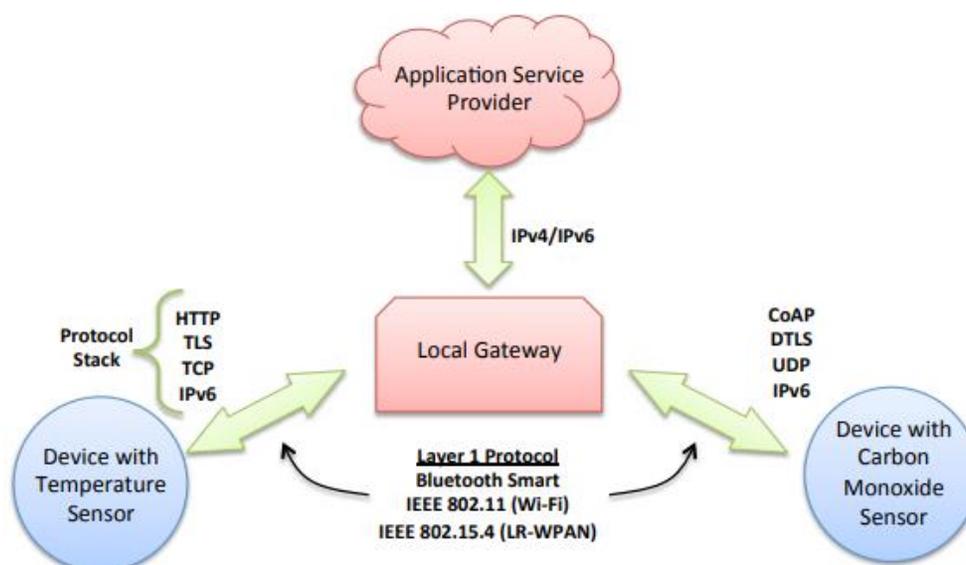
Device to Cloud generalmente se emplea en algunos dispositivos IoT de consumo populares como lo es una Smart TV ya que emplea una conexión a Internet, transmite información que ve el usuario para su análisis y activa funciones de reconocimiento de voz interactivo del televisor, añadiendo valor al usuario final al ampliar las capacidades del dispositivo más allá de sus funciones nativas (Manyika et al., 2015).

Modelo Device to Gateway

Modelo donde el dispositivo IoT se conecta a través de un servicio ALG (del inglés *Application Layer Gateway*) como medio para llegar a un servicio en la nube, con el fin proporcionar seguridad y otras funciones como la traducción de datos o protocolos, como se muestra en la Figura 10 (Manyika et al., 2015).

Figura 10

Comunicación Device to Gateway



Nota. Recuperado de (Manyika et al., 2015).

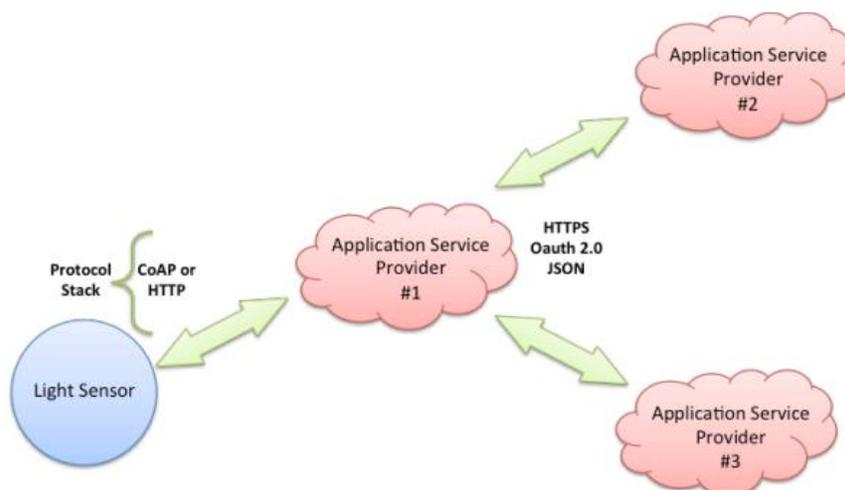
Device to Gateway se utiliza en diversos casos el más común es un smartphone que ejecuta una aplicación para comunicarse con un dispositivo y así transmitir datos a un servicio en la nube. Otro ejemplo de este modelo son los dispositivos "hub" en aplicaciones de automatización del hogar ya que sirven de Gateway local entre los dispositivos individuales del IoT y un servicio en la nube. La ventaja de este modelo es que puede integrar nuevos dispositivos inteligentes en un sistema heredado con dispositivos que no son interoperables de forma nativa con ellos (Manyika et al., 2015).

Modelo Back End Data Sharing

Es una arquitectura de comunicación que permite al usuario exportar y analizar datos de los objetos inteligentes desde un servicio en la nube combinando datos de otras fuentes, es decir, el usuario puede conceder el acceso a los datos de los sensores a terceros, permitiendo agregar y analizar datos recogidos de un solo dispositivo IoT, como se muestra en la Figura 11 (Manyika et al., 2015).

Figura 11

Comunicación Back End Data Sharing



Nota. Recuperado de (Manyika et al., 2015).

Back End Data Sharing se puede emplear en un edificio corporativo, donde, el usuario a cargo de múltiples oficinas necesite consolidar y analizar datos consumo de energía y servicios públicos producidos por todos los sensores IoT habilitados en las instalaciones. Este modelo sugiere un enfoque de servicios federados en la nube o API's (del inglés *Applications Programmer Interfaces*) en la nube con el fin de lograr interoperabilidad de datos de los dispositivos inteligentes alojados en la nube (Manyika et al., 2015).

Aplicaciones IoT

El Internet de las Cosas ofrece grandes ventajas como la eficiencia, ahorros de tiempo y dinero e impulsa a los gobiernos, consumidores y ecosistemas al desarrollo e innovación, cerrando la brecha entre el mundo físico y digital, a continuación, en la Tabla 3, se muestran escenarios que son beneficiados por el IoT (Höller et al., 2014).

Tabla 3

Sectores beneficiados por IoT

Escenario	Descripción
Salud	Dispositivos para controlar y mantener la salud y el bienestar de los seres humanos, obteniendo una mejor gestión de enfermedades y monitoreo de bienes y servicios para una mayor productividad.
Automotor	Sistemas para vehículos, mantenimiento y detección de fallas, diseño basado en el uso del automotor y análisis de preventa.
Fabricación	Entornos de producción estandarizados donde se incluye una eficiencia operativa, efectuando una optimización del uso de equipos e inventario.
Infraestructuras	Espacios de trabajo personalizados en el cual la eficiencia operativa, el mantenimiento predictivo y la seguridad juegan un papel importante, mejorando la gestión.
Ciudades Inteligentes	Espacios públicos en entornos urbanos que necesitan un control adaptativo y medioambiental, y a su vez una gestión de recursos y seguridad.
Transporte	Sistemas de control de vías férreas, vehículos autónomos, control y enrutamiento en tiempo real de vuelos, navegación conectada y seguimiento de paquetería.
Hogar	Controladores y sistemas de seguridad para el hogar.

Nota. Recuperado de (Höller et al., 2014).

Ciudades Inteligentes

Una ciudad es inteligente cuando promueve el desarrollo integrado y sostenible para maximizar la economía y mejorar el entorno social y medioambiental con la ayuda de las Tecnologías de la Información y Comunicación TIC's, garantizando una solución a las necesidades actuales y futuras. Las ciudades inteligentes ofrecen grandes ventajas ya que generan espacios más seguros, con mejores servicios y ambientes que incentivan soluciones creativas que dan paso a grandes oportunidades de empleo y a su vez reduce la desigualdad mejorando el estilo de vida en la sociedad (Bouskela et al., 2016). Dentro de las ciudades inteligentes se pueden distinguir tres enfoques notables que se detallan en la Tabla 4 (Abella et al., 2015).

Tabla 4

Enfoques de las Ciudades Inteligentes

Enfoque	Descripción
Sostenible	Se considera el consumo energético, uso de fuentes de energía autosustentables y medios de transporte más eficientes lo que se traduce como un ahorro económico.
Sensores	Utilizar todo el potencial de diversos sensores dentro de la ciudad para obtener información crucial que servirá para dar solución a alguna necesidad.
Colaborativo	Se basa en la participación de la ciudadanía para la correcta gestión de la ciudad y manejo de presupuesto.

Nota. Recuperado de (Abella et al., 2015).

Dominios de una ciudad inteligente

Las Ciudades Inteligentes contienen diversos aspectos para una buena gestión, administración y funcionamiento de una ciudad. En la Figura 12, se describen los dominios más comunes de una ciudad inteligente (García et al., 2018).

Figura 12*Dominios de las Ciudades Inteligentes*

Nota. Recuperado de (García et al., 2018).

Gobernanza: Digitaliza la administración proporcionando mayor eficiencia e incorporando la e-democracia para mejorar el sistema de votación y proporcionar a los ciudadanos un fácil acceso a documentos públicos para que exista transparencia. Por otro lado, la planificación urbana es otro de los aspectos importantes ya que incluye, escolarización en masa, gestión de presupuestos para instalaciones y espacios públicos (García et al., 2018).

Economía: Integra soluciones innovadoras para mejorar la economía y crear oportunidades de negocio y empleo a través del uso de la tecnología permitiendo invertir en mejoras de otros aspectos en la ciudad (García et al., 2018).

Gestión: Engloba la gestión de energía, recursos naturales y transporte. Soluciones IoT y redes de sensores inalámbricas son empleados para obtener datos y gestionar de manera correcta la asignación de recursos y tráfico (García et al., 2018).

Infraestructuras: Se relaciona con la calidad de vida que incluye la gestión de las instalaciones como la propiedad, servicios públicos y el mantenimiento (García et al., 2018).

Tecnología: Utilizada para desarrollar nuevas soluciones con el fin de conseguir una ciudad inteligente, digital y virtual, mejorando su funcionamiento y la satisfacción de la ciudadanía (García et al., 2018).

Personas: Consiste en ayudar y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos con la finalidad de hacer la vida más fácil al ser humano (García et al., 2018).

Seguridad Inteligente

La seguridad inteligente es un sistema que consiste en integrar la seguridad a la vida de las personas sin inconvenientes con la ayuda de aplicaciones del Internet de las cosas permitiendo el monitoreo y la administración de alguna área o infraestructura desde un dispositivo inteligente, es decir, brinda alertas de activaciones en tiempo real y a su vez visualiza instantáneamente dónde se disparó la alarma y así poder decidir qué acción tomar de manera remota, garantizando que solo aquellos con permiso ingresen a áreas restringidas (Peek, 2021).

Estos sistemas ofrecen grandes ventajas, entre ellas, está el bajo costo de monitoreo, ejecución de acciones remotamente, tienen un control continuo, es escalable, reduce costos energéticos. En la Tabla 5 se muestran los componentes que conforman un sistema de seguridad inteligente (Palter, 2019).

Tabla 5*Componentes de un sistema de Seguridad Inteligente*

Componente	Descripción
Sensores	Recopila datos el cual se gestiona por un sistema de comunicación inalámbrico, como RFID permitiendo identificar y rastrear un activo.
Comando y control	Analiza y toma de decisiones automatizada.
Actuadores	Ejecuta una acción en respuesta a una decisión.

Nota. Recuperado de (Palter, 2019).

Redes LPWAN

Las redes de área amplia de baja potencia mejor conocido como redes LPWAN, término que surgió a partir del año 2013 para referirse a una tecnología de red completamente diseñada para la comunicación inalámbrica con distancias relativamente largas con un bajo consumo, bajo ancho de banda, transferencia de pequeñas cantidades de datos, larga vida operacional y sobre todo a bajos costos, características que son de gran ayuda para fortalecer el mercado en constante evolución de las aplicaciones IoT (Beyene et al., 2017).

Requisitos para una red LPWAN

LPWAN tiene amplia gama de aplicaciones que incluyen temas como ciudades inteligentes, servicios públicos, salud, transporte, agricultura, seguridad, entre otros, los cuales necesitan coberturas que van desde distancias muy cortas a distancias largas, posicionamiento estacionario y móviles, conexiones basadas en baja potencia y diversos entornos complejos que en gran masa requieren una buena conectividad, con latencia muy baja y alta confiabilidad, y para ello, las aplicaciones LPWAN toman en cuenta los requisitos que se muestran en la Tabla 6 (Chaudhari et al., 2020).

Tabla 6*Requisitos de una red LPWAN*

Requisitos	Descripción
Tráfico de datos	Admitir mecanismos para la coexistencia de diferentes tipos de tráfico, calidad y nivel de servicio.
Capacidad y Densificación	<p>Permitir una gran cantidad de dispositivos conectados simultáneamente con velocidad de datos bajo.</p> <p>Escalabilidad a través del empleo de múltiples canales y antenas basadas en diferentes técnicas de diversidad sin comprometer otras métricas de rendimiento.</p> <p>Mitigar problemas de cuellos de botella e interferencia.</p>
Operación Energética	Funcionar con un límite de ciclo de trabajo bajo y estricto para mejorar la vida útil del nodo.
Cobertura	<p>Proporcionar comunicaciones de largo alcance de 10 a 40 km para zonas rurales y de 1 a 5 km para zonas urbanas con una ganancia de +20 dB sobre las redes celulares heredadas.</p> <p>Empleo de la banda sub-GHz para lograr una comunicación sólida y confiable.</p> <p>Usar bajas tasas de modulación genera más energía para cada bit aumentando la cobertura y ayuda a los receptores a demodular correctamente la señal.</p>
Ubicación	<p>Precisión en la ubicación de los dispositivos.</p> <p>Respaldar el monitoreo y la seguridad para detectar eventos inusuales y facilitar el nivel adecuado de autenticación.</p>
Seguridad y privacidad	<p>Respaldar atributos esenciales de autenticación, autorización, confidencialidad, confianza, y seguridad de datos.</p> <p>Proteger la identidad del dispositivo y la privacidad de su ubicación.</p> <p>Admitir seguridad en la transmisión forward y backward según lo requieran las aplicaciones.</p>

Requisitos	Descripción
Rentabilidad	Bajo costo, implementación de la red y consumo energético. Soportar escalabilidad, fácil instalación y bajo costo de mantenimiento.
Complejidad	Estructura de complejidad de hardware reducida sin sacrificar demasiado el rendimiento. Capacidad de procesamiento bajo. Arquitectura y protocolos deben ser compatibles con el hardware. Transceptores de radio deben ser flexibles y reconfigurables por software.
Diversas soluciones	Aplicaciones con capacidad de configuración entre diferentes topologías para dar flexibilidad y opciones al cliente.
Operatividad	La red debe ser capaz de manejar dispositivos heterogéneos. Capacidad de conectarse y operar en diversos entornos de tecnología LPWAN. Tolerancia, manejo y mitigación de interferencias. Habilitar la conectividad de los dispositivos independientemente de la infraestructura de hardware y la interfaz de programación de aplicaciones. La interoperabilidad de extremo a extremo compatible entre diferentes tecnologías de red.

Nota. Recuperado de (Chaudhari et al., 2020).

Hoy en día la tecnología LPWAN ha empezado a emerger y ganar prominencia dentro de las aplicaciones IoT, gracias a que brindan rentabilidad, robustez, seguridad y un amplio alcance. Estas se clasifican en dos categorías: soluciones basadas en celulares como lo es NB-IoT (del inglés *Narrow Band Internet of Things*), y soluciones no celulares como Sigfox y LoRa, en la Tabla 7 se muestra una comparativa entre cada una de ellas (Wang et al., 2018).

Tabla 7*Comparación entre las diferentes tecnologías LPWAN*

	Sigfox	NB-IoT	LoRa
Ancho de Banda	100 Hz	180 KHz	125 KHz
Frecuencia	Bandas no licenciadas ISM	Bandas licenciadas	Bandas no licenciadas ISM
Modulación	DBPSK	QPSK	CCS
Tasa de transmisión	300 bps	20 - 250 Kbps	200 - 50 Kbps
Tasa de mensajes por día	Uplink 140 Downlink 4	Ilimitada	Ilimitada
Costo	Muy bajo	Bajo	Bajo
Confidencialidad	No	Si	Si
Seguridad	No	Encriptación LTE	AES 128
Comunicación bidireccional	Limitada Half Duplex	Half Duplex	Half Duplex
Inmunidad a interferencias	Muy alta	Baja	Muy alta
Estandarización	Sigfox Company	3GPP	LoRa Alliance
Cobertura	Urbano – 10 Km Rural – 40 Km	Urbano – 2 Km Rural – 50 Km	Urbano – 3 Km Rural – 50 Km
Vida Útil	+10 Años	+10 Años	+10 Años

Nota. Recuperado de (Wang et al., 2018).

Tecnología Sigfox

Sigfox es una tecnología de comunicaciones inalámbrica de largo alcance, baja potencia y velocidad de datos que ofrece una solución personalizada para las aplicaciones IoT.

Utiliza 192 KHz de la banda pública disponible con el propósito de intercambiar mensajes por aire a través de UNB (del inglés *Ultra Narrow Band*) manteniendo una conexión de datos sólida, también emplea la modulación DBPSK (del inglés *Differential Binary Phase Shift Keying*) tomando fragmentos muy reducidos de espectro, a su vez cambia la fase de onda de radio portadora con el fin de codificar los datos permitiendo al receptor escuchar una pequeña parte del espectro y así mitigar el ruido (Sigfox, 2018).

El estándar que actualmente existe para comunicaciones Sigfox admite hasta 140 mensajes de uplink por día, con una anchura de 100 Hz cada mensaje, un tamaño de carga útil para cada mensaje 12 bytes y con velocidades de datos hasta de 100 bits por segundo. Por otro lado, el enlace de radio de Sigfox utiliza bandas de radio ISM no licenciadas, cuyas frecuencias varían según la normativa nacional de Europa, EEUU y Asia que usan las bandas de 868, 915 y 433 MHz respectivamente. Además, es necesario la existencia de empresas portadoras que brinden el servicio bajo suscripción (Daviteq, 2021).

Tecnología NB-IoT

La tecnología NB-IoT que fue desarrollada en el año 2016 por 3GPP (del inglés *3rd Generation Partnership Project*) organismo encargado de los principales estándares internacionales de telecomunicaciones móviles conocidos como 4G y 5G, entra en la categoría de redes LPWAN ya que es capaz de conectar aplicaciones IoT de una manera más simple y eficiente en redes móviles ya establecidas, cuentan con energía relativamente baja para transmisiones con volúmenes pequeños de datos bidireccionales (GSMA, 2022).

Las aplicaciones NB-IoT se centran en una transferencia de datos robusta y baja velocidad, es por ello que se caracteriza por tener una excelente cobertura para interiores, una arquitectura de red optimizada, un bajo consumo de energía, una alta eficiencia económica y soporta grandes cantidades de conexiones. Dado a que esta tecnología opera con un espectro

licenciado es capaz de brindar seguridad, confiabilidad y garantizar una excelente calidad de servicio (Sierra Wireless, 2021).

Tecnología LoRa

LoRa es una tecnología inalámbrica desarrollada por Semtech en el año 2012 para comunicaciones de largo alcance y baja potencia, se ha convertido en un gran impulso para las aplicaciones IoT ya que trabaja con una modulación CCS (del inglés *Chirp Spread Spectrum*) permitiendo codificar la información en ondas de radio haciendo uso de pulsos de chirrido generando resistencia a las perturbaciones y recepciones desde grandes distancias, ideal para transmisiones de pocos fragmentos de datos a tasas de bits bajas con bajo consumo de energía (The Things Network, 2016).

Funciona en bandas sub-GHz no licenciadas dependiendo la región, 915 MHz para Estados Unidos, 868 MHz para Europa y para Asia de 865 a 867 MHz y de 920 a 923 MHz, también puede operar en 2,4 GHz con el fin de lograr velocidades de datos más altas, sin embargo, se pierde alcance. Por otro lado, LoRa es capaz de alcanzar una cobertura de hasta 50 km en zonas rurales, mientras que en zonas urbanas alcanza más de 3 km, además, cada puerta de enlace es capaz de manejar millones de nodos con distancias significativas, necesitando menos infraestructura haciéndola más económica y fácil de implementar (Everything RF, 2018).

Protocolo LoRaWAN

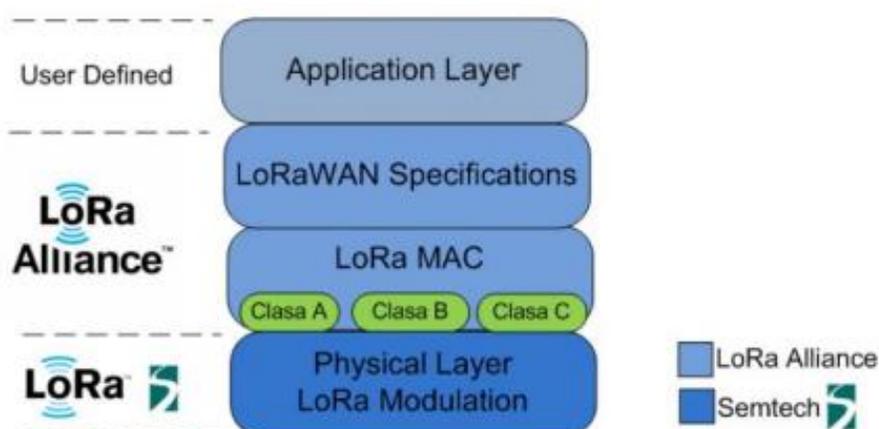
LoRaWAN es un protocolo de comunicación abierto que habilita y realiza el control de la capa MAC (del inglés *Media Access Control*) para resolver la congestión de red. Utiliza encriptación de extremo a extremo para establecer conexiones bidireccionales seguras, ofrece interoperabilidad de diversas redes con diferentes sistemas y dispositivos, largo alcance de comunicación y bajo consumo de energía. Dentro de sus funciones realiza el enrutamiento

entre nodos finales y puertas de enlace o gateways, establece la velocidad de datos, potencia de los dispositivos y la frecuencia de comunicación (Espinoza, 2021).

Los nodos que trabajen bajo el estándar pueden hacer uso de funciones como: acceso a canales, ahorro de energía, velocidad de datos adaptativa, seguridad y geolocalización (Ertürk et al., 2019). En la Figura 13, se presenta la pila de protocolos de comunicación LoRaWAN.

Figura 13

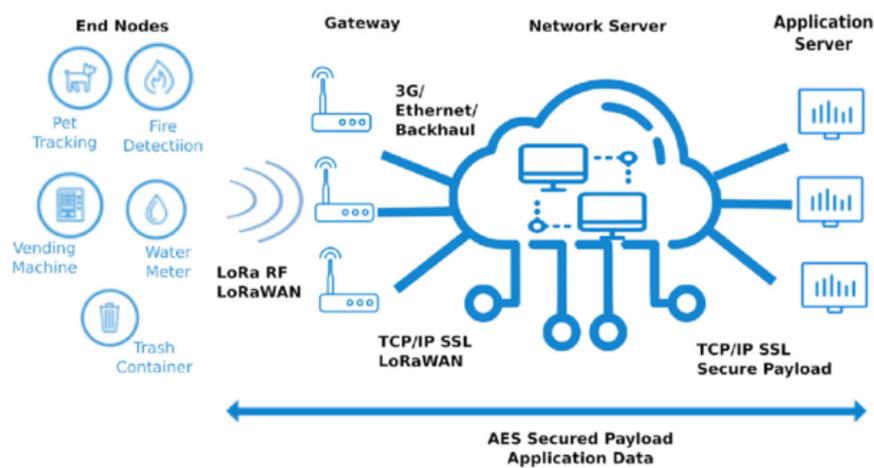
Pila del protocolo LoRaWAN



Nota. Recuperado de (Lavric & Petrariu, 2018)

Arquitectura

La Figura 14, muestra la arquitectura LoRaWAN, compuesta por nodos finales, gateway, servidor de red y un servidor de aplicaciones. Sus componentes se detallan a continuación.

Figura 14*Arquitectura de LoRaWAN*

Nota. Recuperado de (Tavares et al., 2021)

Dispositivos finales

Son dispositivos electrónicos integrados de bajo consumo energético, tamaño pequeño, bajo costo y alta potencia de transmisión, contienen identificadores únicos para activar y administrar de forma segura. Su función es recopilar datos de la red de sensores inalámbricos y enviar o recibir datos a un Gateway. Tienen un transceptor de radio LoRa para enlazarse con un Gateway utilizando la capa física (Montagny, 2022).

Gateway

El Gateway funciona en la capa física y recibe una trama LoRa desde distintos dispositivos finales que se encuentren en el área de cobertura, a su vez se conecta a Internet mediante WiFi, Ethernet o conexión celular para transmitir sus datos al Servidor de Red. El identificador único de cada Gateway permite el registro y activación en el Servidor de Red. Su principal función es verificar la integridad de los datos de cada mensaje LoRa RF (del inglés

Radio Frequency) entrante, si alguna trama es incorrecta, el mensaje se elimina; caso contrario se envía al servidor de red. Necesita de una fuente de energía continua (Pérez & Risco, 2020).

Servidor de red

El servidor de red LNS (del inglés *LoRaWAN Network Server*) realiza diferentes funciones dentro de la red, una de ellas es recibir los mensajes que fueron enviados desde el Gateway; se realiza el proceso de autenticaciones a través de la clave de sesión de red (NwkKey). Si la autenticación es exitosa, el servidor de red envía el mensaje al servidor de aplicaciones, caso contrario, se descarta el mensaje. Además, controla los mensajes duplicados, garantiza la autenticidad de los sensores de la red y la integridad de los mensajes (Merino, 2019).

Servidor de aplicaciones

El servidor de aplicaciones se considera como un visualizador de la información enviada. Utiliza una clave de sesión de aplicación (AppSKey) y recibe mensajes cifrados del servidor de red (Pérez & Risco, 2020).

Clases de dispositivos LoRa

Los dispositivos finales de LoRaWAN se dividen en tres clases dependiendo el consumo de energía y las capacidades de enlace descendente.

Clase A

Permiten comunicaciones bidireccionales, es seguido por dos ventanas de recepción muy cortas después de cada transmisión hacia el Gateway, los dispositivos finales no verifican la disponibilidad del Gateway para la transmisión de mensaje. Se puede transmitir un mensaje de enlace descendente desde RX1 o RX2. Solo si el sensor ha transmitido en sentido

ascendente se produce la comunicación descendente, de esa manera se consigue una gran eficiencia energética (Montagny, 2022).

Clase B

Son similares a los dispositivos de clase A, pero se puede programar ventanas de recepción adicionales y un tiempo fijo para que el dispositivo final reciba enlaces descendentes de la red, aunque consumen más energía. El Gateway transmite beacon (guía) de forma regular para sincronizar las ventanas de recepción del dispositivo final de LoRaWAN. Los dispositivos finales de clase B son muy útiles para el monitoreo de sensores y actuadores (Montagny, 2022).

Clase C

Los dispositivos finales de clase C tienen varias ventanas de recepción abiertas, mientras no exista transmisión. La comunicación entre el servidor y el dispositivo final ofrece una latencia más baja, aunque consume más energía. En general, pueden recibir continuamente cualquier mensaje del Gateway, su uso es recomendable cuando existe una alimentación externa (Montagny, 2022).

Capas de LoRaWAN

Capa Física

Permite la comunicación entre los nodos finales y el Gateway, utiliza la modulación CSS para garantizar la sincronización de tiempo y frecuencia con la finalidad de reducir la tasa de datos y a su vez el ancho de banda (Ertürk et al., 2019). La capa física que se muestra en la Figura 15 cuenta con un formato de mensaje de enlace ascendente, que se detalla a continuación:

- Preámbulo: sincroniza el transmisor y receptor.
- PHDR (Physical Header): encabezado de la trama compuesto por 2 bytes.
- PHDR_CRC (Physical Header Cyclic Redundancy Check): cabecera de control de redundancia cíclica, posee información sobre el acceso al medio de los protocolos LoRaWAN compuesto por 4 bytes.
- PHY Payload: carga útil
- CRC (Cyclic Redundancy Check): es el código de corrección de errores compuesto por 2 bytes (Ertürk et al., 2019).

Figura 15

Formato de mensaje de la capa física de enlace ascendente

Preámbulo	PHDR [2 Bytes]	PHDR_CRC [4 bits]	PHYPayload	CRC [2 Bytes]
-----------	-------------------	----------------------	------------	------------------

Nota. Recuperado de (Ertürk et al., 2019)

El formato de mensaje de enlace descendente que se muestra en la Figura 16, se envía desde el servidor a los nodos finales a través del Gateway, se realiza el envío a un único nodo.

Figura 16

Formato de mensaje de la capa física de enlace descendente

Preámbulo	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload
-----------	------	----------	------------

Nota. Recuperado de (Ertürk et al., 2019)

Capa MAC

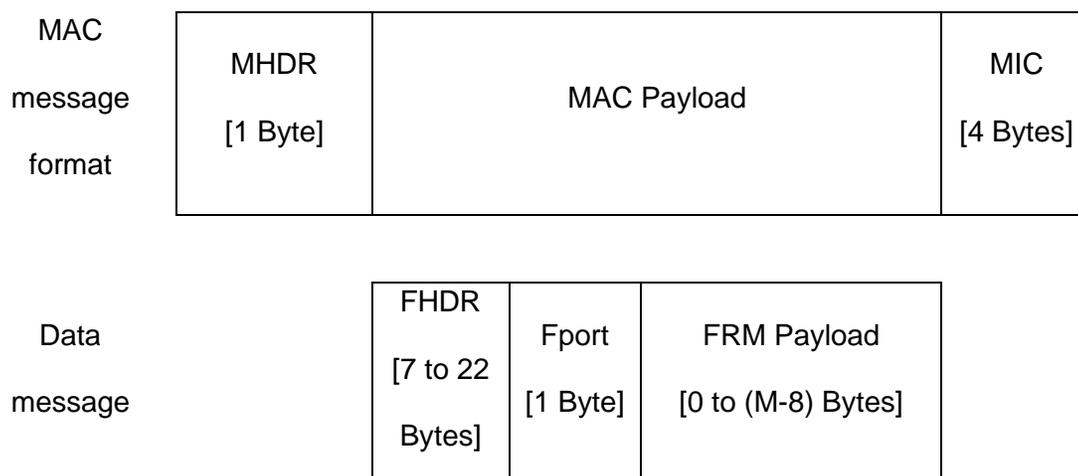
También conocida como LoRaWAN, su principal ventaja es la flexibilidad y adaptabilidad de la tasa de transmisión entre el servidor y los dispositivos para garantizar la eficiencia energética, se ofrece protección de la información transmitida de acuerdo a la seguridad de la red y aplicación (Ertürk et al., 2019).

El formato del mensaje de la capa MAC que se muestra en la Figura 17, tiene los siguientes campos:

- MHDR (MAC Header): identificar el tipo de mensaje MAC compuesto por 1 byte.
- MAC Payload: datos de la aplicación, con un máximo de 255 bytes.
- MIC (Message Integrity Code): comprobar la integridad del mensaje, compuesto por 4 bytes.

Figura 17

Formato de mensaje de la capa MAC



Nota. Recuperado de (Ertürk et al., 2019)

Dentro de Payload MAC existen campos adicionales que se detallan a continuación:

FHDR: es la cabecera de la trama que contiene un bit para identificar el último mensaje recibido con datos confirmados, compuesto de 7 a 22 bytes.

Fport: es un campo alternativo para el puerto, compuesto de 1 byte.

FRM Payload: es un campo alternativo para la carga útil de la trama, compuesto entre 0 a (M-8) bytes (Ertürk et al., 2019).

Activación de un nodo

Para que los nodos realicen sus funciones dentro de la red deberán cumplir con el procedimiento de activación. Existe dos procesos que se detallan a continuación:

Activación por personalización (ABP): la información requerida se guarda en cada nodo lo cual permite añadir directamente a la red un nodo final (Burbano, 2017). Para lo cual se emplea los siguientes datos:

Device Address (DevAddr): es una dirección de 32 bits única dentro de la red que permite interpretar los datos y utilizar las claves de cifrado correctamente.

Network Session Key (NwkSKey): es una clave de cifrado AES de 128 bits para asegurar la autenticidad del nodo. Provee integridad de mensajes y brinda seguridad en la comunicación entre el nodo final y el servidor de red.

Application Session Key (AppSKey): es una clave de cifrado AES de 128 bits para verificar que el operador tiene permiso de manejar la red. Provee seguridad para la comunicación entre nodo final y la aplicación del servidor.

Activación en el aire (OTAA): el Gateway recibe una solicitud del dispositivo final para unirse (Burbano, 2017). A continuación, se menciona los campos que se requieren:

DevEUI: proporciona identidad única al nodo.

AppEUI: identificador de la aplicación.

AppKey: clave que utiliza la aplicación para autenticación.

Tecnología WiFi aplicado al Internet de las Cosas

WiFi es básicamente una comunicación inalámbrica entre una amplia variedad de dispositivos a Internet, permitiendo enviar y recibir datos en exteriores e interiores en cualquier lugar dentro de la cobertura de la estación base (Ismail Al-Alawi, 2006). Dicha tecnología ha satisfecho las necesidades de los dispositivos y aplicaciones enfocados al mercado del IoT que requieren un alto ancho de banda y baja latencia en entornos residenciales e industriales ofreciendo calidad, confiabilidad y seguridad dando mayor robustez a la comunicación (Chen et al., 2020). En la Tabla 8, se especifican características de la tecnología WiFi para IoT.

Tabla 8

Características de la tecnología WiFi enfocado a IoT

Características	Descripción
Conectividad generalizada	Permite a los usuarios controlar miles de dispositivos desde un sistema unificado.
Tecnología interoperable basada en estándares	Varios productos de diferentes marcas se pueden conectar a WiFi puesto que ofrece una plataforma común cumpliendo con parámetros importantes dentro de IoT como la potencia, latencia y el rendimiento; ofreciendo una mejor calidad de servicio al usuario a través de WiFi CERTIFIED.
Seguridad WPA3	Protección de información en entornos personales y empresariales a través de los últimos protocolos de seguridad.
Compatibilidad con versiones anteriores	Asegura que los dispositivos heredados puedan conectarse a la red.
Implementación simple y rentable	No se requiere de un Gateway simplificando el emparejamiento de dispositivos, autenticación de red, entre otros.

Características	Descripción
Conectividad confiable y sofisticada	Brindan alto rendimiento y latencias bajas para aplicaciones IoT domésticas o industriales mejorando la eficiencia, administración y la optimización de la red.
Topología de red flexible	Ofrece diversas topologías para obtener mayor escalabilidad y satisfacer las necesidades de la red y aplicaciones IoT.
Precio	El costo de la adquisición de los equipos y su mantenimiento se considera bajo.
Energía	Debido a que existen dispositivos conectados a la fuente de energía eléctrica su valor de consumo es moderado.
Espectro	Utiliza las bandas de 2.4GHZ, 5GHz y 6GHz no licenciadas, es decir no requieren un permiso para su usabilidad.

Nota. Recuperado de (Chen et al., 2020).

Puntos de acceso gratuitos en el Distrito Metropolitano de Quito

Dentro del Distrito Metropolitano de Quito se encuentran distribuidos alrededor de 703 puntos WiFi gratuitos para la conexión a Internet, con la finalidad de mantener una conectividad activa y dar acceso a la tecnología digital generando empleos e impulsando emprendimientos para el desarrollo económico de la ciudad. Los usuarios se pueden conectar a la red y navegar dos horas diarias (El Comercio, 2020). Tomando en consideración la infraestructura civil subterránea desplegada y la ubicación de los polígonos mencionados en la Tabla 2 se han seleccionado los puntos WiFi más cercanos a los polígonos que se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9

Puntos WiFi cercanos a polígonos

N°	Nombre del punto WiFi	Sector
1	Colegio Pomasqui	Pomasqui

N°	Nombre del punto WiFi	Sector
2	Colegio Quiteño Libre	San Antonio
3	Liga Condado	Condado
4	Liga Puerta del Sol	Puertas del Sol
5	AZ Calderón	Carapungo
6	Parque La Concepción	La Concepción
7	Parada Metrovía Aeropuerto 1	La Concepción
8	Colegio Humberto Mata Martínez	El Inca
9	Parada Ecovía Jipijapa	El Inca
10	Centro Comercial Granados Plaza 1	Gaspar de Villarroel
11	Parque Isla Tortuga	El Batan
12	Parada Ecovía Naciones Unidas	Iñaquito
13	Parque La Carolina 3	Iñaquito
14	Unidad Educativa Sebastián de Benalcázar	Iñaquito
15	Tribuna de los Shyris	Iñaquito
16	Parada Ecovía San Martín	Iñaquito
17	Universidad Israel	Mariscal
18	Isabel La Católica	Cochapamba
19	Parada Ecovía Baca Ortiz	La Floresta
20	Parada Trole Colón	Cochapamba
21	Seminario Mayor	Cochapamba
22	Mercado Santa Clara	Mariscal Sucre
23	Mercado Santa Clara 3	Mariscal Sucre
24	Carrión y 9 de Octubre	Cochapamba

N°	Nombre del punto WiFi	Sector
25	Parada Ecovía Manuela Cañizares	6 de Diciembre
26	Parada Ecovía Casa de la Cultura	6 de Diciembre
27	Parada Trole La Alameda	Cochapamba
28	Mercado San Roque 2	La Victoria
29	Estación Trole Playón de la Marín	Centro Histórico
30	Parque Pobre Diablo	Chimbacalle
31	Parque Pobre Diablo 1	Chimbacalle
32	Cancha Voley Chimbacalle 1	Chimbacalle
33	Parque de las Diversidades 1	San Bartolo
34	Parque Lineal Sur 4	Solanda
35	Parque Ecológico	Solanda
36	Unidad Educativa Quitumbe	Morán Valverde
37	Parada Ecovía San José de Guamaní	Guamaní
38	Administración Zonal Los Chillos	Sangolquí
39	Instituto Superior Alemán	Cumbayá
40	El Chaquiñan Cumbayá	Cumbayá

Nota. Recuperado de (Secretaría de Territorio, 2022).

Se utilizó el software Google Earth para colocar los puntos WiFi de acuerdo a su ubicación identificados a través de sus respectivos nombres. Desde la Figura 18 a la Figura 22 se muestran los polígonos y puntos WiFi cercanos.

Figura 18

Puntos de acceso Norte 1

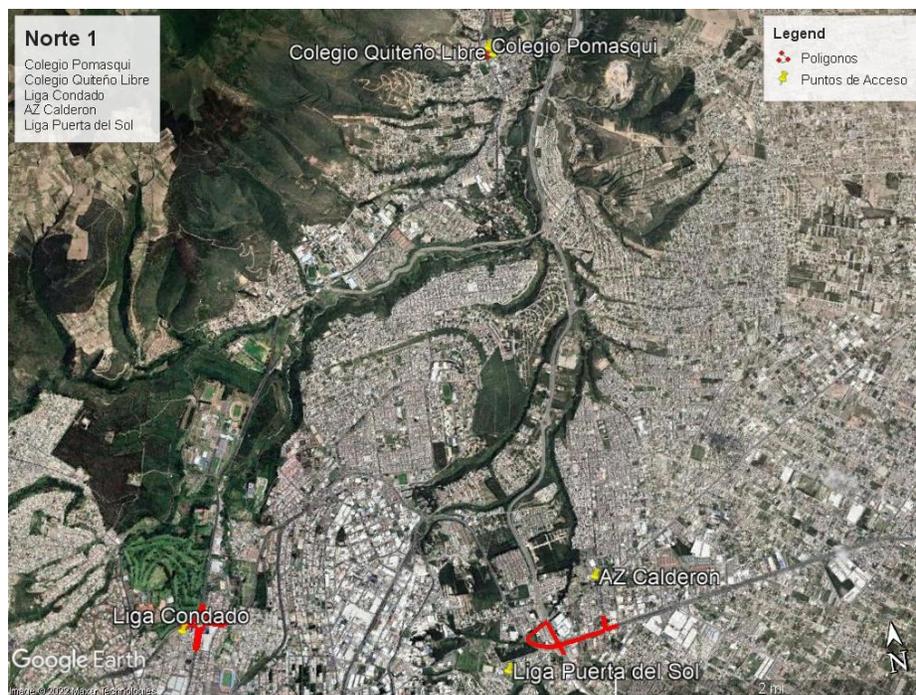


Figura 19

Puntos de acceso Norte 2

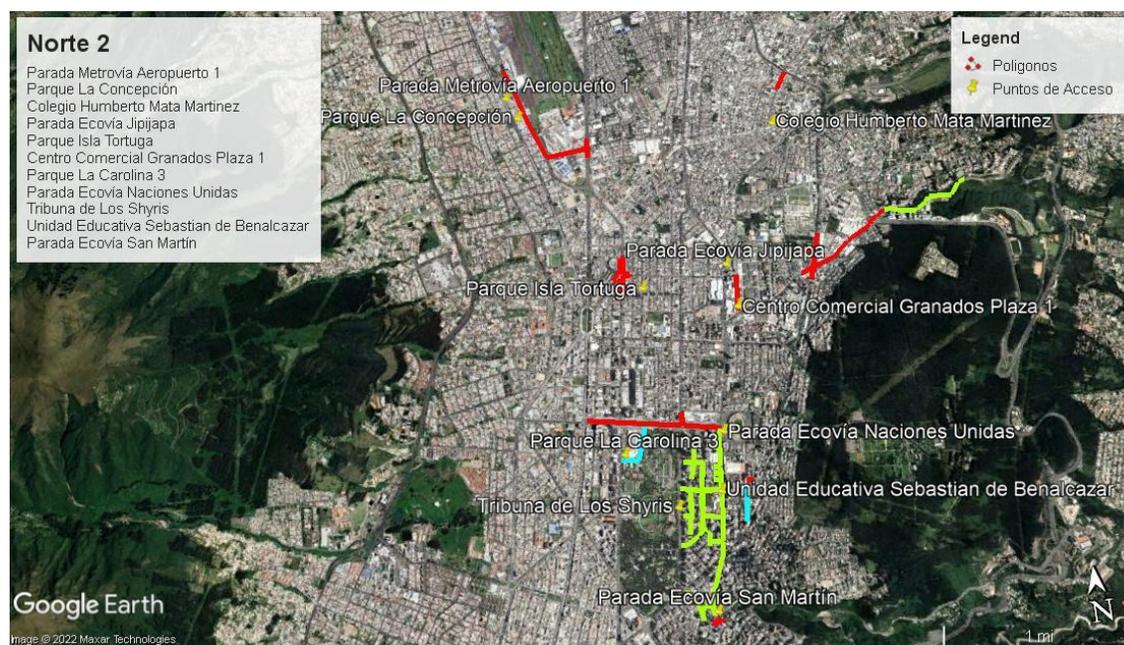


Figura 20

Puntos de acceso Norte – Centro

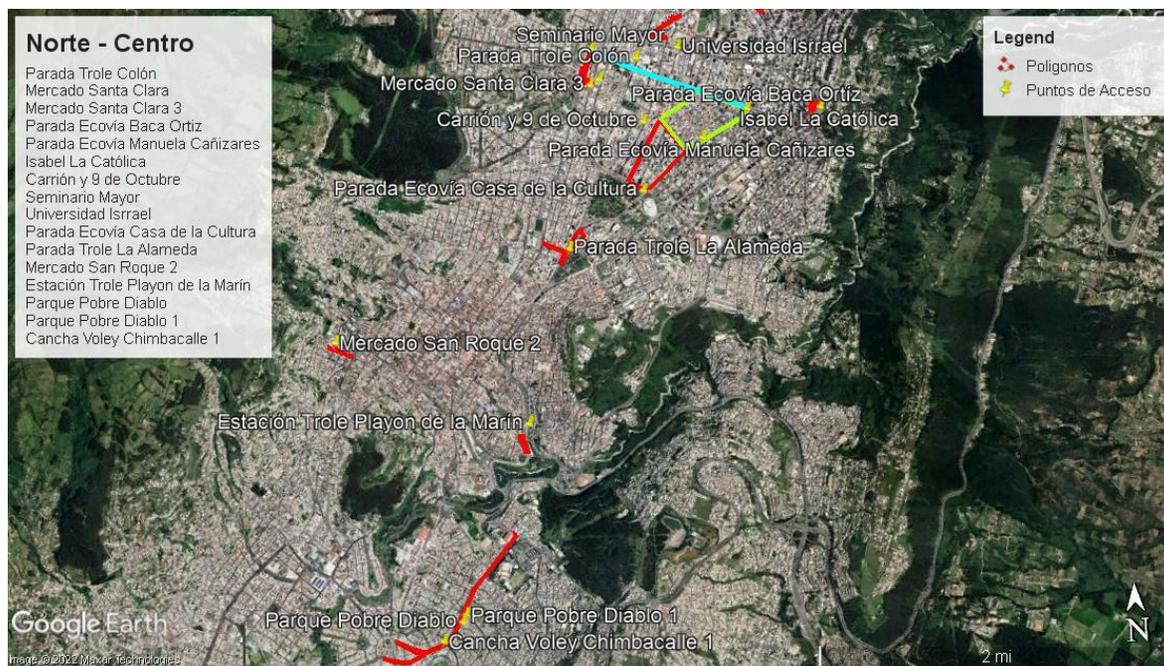


Figura 21

Puntos de acceso Sur - Valle

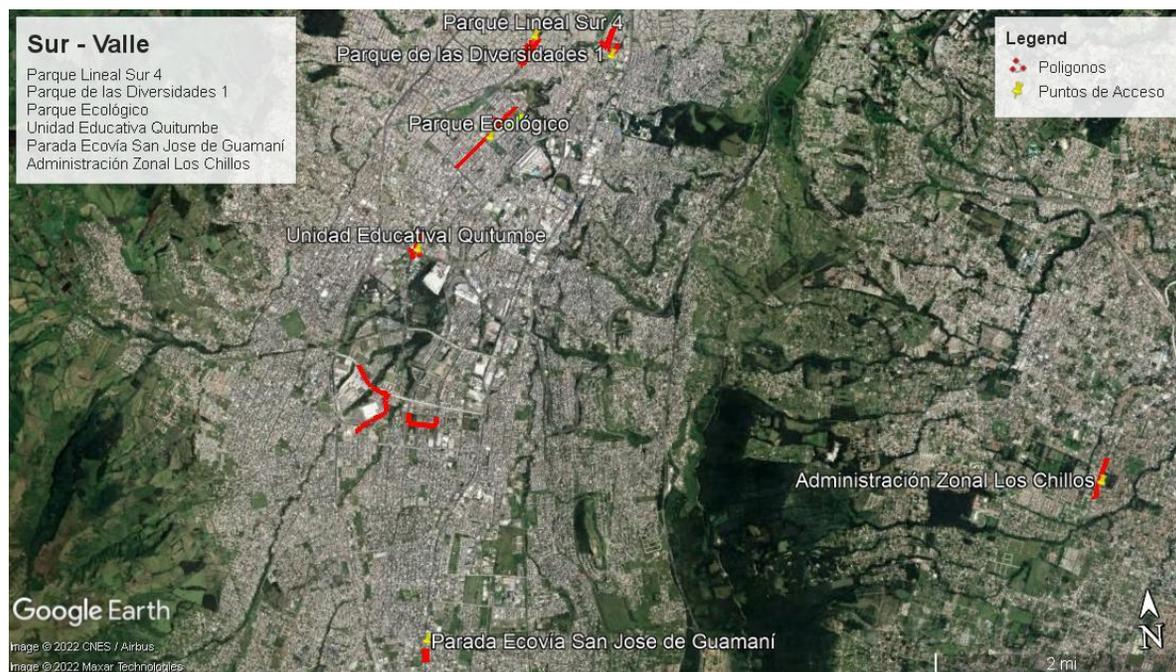
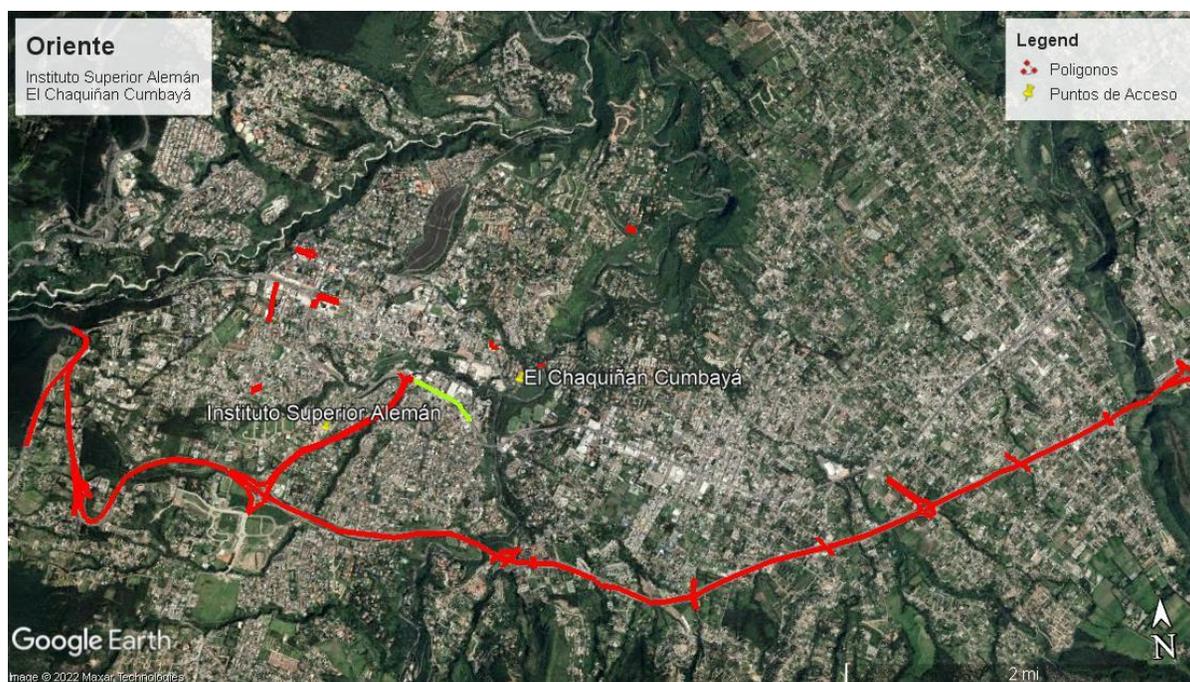


Figura 22

Puntos de acceso Oriente de la ciudad



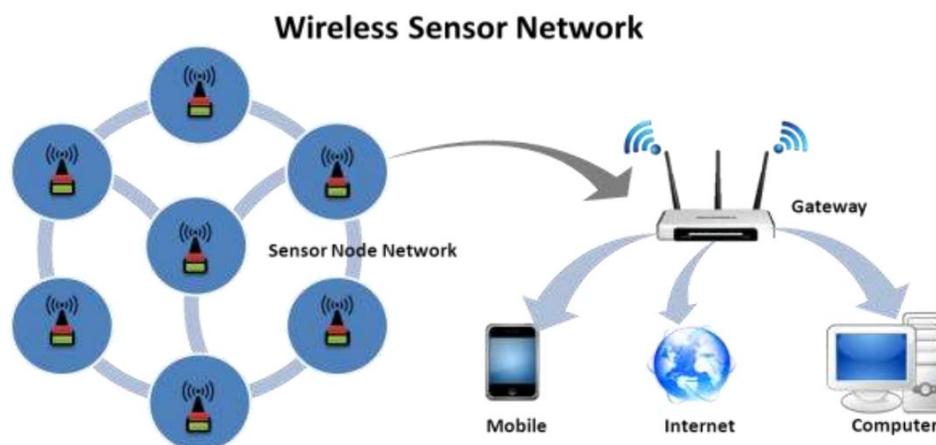
Red de sensores inalámbricos

La red de sensores inalámbricos WSN (del inglés *Wireless Sensor Network*) se refiere a un conjunto de dispositivos inalámbricos, distribuidos físicamente e interconectados entre sí; su objetivo es controlar y monitorear distintos fenómenos para almacenar y enviar datos a una red. Se puede implementar en diferentes sectores o aplicaciones, por ejemplo, agricultura, ciudades inteligentes, domótica, tecnología civil y militar (Herrera et al., 2016).

Los principales elementos para establecer la comunicación son los nodos sensores, Gateway, canal de transmisión y la estación base, como se observa en la Figura 23.

Figura 23

Arquitectura de la red de sensores inalámbricos



Nota. Recuperado de (Rao Jaladi et al., 2017).

Nodos sensores

Su función es tomar datos de variables físicas y enviar la información a la estación base. Necesitan configuración mediante hardware, es decir, se adaptan al medio físico para su control, evaluación y modificación de la variable que se estudie; también es necesario un código de programación donde se establece las directrices para ejecutar la acción. Contiene diferentes componentes como sensores, radio, procesador, memoria y fuente de energía (Karl & Willig, 2005). En la Tabla 10, se muestran los componentes de los nodos sensores.

Tabla 10

Componentes de los nodos sensores

Componentes de los nodos sensores	
Sensores	Capaz de recoger información del medio y convertir en señales eléctricas. Existe una variedad de sensores que cumplen con una función en específico, por ejemplo, temperatura, inclinación, presión, movimiento, entre otros.

Componentes de los nodos sensores

Radio	Se refiere a un transceiver, es decir, cumple la funcionalidad de transmisor y receptor.
Procesador	Contiene un microcontrolador que tiene la función de procesar y controlar los periféricos de entrada y salida.
Memoria	Encargado de almacenar información.
Fuente de energía	Por lo general son baterías que alimentan eléctricamente a los circuitos

Nota. Recuperado de (Chicaiza, 2009).

Gateway

Su función es recibir la información capturada de los nodos sensores y enviar a la estación base a través de un canal de transmisión o una red de datos (TCP/IP) donde se procesa los mensajes. Se puede considerar como otro nodo sensor o un router que recibe datos de un protocolo para convertirlo en otro (Rao Jaladi et al., 2017).

Canal de transmisión

Es el medio no guiado que permite transmitir y recibir información entre nodos, dicho canal forma parte de las frecuencias del espectro electromagnético; por lo general se usa las frecuencias entre 433 MHz y 2.4 GHz, que corresponden al espectro de uso determinado en bandas libres. Se basa en el estándar 802.15.4 – ZigBee para sistema de comunicación de radios para nodos de redes inalámbricas (Chicaiza, 2009).

Estación base

Su función es guardar, procesar, interpretar y administrar la información, físicamente puede estar ubicado remotamente o conectado directamente a la red de sensores dependiendo del tipo de conexión, ya sea medio no guiado o un medio guiado. En el caso que se ocupe una

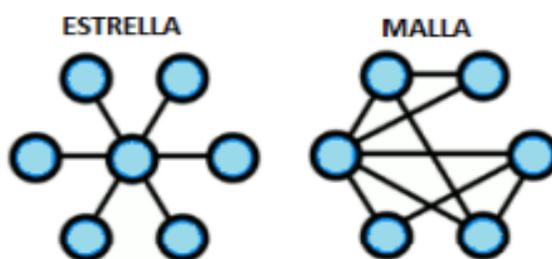
conexión inalámbrica o no guiada se refiere a un espacio en la nube de un servidor remoto mediante un proveedor de servicios de Internet (ISP). Para que una estación base funcione correctamente necesita de varios recursos como cálculos, energía y comunicación (Chicaiza, 2009).

Topología

La comunicación entre nodos debe ser robusta para que no existe pérdida de información, por lo cual se analiza el camino correcto que debe seguir para la transmisión y recepción a través de su forma de agrupación. De acuerdo a la aplicación que se vaya a realizar se puede implementar dos topologías, estrella y malla. Estrella, refiriéndose a un nodo central y varios nodos conectados a él, utilizado para aplicaciones en tiempo real. La topología tipo malla tiene varios nodos interconectados entre sí, muy útil para la medición de variables del medio ambiente o en lugares alejados (Taipe, 2017). En la Figura 24, se puede observar las topologías mencionadas.

Figura 24

Topología en estrella y malla

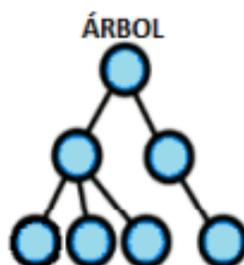


Nota. Recuperado de (Taipe, 2017).

A partir de las topologías en estrella y malla, puede resultar la topología en árbol, se caracteriza por tener una estructura jerárquica, tiene como objetivo expandir la red de forma dinámica, este tipo de topología se muestra en la Figura 25 (Taipe, 2017).

Figura 25

Topología en estrella y malla



Nota. Recuperado de (Taípe, 2017).

Plataforma IoT

Es una plataforma web que se integra al Internet de las cosas (IoT), su función principal es realizar la recopilación, procesamiento, visualización y gestión de los datos de dispositivos, sensores, actuadores y equipos que se encuentran conectados al entorno digital, el usuario utilizará la aplicación para interactuar entre el software y el hardware (Cárdenas, 2016). En la Tabla 11, se presenta las principales características.

Tabla 11

Características de una plataforma IoT

Características de una plataforma IoT	
Base de datos	Almacena información de diferentes dispositivos en la nube.
Gestión de dispositivos	Verificar que los dispositivos que se encuentran conectados estén funcionando de manera correcta.
Conectividad y normalización	Se realiza la transmisión e interacción de datos desde diferentes dispositivos y protocolos.
Procesamiento y gestión de la acción	De acuerdo a la información y reglas de los sensores se realiza una acción o un evento.
Visualización	La información es mostrada al usuario a través de widgets.

Características de una plataforma IoT

Interfaces externas	Se permite los enlaces con diferentes API's.
---------------------	--

Nota. Recuperado de (Cárdenas, 2016).

ThingSpeak

Es una plataforma de análisis de IoT que permite agregar, almacenar, controlar y analizar flujo de datos de sensores en la nube, se caracteriza por ser Open Source, su conexión es vía Internet usando el protocolo HTTP. Una de las ventajas es que permite visualizar los datos de manera gráfica en tiempo real y se puede redireccionar la información a Matlab. Es compatible con Arduino, Raspberry Pi, entre otros. Se caracteriza por la simplicidad para programar porque se necesita menos líneas de código con una configuración sencilla, desde la cual se gestiona usuarios, claves API y canales (Pasha, 2016). En la Tabla 12 se mencionan características relacionadas a la plataforma ThingSpeak.

Tabla 12

Características de la plataforma ThingSpeak

Característica	Descripción
Arquitectura	Basada en Modelo Vista Controlador, separa los datos, interfaz de usuario y la lógica de control.
API	Disponible en GitHub, totalmente abierta para modificar el código original.
Canales	A través de los canales almacena y publica los datos.
Plugins	Crear aplicaciones de forma nativa, pueden ser públicos o privados. Soporta lenguajes de programación como CSS, HTML y JavaScript.
Aplicaciones	Contiene varias aplicaciones como ThingHTTP, ThingTweet, TimeControl, entre otros.

Nota. Recuperado de (Garrido, 2015)

Capítulo III

Materiales y Métodos

En el presente capítulo, con el fin de alcanzar los objetivos, se ha realizado un estudio de mercado en base a las tecnologías actuales y dispositivos más asequibles; escogiendo en base a la aplicación, necesidades y requerimientos del proyecto. Se utilizó una metodología mixta, es decir, teórico de tipo cualitativa y experimental de tipo cuantitativa.

Método cualitativo

Se enfocó en un análisis inductivo realizando la búsqueda de fuentes bibliográficas y recopilación de información acerca de parámetros que influyen en la monitorización de la infraestructura civil subterránea. Además, se realizó la evaluación de la información sobre la tecnología LoRa y WiFi, y a su vez las características de diferentes sensores para detectar con precisión el acceso al sistema de soterramiento.

Método cuantitativo

Se realizó un enfoque hacia el análisis deductivo, basado en la experimentación, donde se diseñó el circuito del prototipo encargado de detectar el acceso al sistema de soterramiento el cual emite una alarma si fuera necesario. En el desarrollo del prototipo se empleó un sensor ultrasónico y un sensor de inclinación que ayudaron a detectar las señales, para lo cual, se seleccionó el dispositivo adecuado en base a las necesidades y características, además, se realizó la calibración de los sensores y la programación del software con su respectiva cabecera y payload para su correcta identificación. Adicionalmente el equipo dispone de un sistema de energía autónomo para satisfacer el consumo de las cargas eléctricas.

Se configuró los módulos de las tecnologías LoRa y WiFi para establecer la comunicación entre el transmisor y el receptor. Para la ejecución de la red con tecnología LoRa se realizó el diseño de un Gateway, que tiene como finalidad admitir dispositivos de diferentes

marcas comerciales; en cuanto a la tecnología WiFi se utilizó una red con conexión a internet. A partir de ello se llevó a cabo la comunicación con la plataforma IoT para la visualización de datos obtenidos de los sensores. Para la identificación del usuario o entidad que desee acceder al sistema de soterramiento se usó una tarjeta RFID, una vez que tenga acceso autorizado se desactivan los sensores para permitir la apertura de la tapa, caso contrario se activarán los sensores.

Para realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo como plan piloto se utilizó las tapas de los pozos de revisión de la infraestructura de telecomunicaciones en diferentes ubicaciones dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas campus Sangolquí con el fin de monitorizar el acceso a la infraestructura civil subterránea. Para comprobar la cobertura se realizaron pruebas en la ubicación de los polígonos Ruta Viva Fase 1, Boulevard Naciones Unidas y República del Salvador, en un futuro con autorización del Municipio de Quito se podría replicar en cualquier punto de los polígonos. Como última instancia se desarrolló un análisis y una evaluación comparativa de las tecnologías propuestas para verificar su respectivo rendimiento y determinar la mejor solución para resolver la problemática expuesta.

Tecnologías empleadas en el prototipo IoT

De acuerdo a las aplicaciones IoT detalladas en la Tabla 3, el proyecto se encuentra enfocado a las ciudades inteligentes, cuyo objetivo principal es mejorar la gestión de recursos e infraestructura. El control de acceso a la infraestructura civil subterránea es un camino hacia una ciudad inteligente puesto que hace del espacio público más habitable.

Una de las tecnologías que se destaca dentro del Internet de las Cosas son las redes LPWAN, dentro de las cuales se seleccionó la tecnología LoRa, puesto que presenta diversas ventajas frente a otras, como se mostró en la Tabla 7. Adicional, se menciona que Sigfox hubiese sido otra opción, pero debido a que ya no se encuentra operativa dentro del país se

descartó. Por otra parte, LoRa es flexible para el despliegue de la red en el área de estudio obteniendo una gran cobertura y transmisión de datos en tiempo real, a través de bandas no licenciadas. Permite la conexión de múltiples dispositivos a bajo costo, y una larga vida útil de la batería ya que es de bajo consumo.

Para realizar una comparativa con la tecnología anteriormente mencionada se optó por la tecnología WiFi, que forma parte del Internet de las Cosas y que ha sido utilizada durante muchas décadas, ya que posee características relevantes como la latencia y la disponibilidad. Además, tiene un gran desempeño en diferentes aplicaciones IoT.

Tarjeta de desarrollo LoRa

Una tarjeta de desarrollo LoRa es un producto RF inalámbrico de baja potencia y largo alcance, adecuado tanto para aplicaciones de telecomunicaciones portátiles como para aplicaciones IoT, utiliza bandas no licenciadas ISM en todo el mundo de 433, 868 y 915 MHz, ofreciendo flexibilidad a los desarrolladores a la hora de realizar sus propias redes. Por otro lado, estos equipos pueden alcanzar hasta distancias de 15 a 20 km siempre y cuando cumpla con una potencia y un sistema de antena óptimo (Murdyantoro et al., 2019).

En el mercado existen una gran variedad de fabricantes que ofrecen diseños con diferentes parámetros como rangos de frecuencia, velocidad de transferencia de datos, potencia, entre otros. Para el presente proyecto se han seleccionado dos tarjetas de desarrollo que cumplen con parámetros específicos como: la frecuencia establecida para América Latina, en este caso, para Ecuador, su valor es de 915 MHz (Rodríguez, 2016), un entorno amigable de programación, disponibilidad del dispositivo y el número de entradas/salidas para la conexión de los periféricos; con el fin de recibir datos de los sensores, transmitir y receptor en el Gateway, y así, comprobar su idoneidad en el aplicativo IoT, a continuación se muestran los detalles de los equipos.

Heltec WiFi LoRa 32

Es una placa de desarrollo IoT producida y diseñada por Heltec Automation, altamente integrado que se basa en un ESP32 con SX127x, posee un sistema de administración de batería LiPo (del inglés *Lithium Polymer*), además tiene integrado un display OLED (del inglés *Organic Light Emitting Diode*) para visualización de datos (Heltec Automation, 2018), el equipo se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Placa Heltec WiFi LoRa 32



Nota. Recuperado de (Heltec Automation, 2018).

La Tabla 13 indica las características técnicas de la placa Heltec WiFi LoRa 32.

Tabla 13

Características técnicas de la placa Heltec WiFi LoRa 32

Especificación	Descripción
Certificación	CE
Microcontrolador	ESP32 240 MHz
Comunicación Inalámbrica	WiFi 802.11 b/g/n, Bluetooth V4.2, LoRaWAN
Chip LoRa	SX1276/SX1278

Especificación	Descripción
Frecuencia	EU433, CN470, IN865, EU868, US915, AU915, KR920, AS923
Potencia máxima de salida LoRa	19 dB \pm 1 dB
Recurso de Software	UART, SPI, I2C, I2S, entradas ADC, salidas DAC, GPIO, GPI
FLASH	SPI FLASH de 8 MB
RAM	SRAM interna de 520 KB
Batería	3.7 V de Litio
Bajo consumo	Deep Sleep 800 μ A
Temperatura de trabajo	-40 ~ 80 °C
Fuente de alimentación	5 V

Nota. Recuperado de (Heltec Automation, 2018).

Ra-01SH

Producto realizado por Anxinke Technology, destinado a aplicaciones de nodos LoRA de ultra larga distancia, esta placa de desarrollo está basada en chips SX1262. Reduce el consumo de corriente, además es inmune a interferencias, utilizado comúnmente en: sistemas de seguridad, automatización del hogar, sistemas de monitoreo a distancia, entre otros, con el fin de buscar soluciones de comunicación con fácil verificación y alta fiabilidad, el equipo se muestra en la Figura 27 (Ai Thinker, 2020).

Figura 27

Placa Ra-01SH



Nota. Recuperado de (Ai Thinker, 2020).

En la Tabla 14 se muestran las características técnicas de la placa Ra-01SH.

Tabla 14

Características técnicas de la placa Ra-01SH

Especificación	Descripción
Comunicación Inalámbrica	LoRa
Chip LoRa	SX1262
Frecuencia	803 MHz ~ 930 MHz
Modulación	FSK, GFSK, MSK, LoRa y OOK
Potencia máxima de salida LoRa	+22 dBm
Recurso de Hardware	SPI
Sensibilidad	Hasta -140 dBm
Batería	3.7 V de Litio
Bajo consumo	4,2 mA en recepción y 1,6 mA en espera.
Temperatura de trabajo	-40 ~ 85 °C
Fuente de alimentación	3.3 V

Nota. Recuperado de (Ai Thinker, 2020).

Tarjeta de desarrollo WiFi

Para la implementación del prototipo se seleccionó el módulo NodeMCU ESP8266 debido a su gran potencia de procesamiento, integración WiFi, siendo ideal para proyectos IoT. Además, es de código abierto, hardware basado en el módulo ESP-12 y un firmware que se ejecuta en el SoC (del inglés *System on a Chip*) WiFi ESP8266 del fabricante Espressif Systems (Einstronic, 2017). En la Figura 28 se muestra el dispositivo.

Figura 28

NodeMCU ESP8266



Nota. Recuperado de (Einstronic, 2017)

La Tabla 15 da a conocer las características técnicas de la placa NodeMCU ESP8266.

Tabla 15

Características técnicas de la placa NodeMCU ESP8266

Especificación	Descripción
Voltaje de funcionamiento	3.3 V
Memoria Flash	4 MB
SRAM	64 KB
Microcontrolador	CPU Tensilica RISC 32 bits
Comunicación inalámbrica	WiFi 802.11b/g/n

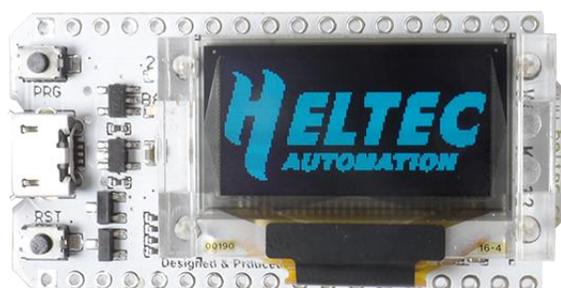
Especificación	Descripción
Rango de frecuencia	2.412 – 2.484 GHz
Temperatura de trabajo	-40 a + 125 °C
Recurso de Hardware	UART, I2C, PWM, GPIO, ADC
Protocolo de Red	IPv4, TCP, UDP, FTP, HTTP
Tipo de seguridad	WEP, WPA-PSK, WPA2-PSK
Tipo de encriptación	WEP64, WEP128, TKIP, AES

Nota. Recuperado de (Einstronic, 2017)

La tarjeta de desarrollo Heltec WiFi Kit 32 se adaptó con facilidad al chip LoRa RA-01SH para complementar su funcionamiento, está basado en ESP32 y es compatible con Arduino IDE (Heltec Automation, 2019). En la Figura 29 se muestra la tarjeta de desarrollo y en la Tabla 16 las características técnicas del mismo.

Figura 29

Heltec WiFi Kit 32



Nota. Recuperado de (Heltec Automation, 2019).

Tabla 16*Características Técnicas de Heltec WiFi Kit 32*

Especificación	Descripción
Comunicación inalámbrica	WiFi 802.11 b/g/n y Bluetooth V4.2
Memoria	4MB SPI FLASH; 520 KB internal SRAM
Recurso de Hardware	UART, SPI, I2C, I2S, ADC, DAC, GPIO
Temperatura de operación	-20 ~ 70°C
Fuente de alimentación	5 V
Batería	3.7 V de litio

Nota. Recuperado de (Heltec Automation, 2019).

Microcontrolador

Es un procesador que cuenta con memoria, temporizadores, pines paralelos de E/S, entre otros periféricos todo en un solo chip, lo cual, representa una gran ventaja en cuanto a costos, ya que ahorra espacio y permite disminuir costes de fabricación y tiempo de desarrollo (Gridling & Weiss, 2007). Para la selección del microcontrolador que trabajó como Gateway en el proyecto, se tomó en consideración diferentes parámetros como la facilidad de actualización, el bajo consumo de energía, una gran fiabilidad y mecanismos de conectividad a internet, el cual se detalla a continuación.

Raspberry Pi 3

Es una pequeña computadora de bajo costo que necesita periféricos de entrada y salida como un teclado, un mouse, un monitor o TV, para interactuar con el mundo exterior. Utiliza diferentes lenguajes de programación como Python y Scratch, es capaz de ejecutar lo que un computador de escritorio podría hacer, esencial para una amplia gama de proyectos digitales (Raspberry Pi Foundation, 2014), el equipo se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Tarjeta Raspberry Pi 3



Nota. Recuperado de (Raspberry Pi, 2016).

La Tabla 17 muestra las características técnicas del microcontrolador Raspberry Pi 3.

Tabla 17

Características técnicas de la tarjeta Raspberry Pi 3

Especificación	Descripción
Certificación	EMC, RoHS
Microcontrolador	ARMv8 Quad Core
Comunicación Inalámbrica	WiFi b/g/n, Bluetooth 4.1
Frecuencia CPU	1.2 GHz
RAM	1 GB
Fuente de alimentación	5 V

Nota. Recuperado de (Raspberry Pi, 2016).

Tarjeta RFID

La tecnología RFID se refiere al intercambio inalámbrico de información utilizando frecuencias de transmisión de radio; la comunicación se realiza a través de un módulo RFID y TAGs, en el cual se encuentran almacenados los datos. Las aplicaciones más importantes son

los sistemas de identificación, seguridad, acceso de personal, entre otros (Dewanto et al., 2021).

El módulo RFID se encarga de captar y decodificar la información. Está compuesto por un transceptor, una antena y un decodificador (Luciano, 2019). Los TAGs están compuestos por una antena y un microchip de silicio. Los TAGs pasivos se energizan a través de la señal de radiofrecuencia para el traspaso de información, aunque es necesario que se acerque al módulo a una distancia menor a 10 cm y su presentación es en diferentes modelos, por ejemplo, tarjetas y llaveros (Luciano, 2019).

Se seleccionó el módulo MFRC522 para realizar la función del control de acceso en el proyecto, tomando en consideración parámetros como el rango de lectura, compatibilidad con los equipos LoRa, protocolo de comunicación y corriente de funcionamiento. Es un dispositivo que admite la comunicación sin contacto para leer y grabar información. En la Figura 31, se presenta el módulo con sus TAGs incluidas (Semiconductors, 2016).

Figura 31

Módulo RFID MFRC522 y TAGs



Nota. Recuperado de (Handsontec, 2021).

En la Tabla 18, se presenta las características técnicas del módulo RFID.

Tabla 18*Características técnicas Módulo RFID MFRC 522*

Especificación	Descripción
Voltaje de operación	2.5 V – 3.3 V
Frecuencia de operación	13.56 MHz
Corriente de funcionamiento	13 – 26 mA
Velocidad de transferencia superior	Hasta 848 kBd en ambas direcciones
Velocidad de bus SPI	Hasta 10 Mbit/s
Interfaces de host compatibles	SPI, UART, I2C
Tarjetas compatibles	MIFARE e ISO 14443A
Algoritmo de encriptación	Quick CRYPTO1 y MIFARE
Distancia de lectura	2 – 5 cm

Nota. Recuperado de (Semiconductors, 2016).

Sensores

Se seleccionó dos variables físicas que son monitoreadas por dos sensores, dichas variables son la distancia y la inclinación para brindar más robustez, seguridad y eficacia en el control de acceso a la infraestructura civil subterránea. Para la detección de las variables se escogió un sensor ultrasónico y un sensor de inclinación, con su respectiva calibración para determinar el acceso autorizado o denegado a la infraestructura subterránea.

Sensor ultrasónico

Se seleccionó un sensor ultrasónico porque sus datos o mediciones son más fiables, precisos, versátiles y resistentes que otros sensores, el cual se muestra en la Figura 32. Está compuesto por un emisor y en un receptor piezoeléctricos, tiene como finalidad medir la distancia que existe desde un objeto hasta él, es necesario que el objeto se ubique justo al

frente del sensor. Dentro de sus principales características resalta el bajo consumo energético, pequeño tamaño, alta precisión y bajo costo (Arun Francis G et al., 2019).

Figura 32

Sensor ultrasónico HC – SR04

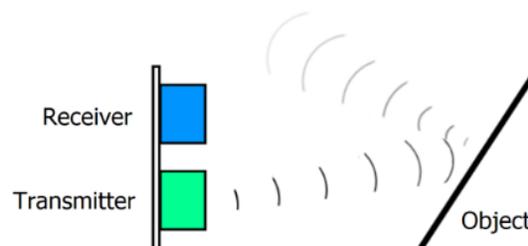


Nota. Recuperado de (Leantec, 2019).

En la Figura 33, se presenta el principio de funcionamiento que consiste en la propagación de ondas ultrasónicas que se genera en el transmisor y la iniciación del tiempo cuando se emiten. En el aire, las ondas se propagan y regresan al receptor cuando existe la presencia de cualquier objeto, esto ocasiona que el tiempo se detenga (Zhud et al., 2018).

Figura 33

Principio de funcionamiento del sensor ultrasónico



Nota. Recuperado de (Zhud et al., 2018).

A continuación, se realiza el cálculo de la distancia en base al tiempo obtenido. Se aplica la siguiente ecuación (Zhud et al., 2018).

$$S = v \cdot t \quad (1)$$

$$t = \frac{T}{2} \quad (2)$$

$$S = v \cdot \frac{T}{2} [m] \quad (3)$$

Donde:

$v \approx 340 \frac{m}{s}$ = velocidad de sonido;

t = tiempo de movimiento de la onda desde el sensor hasta el objeto;

T = tiempo de movimiento de la onda desde el sensor hasta el objeto y viceversa.

En la Tabla 19, se muestra las características técnicas del sensor ultrasónico HC-SR04.

Tabla 19

Características técnicas del sensor ultrasónico HC – SR04

Especificación	Descripción
Voltaje de operación	5V DC
Corriente de trabajo	15 mA
Rango de medición	2 cm a 450 cm
Precisión	± 3 mm
Ángulo de apertura	15°
Frecuencia de ultrasonido	40 kHz
Duración mínima del pulso de disparo TRIG (nivel TTL)	10 μs
Duración del pulso ECO de salida (nivel TTL)	100 – 25000 μs

Nota. Recuperado de (Leantec, 2019).

Sensor de inclinación

La inclinación es un tipo específico de desplazamiento angular, es decir una cantidad mecánica, generalmente indicado por el balanceo. Debido a la ley de la gravitación universal está presente en diversas situaciones de la vida diaria. Existen diferentes tipos de sensores de inclinación, como, sensores de inclinación de líquido, péndulos y sensores de inclinación de resorte de masa. En esta ocasión se menciona a un sensor de inclinación con un elemento mecánico o péndulo que crea contacto eléctrico. Se puede usar en diferentes aplicaciones como detección de inclinación, alarma antirrobo, ciudades o automóviles inteligentes, entre otros (Łuczak et al., 2021).

El tilt switch presentado en la Figura 34 es el que fue seleccionado para la implementación, se tomó en consideración ciertos parámetros como la simplicidad en el procesamiento de la señal, tamaño pequeño, alta durabilidad y confiabilidad. Dicho sensor contiene una esfera de metal en su interior, utilizado para la detección de inclinación de un ángulo pequeño. Cuando el sensor se inclina a un cierto ángulo, la esfera viaja hacia el otro extremo haciendo contacto con los pines del exterior y activando los circuitos, caso contrario, se mantiene apagado (SunFounder, 2021).

Figura 34

Tilt Switch



Nota. Recuperado de (SunFounder, 2021).

En la Tabla 20, se muestra ciertas características del sensor de inclinación.

Tabla 20

Características técnicas del sensor de inclinación

Especificación	Descripción
Uso	Detectar inclinación
Conducción Bidireccional	Interruptor de esfera
Indicadores	Salida de señal digital
Voltaje de operación	3.3 V – 5V DC

Nota. Recuperado de (SunFounder, 2021).

Plataforma IoT

De acuerdo a la investigación bibliográfica realizada y ciertas características mencionadas en el marco teórico sobre las distintas plataformas IoT, se seleccionó ThingSpeak para la visualización de los datos, debido a su versatilidad, facilidad de uso y su entorno gráfico amigable. Además, existen ciertas ventajas como la gratuidad del servicio, la escalabilidad, entre otros.

Energización de los componentes

Se ocupó una batería recargable de Li-ion que se encarga de proveer un voltaje de 3.7 V para la energización de los componentes, dicha elección se realizó en base al voltaje de alimentación de la tarjeta de desarrollo LoRa y WiFi, sensores y el módulo RFID. En la Figura 35, se visualiza el componente.

Figura 35*Batería de Litio 3.7 V*

Nota. Recuperado de (DCIM, 2021b).

En la Tabla 21 se muestran las características de la batería mencionada.

Tabla 21*Características técnicas de la batería*

Especificación	Descripción
Voltaje	3.7 V
Capacidad de almacenamiento	4800 mAh
Dimensiones	18 mm x 65 mm

Nota. Recuperado de (DCIM, 2021b).

Para lograr que los nodos tengan un sistema de energía autónomo se optó por utilizar un panel solar que será el encargado de captar la energía proveniente del sol y transformar a energía eléctrica para recargar la batería de Li-ion. Dentro de sus principales características es que su voltaje de salida es de 6 V y una corriente de 140 mA (DCIM, 2021a). El panel solar utilizado se presenta en la Figura 36.

Figura 36

Panel Solar

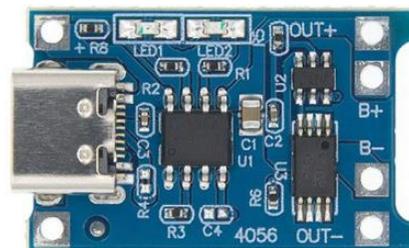


Nota. Recuperado de (DCIM, 2021a)

Para recargar la batería de Li-ion a través del panel solar es necesario utilizar un módulo de carga, en este caso se escogió el modelo TP4056, puesto que tiene una ventaja al trabajar con un PMOSFET protegiendo a la batería de corto circuitos. Además, presenta ciertas características adicionales como el bloqueo por baja tensión, monitor de corriente, indicadores de inicio y terminación de carga, y recarga automática (NanJing Top Power ASIC Corp, 2015). En la Figura 37 se muestra el módulo TP4056 y en la Tabla 22 se describen las características técnicas del mismo.

Figura 37

Módulo Cargador de Batería Li-ion



Nota. Recuperado de (UNIT Electronics, 2022)

Tabla 22

Características técnicas del módulo de carga TP4056

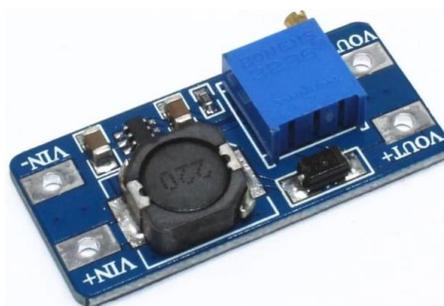
Especificación	Descripción
Voltaje de alimentación	4 V – 8 V
Voltaje de salida	4.2 V
Temperatura de funcionamiento	-40 °C – 85 °C
Precisión de carga	1.5%

Nota. Recuperado de (NanJing Top Power ASIC Corp, 2015).

Debido a que las tarjetas de desarrollo LoRa y WiFi necesitan un voltaje de alimentación de 5V es necesario hacer uso de un elevador de voltaje, en este caso se eligió el modelo MT3608, dentro de las características importantes se encuentran la limitación de corriente, bloque de baja tensión, protección de sobrecarga térmica que evita daños cuando existe sobrecargas en la salida y prolonga la vida útil de la batería (Aerosemi, 2015). En la Figura 38 se muestra el módulo MT3608 y en la Tabla 23 las características técnicas del mismo.

Figura 38

Módulo Elevador de voltaje



Nota. Recuperado de (Grupo Electrostore, 2022)

Tabla 23

Características técnicas del módulo elevador de voltaje

Especificación	Descripción
Voltaje de entrada	2 V – 24 V
Voltaje de salida	Ajustable hasta 28 V
Frecuencia de conmutación	1.2 MHz
Límite de corriente de conmutación	4 A
Eficiencia	97 %

Nota. Recuperado de (Aerosemi, 2015).

Router D-Link DIR – 615

Considerado como un equipo de alto rendimiento, fiable y versátil; facilita la conexión de diversos dispositivos a internet de banda ancha en cualquier lugar de trabajo con un máximo de 15 usuarios conectados simultáneamente, capaz de transferir información a velocidades de 300 Mbps. Para evitar los puntos muertos se ocupa antenas duales que permiten aumentar la cobertura inalámbrica. Para su configuración cuenta con un asistente intuitivo basado en web (D-Link, 2019). En la Figura 39 se muestra el router DIR-615 que fue seleccionado considerando las anteriormente mencionadas y por las características técnicas que se muestran en la Tabla 24.

Figura 39*Router D-Link DIR-615*

Nota. Recuperado de (D-Link, 2019).

Tabla 24*Características técnicas del router D-Link DIR-615*

Especificación	Descripción
Estándares	IEEE 802.11n/g/b, IEEE 802.3, IEEE 802.3x, IEEE 802.3u
Interfaz	Wireless LAN, LAN ethernet, WAN Internet
Seguridad	WPA y WPA2, WiFi Protected Setup (WPS) – PIN/PBC
Antenas	2 antenas de 5 dBi
Voltaje de entrada	100 a 240 V AC, 50/60 Hz
Consumo	5V / 1A
Temperatura de funcionamiento	0° C – 40° C

Nota. Recuperado de (D-Link, 2019).

Empaquetamiento de los componentes

Para el modelado de las cajas en 3D se utilizó el software Tinkercad, posteriormente se realizó la impresión utilizando un material termoplástico color negro. Se diseñó tres cajas, para la tecnología LoRa se presentó una caja para los nodos finales y una caja para el gateway; en cuanto a la tecnología WiFi se realizó el diseño de una caja para el nodo final. El espesor de las cajas es de 4 mm. Es importante mencionar que las cajas son experimentales y por lo tanto no cumplen con los grados de protección IP adecuado para diferentes ambientes.

En la Figura 40, se muestra la caja diseñada para el nodo 1 y 2, el cual utiliza la tarjeta de desarrollo Heltec y Ra-01SH, respectivamente. Las dimensiones son 11.3 cm x 16 cm x 9.8 cm, cuenta con diferentes perforaciones en las paredes para colocar diferentes componentes como la antena, interruptor ON/OFF, indicadores de alarma, cables de los sensores de inclinación y distancia; en un costado se aprecia una ranura la cual se utiliza para el ingreso de la tarjeta RFID. Adicional se observa la tapa, la cual presenta dos espacios que se utilizan para facilitar la apertura de la caja y para colocar el panel solar, y dos perforaciones para los cables de conexión del mismo.

Figura 40

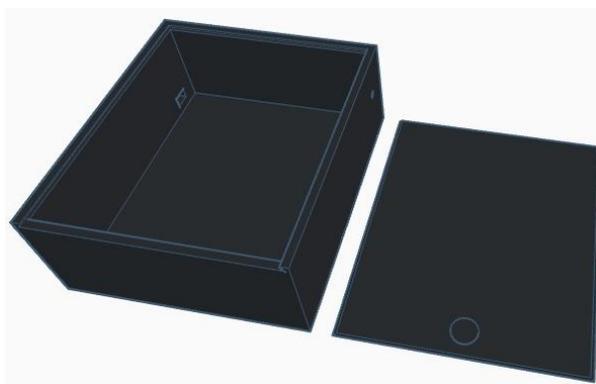
Caja diseñada para el nodo final 1 y 2



En la Figura 41, se muestra la caja diseñada para el Gateway LoRa, el cual tiene las siguientes dimensiones 13.3 cm x 15.3 cm x 6 cm, presenta perforaciones para la antena y la alimentación del microcontrolador. De igual forma se presenta la tapa que contiene un espacio para facilitar la apertura de la caja.

Figura 41

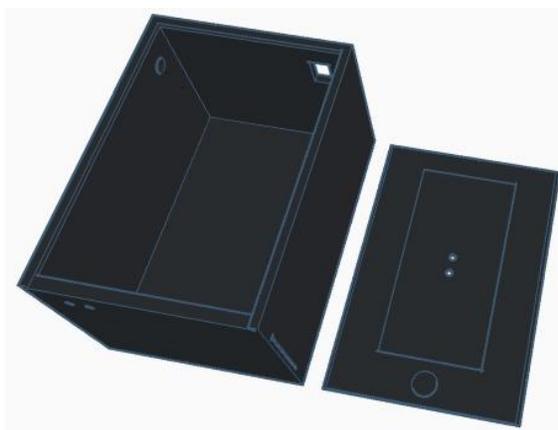
Caja diseñada para el Gateway LoRa



En la Figura 42, se muestra la caja diseñada para el nodo final de la tecnología WiFi, las dimensiones y perforaciones son idénticas a la caja del nodo 1 y 2 con la diferencia de que se omite la perforación de la antena puesto que el módulo WiFi no dispone de una.

Figura 42

Caja diseñada para el nodo final con tecnología WiFi



Capítulo IV

Desarrollo e Implementación

En el presente capítulo se describe el diagrama de bloques que indica el funcionamiento del prototipo, a su vez se modela el diagrama esquemático. Además, se detalla el hardware y el software con tecnologías LoRa y WiFi a través de diagramas de flujo para el transmisor y receptor. Posteriormente se muestra evidencia de la implementación física de los equipos descritos en el capítulo III. Por último, se presenta la configuración de la plataforma IoT.

Tecnología LoRa

En esta sección se detalla el desarrollo e implementación del prototipo en base a la tecnología LoRa.

Arquitectura de la red

En la implementación de la tecnología LoRa se seleccionó la topología estrella debido a que varios nodos finales envían información a un Gateway. La arquitectura está constituida por dos nodos finales, un Gateway y un servidor como se presenta en la Figura 43. La diferencia entre nodos radica en la utilización de tarjetas de desarrollo LoRa de diferente fabricante.

Figura 43

Arquitectura de la red

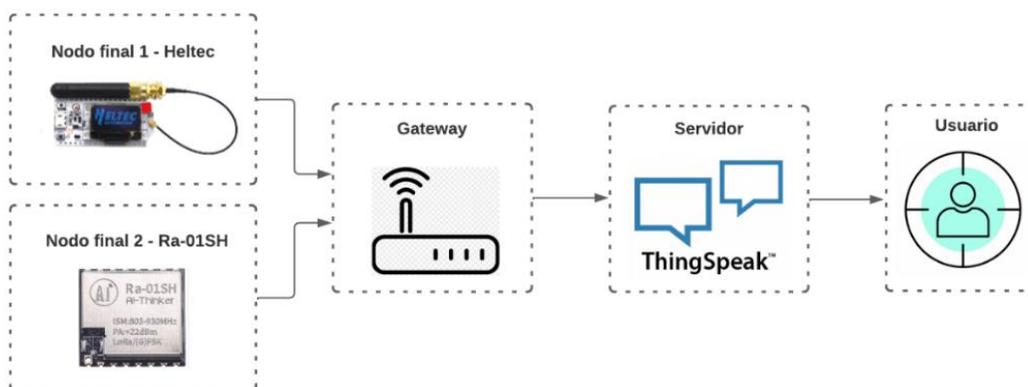
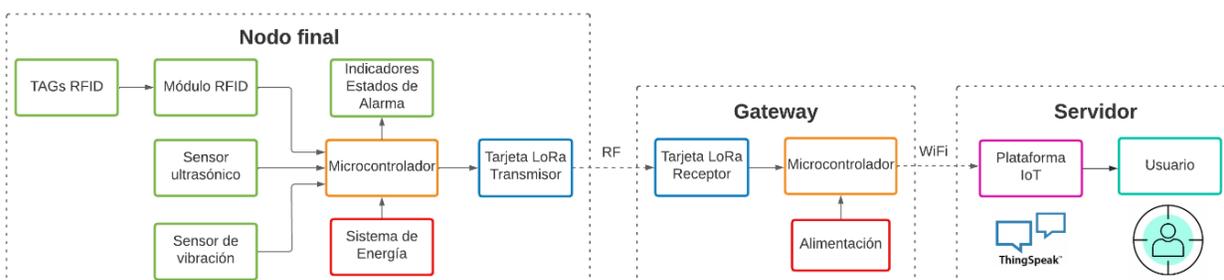


Diagrama de Bloques

El prototipo de la tecnología LoRa está constituido por 3 bloques principales como se muestra en la Figura 44 y que se describen a continuación.

Figura 44

Diagrama de Bloques de la tecnología LoRa



- **Nodo final:** Está conformado por un módulo RFID, dos sensores que permiten medir variables de distancia e inclinación. Los valores medidos son leídos por un microcontrolador y cuenta con un módulo de transmisión LoRa a 915 MHz de frecuencia. Consta de dos indicadores led de estado de alarma y un sistema de energía autónomo que consta de un convertor de voltaje, una batería y el panel solar.
- **Gateway:** Está compuesto por una tarjeta de desarrollo LoRa que se encarga de recibir el payload proveniente de los nodos finales, además tiene un microcontrolador que procesa y reenvía la información para la visualización en la plataforma IoT. Cuenta con una fuente de alimentación conectada a la red eléctrica.
- **Servidor:** En este bloque se recibe los datos enviados desde el Gateway diseñado. A través de la plataforma IoT se almacena los datos en la nube haciendo uso de una base de datos y APIs mediante el protocolo HTTP; con el fin de almacenar, transmitir y visualizar los datos de manera gráfica y dinámica en tiempo real para el usuario.

Diseño del nodo final de LoRa

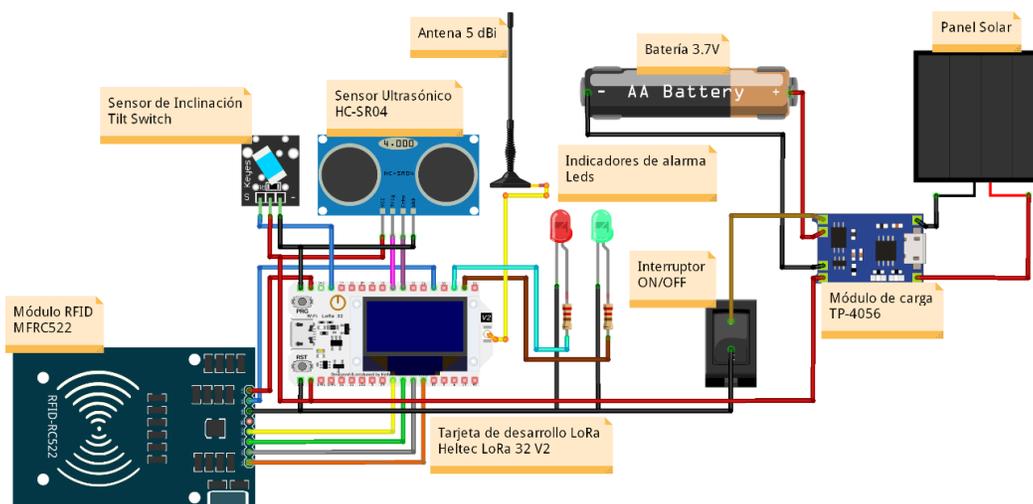
Para la implementación del nodo final se tomó en cuenta la disponibilidad y el número de pines de cada dispositivo. El principal componente es la tarjeta de desarrollo LoRa, en este dispositivo se conectó la tarjeta RFID, los sensores y los indicadores de alarma. El sensor ultrasónico mide la distancia que existe entre la tapa de soterramiento y la caja del nodo final. El sensor de inclinación detecta alguna inclinación o movimiento de la tapa de soterramiento. El módulo RFID se encarga de leer los TAGs para permitir o no la apertura de la tapa. El sistema de alimentación es el encargado de energizar a los equipos a través de una batería que es recargada por medio de un panel solar.

Diagrama esquemático del primer nodo final

En la Figura 45, se muestra la conexión entre los componentes electrónicos para el funcionamiento correcto del nodo final usando la tarjeta de desarrollo Heltec LoRa.

Figura 45

Diagrama esquemático de la tecnología LoRa con tarjeta Heltec.



En la Tabla 25, se describe la conexión de pines entre los componentes electrónicos y la tarjeta de desarrollo Heltec LoRa.

Tabla 25*Distribución de pines de la tarjeta Heltec LoRa y componentes del nodo final*

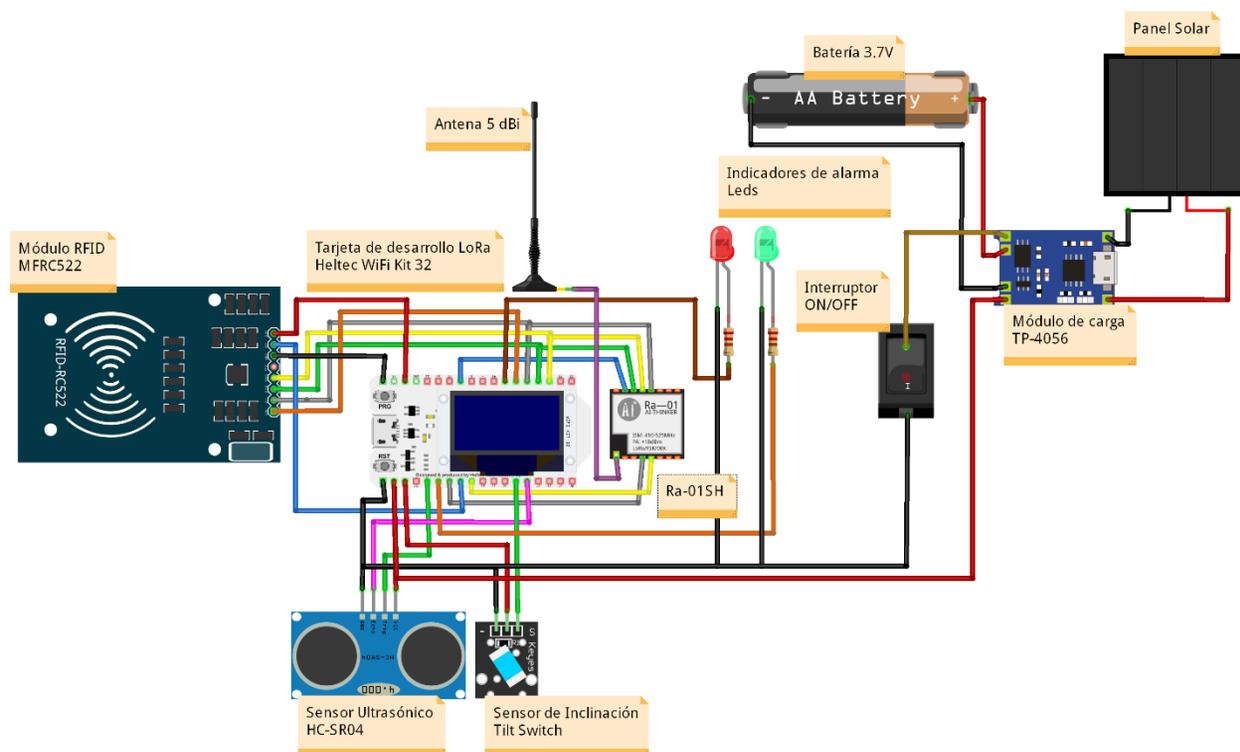
Pines de la tarjeta de desarrollo LoRa		Pines de los componentes electrónicos
Módulo RFID		
GPIO5		SDA
GPIO18		SCK
GPIO 23		MOSI
GPIO 19		MISO
GND		GND
GPIO27		RST
3.3V		3.3V
Sensor ultrasónico		
VCC		VCC
GPIO32		TRIG
GPIO33		ECHO
GND		GND
Sensor de inclinación		
GPIO36		SIG
VCC		VCC
GND		GND
Indicadores de alarma		
GPIO13		Led verde
GPIO12		Led rojo

Diagrama esquemático del segundo nodo final

En la Figura 46, se muestra la conexión entre los componentes y la tarjeta de desarrollo RA-01SH.

Figura 46

Diagrama esquemático de la tecnología LoRa con tarjeta Ra-01SH



En la Tabla 26, se describe la conexión de pines entre los componentes electrónicos y la tarjeta de desarrollo RA-01SH.

Tabla 26*Distribución de pines de la tarjeta Ra-01SH y componentes del nodo final*

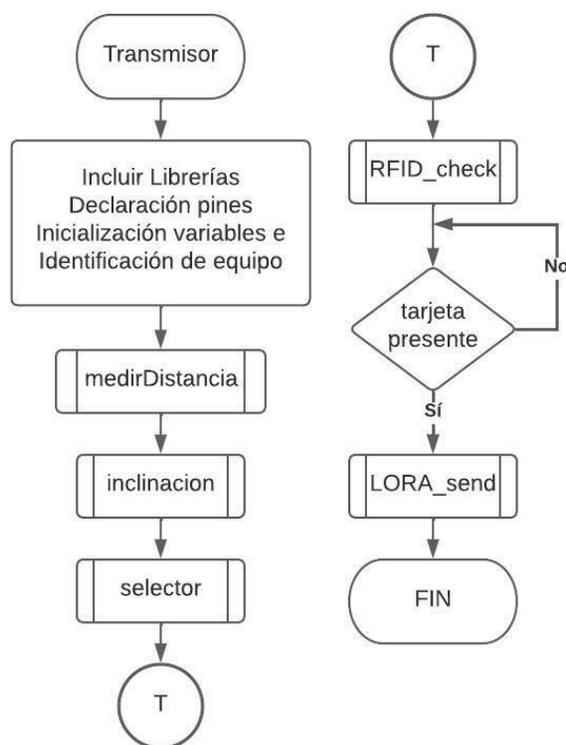
Pines de la tarjeta de desarrollo LoRa		Pines de los componentes electrónicos
Módulo RFID		
GPIO5		SDA
GPIO18		SCK
GPIO 23		MOSI
GPIO 19		MISO
GND		GND
GPIO27		RST
3.3V		3.3V
Sensor ultrasónico		
VCC		VCC
GPIO13		TRIG
GPIO34		ECHO
GND		GND
Sensor de inclinación		
GPIO35		SIG
VCC		VCC
GND		GND
Indicadores de alarma		
GPIO12		Led verde
GPIO17		Led rojo

Diagrama de flujo

Para el desarrollo del software y la configuración de las tarjetas de desarrollo LoRa se utilizó el IDE de Arduino. Los diagramas de flujo que se ocuparon para la programación del nodo final LoRa se describen a continuación.

Figura 47

Diagrama de flujo del transmisor



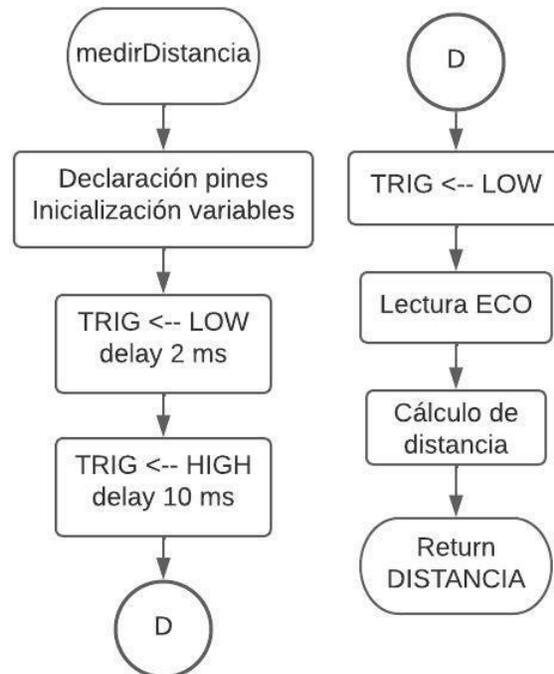
En la Figura 47 se muestra el transmisor que se compone de varias partes, en primer lugar, se incluyen las librerías de LoRa, MFRC522 para la tarjeta RFID y el protocolo de comunicación SPI (del inglés *Serial Peripheral Interface*). Tomando en consideración que puede existir conflicto entre la comunicación LoRa y la tarjeta RFID, debido a que utilizan el mismo protocolo de comunicación se definió pines diferentes para cada uno de ellos evitando errores. Como siguiente paso, se realizó la declaración e inicialización de variables para el

sensor de distancia, inclinación e indicadores de alarma. Para la identificación del equipo se colocó una dirección local y una dirección destino en hexadecimal, donde se utilizó los caracteres D1 y F1, haciendo referencia a dispositivos y Gateway, respectivamente.

Con el fin de obtener una mejor organización del código y facilitar la corrección de errores se realizó funciones como *medirDistancia*, *inclinacion*, *selector*, *RFID_check* y *LORA_send*, las cuales cumplen diferentes tareas que serán detalladas posteriormente. Dentro del código principal se llama a las funciones *medirDistancia*, *inclinacion* retornando valores que se registran de los sensores, en cuanto a la función *selector* retorna el estado de los indicadores de alarma. Con la función *RFID_check* se determina la presencia de una tarjeta RFID, si cumple dicha condición se envía los datos a través de la función *LORA_send*, caso contrario, continúa verificando la existencia de una tarjeta.

Figura 48

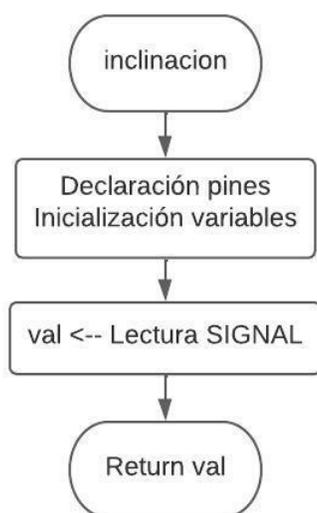
Diagrama de flujo de la función *medirDistancia*



El diagrama de flujo de la función *medirDistancia* se presenta en la Figura 48, la cual parte de la generación de un pulso en el pin TRIG, para ello se inicializa en bajo durante 2 microsegundos, se mantiene el pulso en alto durante 10 microsegundos y por último en bajo, con el fin que capte la señal por el pin ECHO. Para determinar el valor de la distancia se hizo uso de la ecuación (3), transformando el tiempo en microsegundos detectado por el pin ECHO a un valor en centímetros. Como el sensor obtiene el tiempo de ida y vuelta, se divide para dos para establecer correctamente el valor de la distancia entre el sensor y la tapa de soterramiento, finalmente retorna dicho valor.

Figura 49

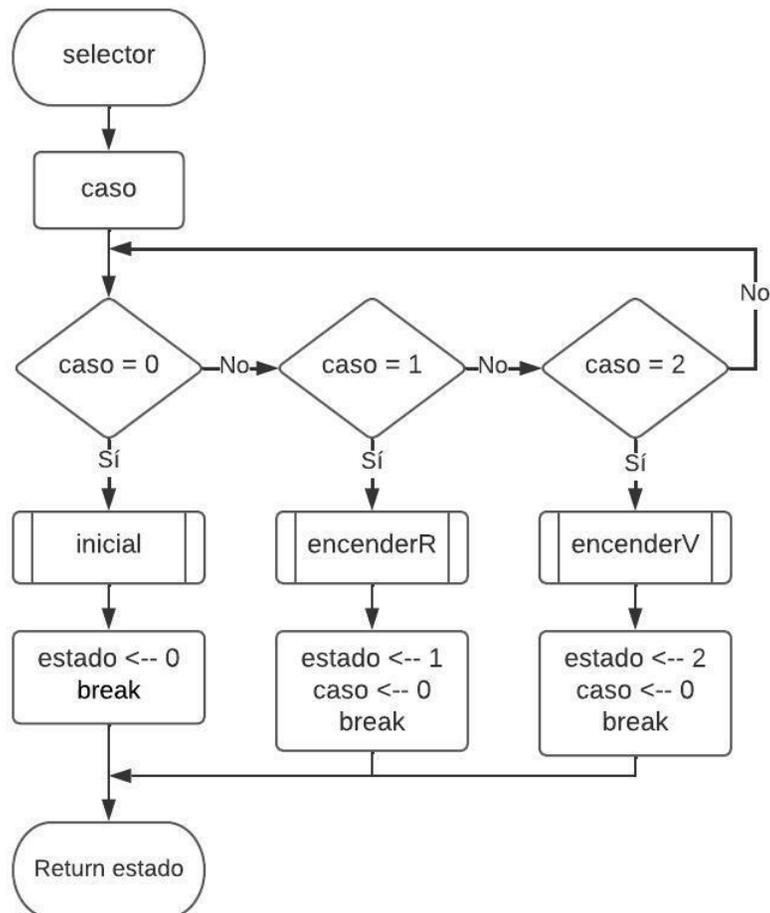
Diagrama de flujo de la función inclinación



En la Figura 49, se presenta el diagrama de flujo que corresponde a la función *inclinacion*. Dicha función lee el pin digital SIGNAL que tendrá valores lógicos 0 o 1 dependiendo del contacto en los extremos del sensor, se guarda dicho valor en la variable denominada val y devuelve el valor a la función principal.

Figura 50

Diagrama de la función *selector*

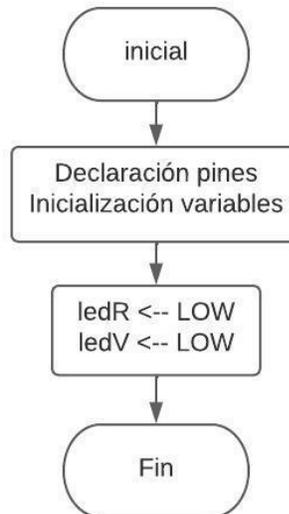


La función *selector* se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 50, que tiene como objetivo establecer el estado de la alarma a través de tres casos. El caso 0 corresponde al estado inicial, el caso 1 hace referencia al acceso denegado y el caso 2 se refiere al acceso autorizado. Al final retorna el valor de la variable estado de acuerdo al caso.

Si el caso es igual a 0, llama a la función *inicial* que se muestra en la Figura 51, en la cual permanecen apagados los indicadores de alarma o leds. Además, se coloca en 0 a la variable estado.

Figura 51

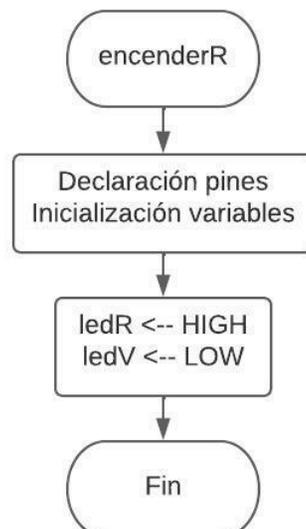
Diagrama de flujo de la función inicial



Si el caso es igual a 1, llama a la función *encenderR* que se muestra en la Figura 52, en la cual se activa el indicador rojo y desactiva el indicador verde. Además, se coloca en 1 a la variable estado y regresa al caso 0.

Figura 52

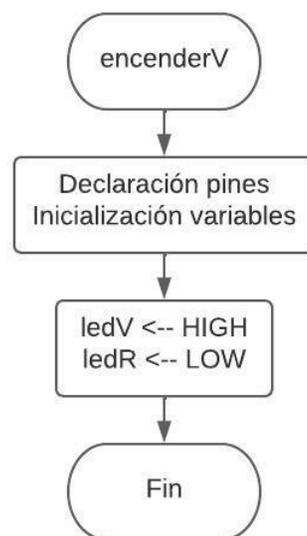
Diagrama de flujo de la función encenderR



Si el caso es igual a 2, llama a la función *encenderV* que se muestra en la Figura 53, en la cual se activa el indicador verde y desactiva el indicador rojo. Además, se coloca en 2 a la variable estado y regresa al caso 0.

Figura 53

Diagrama de flujo de la función *encenderV*



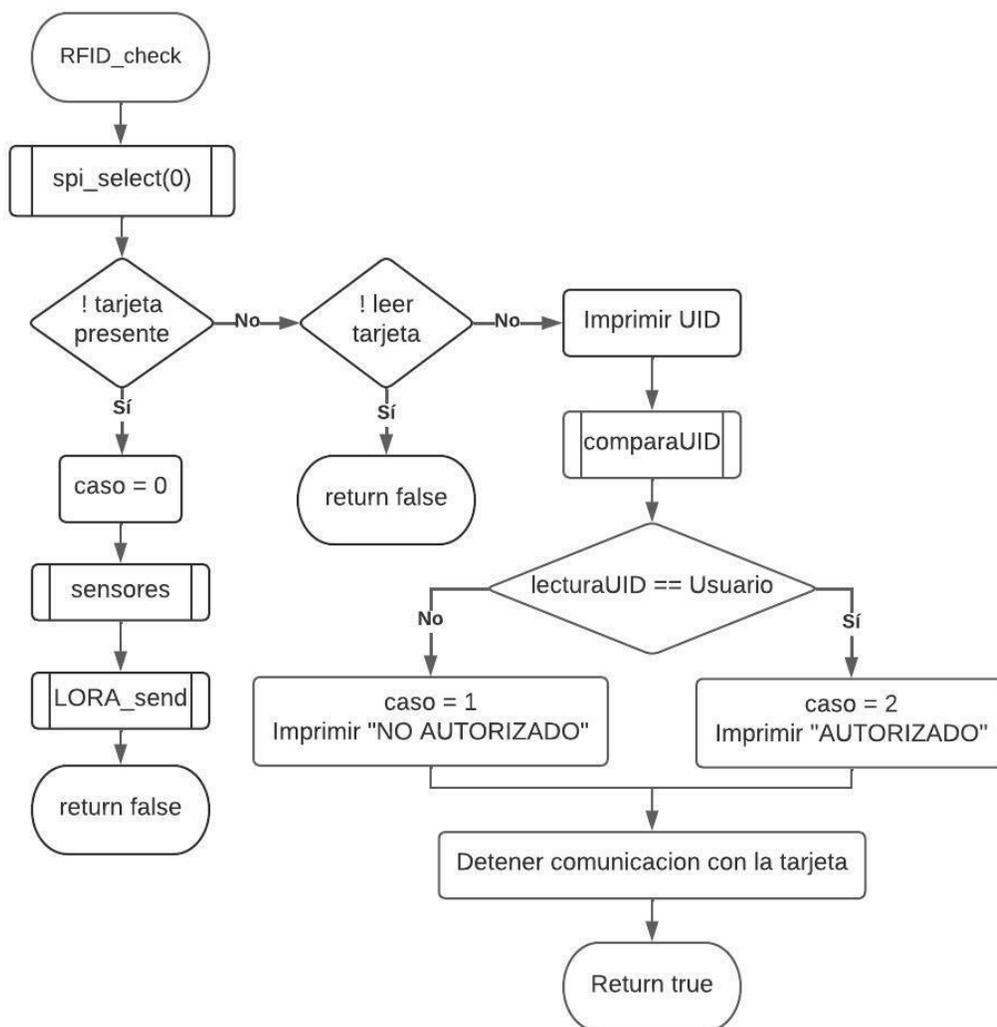
La función *RFID_check* se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 54, se compone de subfunciones que se explicarán más adelante de acuerdo a la acción que deben ejecutar. Parte con el llamado de la función *spi_select* que permite definir el modo de trabajo, es decir, inicializar el protocolo de comunicación SPI ya sea para la tarjeta RFID o para el envío de datos LoRa, en este caso toma un valor de 0.

Se ejecuta un condicional para detectar si no existe una tarjeta presente, si se cumple dicha condición se ejecuta el caso 0, se llama a la función *sensores* para validar el valor de la distancia e inclinación y monitorear la apertura de la tapa de soterramiento. Posteriormente, se realiza el envío de los datos a través de la función *LORA_send* y retorna esperando por una tarjeta.

El siguiente condicional permite la lectura de los datos de la tarjeta, si es así, se imprime el UID (del inglés *User Identifier*), caso contrario, retorna esperando por otra tarjeta. Para determinar si el usuario está autorizado se llama a la función *comparaUID* que analiza los datos de la UID registrada y la UID leída. Se aplica un condicional que tendrá dos casos, si los datos son iguales se ejecuta el caso 2 y se imprime "AUTORIZADO", caso contrario, se ejecuta el caso 1 y se imprime "NO AUTORIZADO", por último, se detiene la comunicación con la tarjeta y retorna verdadero si existió la verificación de una tarjeta.

Figura 54

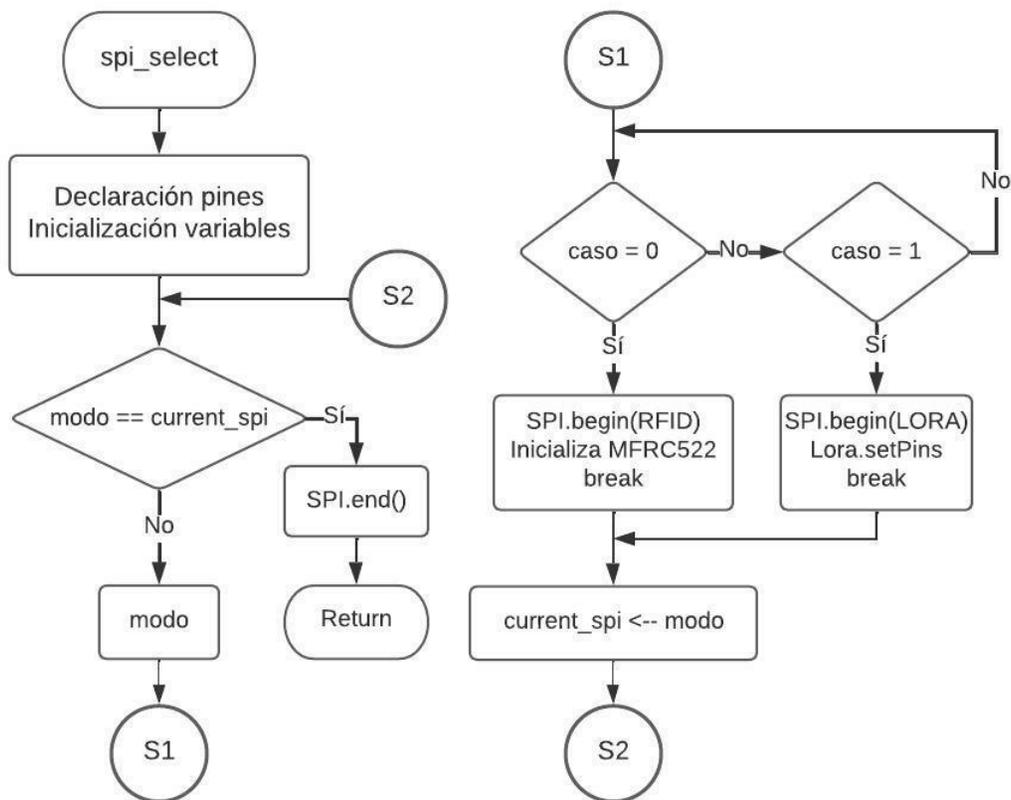
Diagrama de flujo de la función RFID_check



En la Figura 55 se presenta el diagrama de flujo de la función *spi_select*, donde existen tres casos, el primer caso hace referencia a que ningún modo de trabajo está en uso, el segundo caso habilita la tarjeta RFID y el tercer caso activa la comunicación LoRa, para ello se utiliza la variable *current_spi* que tendrá valores de -1, 0 y 1, respectivamente. La comunicación SPI finaliza cuando los modos de trabajo se encuentran inactivos, caso contrario, se presentan dos casos. En el modo 0 inicia el SPI según la definición de pines para el módulo MFRC522 y habilita su funcionamiento. El modo 1 prepara el protocolo SPI de acuerdo a la definición de pines para LoRa y los configura para la comunicación. Finalmente, se coloca el modo en el valor actual SPI.

Figura 55

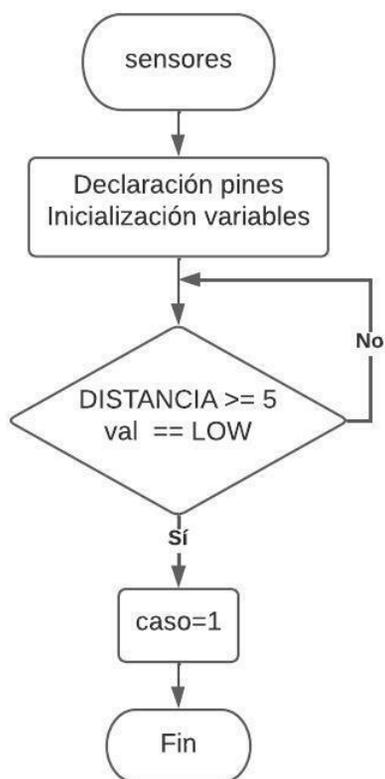
Diagrama de flujo de la función spi_select



El diagrama de flujo de la Figura 56 corresponde a la función sensores, en el cual se establece los parámetros para validar la apertura de la tapa de soterramiento cuando no existe una tarjeta presente. El valor de la distancia debe ser mayor igual a 5 y el valor lógico de inclinación será bajo, si se cumple dicha condición se ejecuta el caso 1.

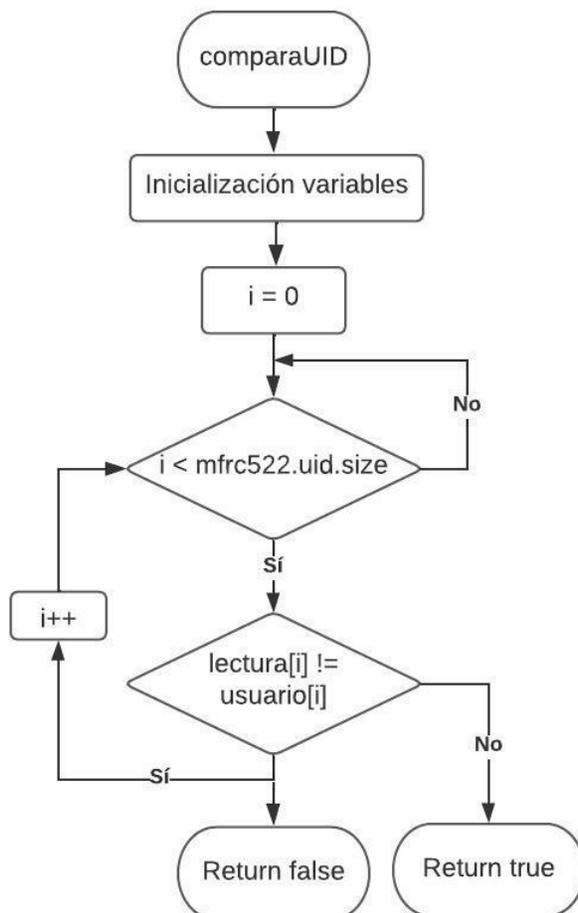
Figura 56

Diagrama de flujo de la función sensores



La Figura 57 muestra el diagrama de flujo de la función comparaUID, para ello es necesario registrar el UID del usuario que será autorizado dentro de un vector de 4 bytes. Se hace uso de un bucle para comparar cada byte entre la tarjeta registrada y leída, si los UID coinciden retorna verdadero, de lo contrario, retorna falso.

Figura 57

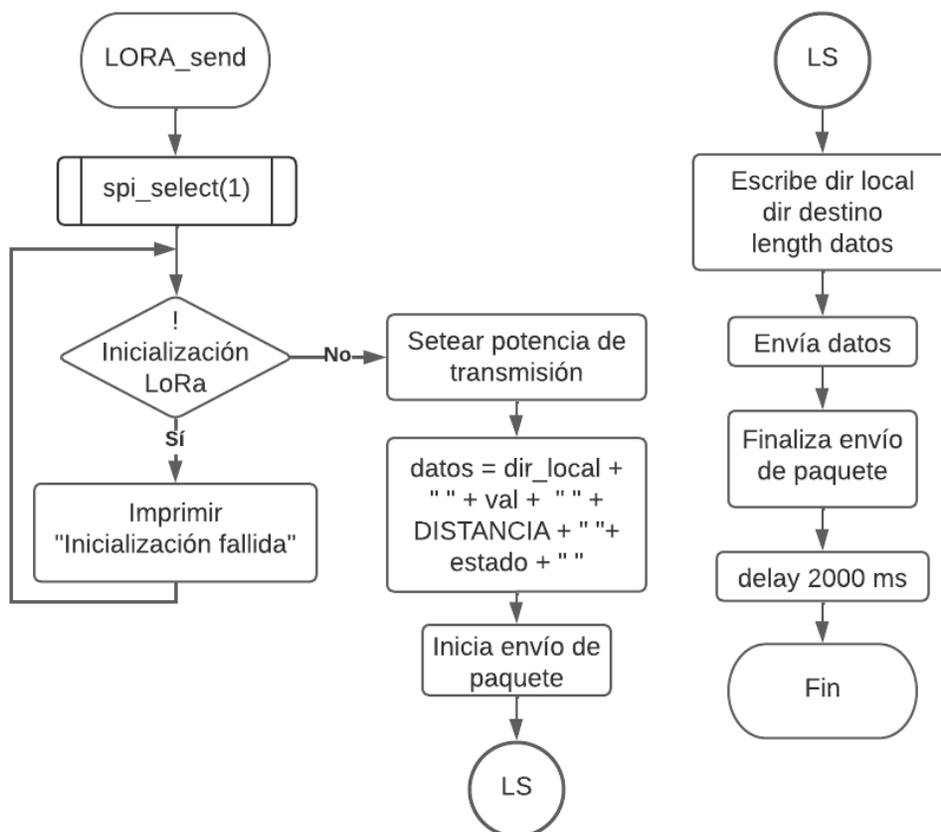
Diagrama de flujo de la función *comparaUID*

En el diagrama de flujo de la Figura 58 se presenta la función *LORA_send*. En este caso se llama a la función *spi_select* con un valor de 1. Se utiliza un condicional para la inicialización de LoRa a una frecuencia de 915 MHz, en el cual si existe un problema de conexión imprime el mensaje “Inicialización fallida”, caso contrario, se configura la potencia de transmisión a 14 dBm y se construye la estructura del mensaje el cual contiene los siguientes campos: *dir_local*, *val*, *distancia* y *estado*; cada uno seguido de un espacio con el fin de que la decodificación en el Gateway sea manejable. A continuación, comienza el envío de paquetes

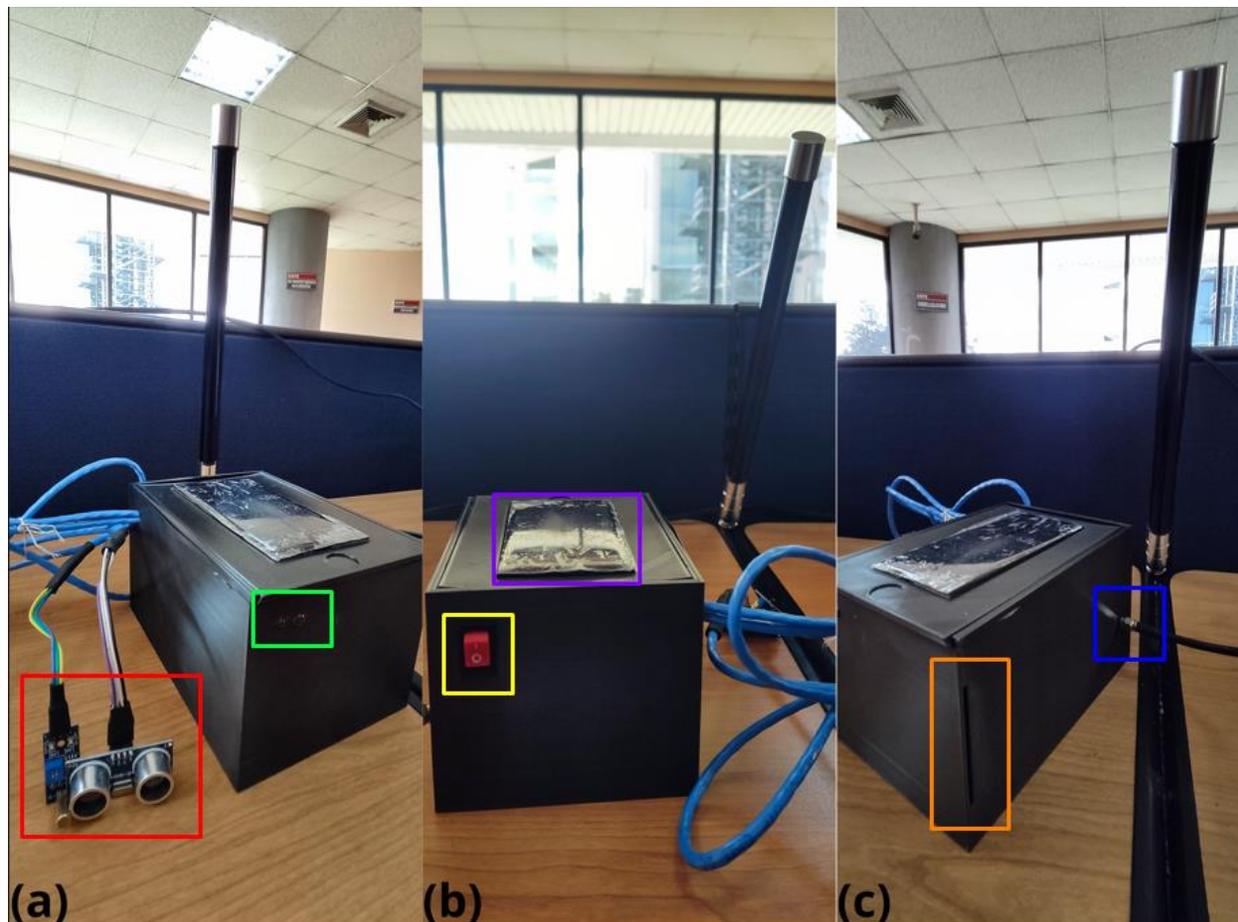
cada 2 segundos, se escribe la dirección destino, la dirección local y la longitud del mensaje, se imprime los datos y finaliza el envío de paquetes.

Figura 58

Diagrama de flujo de la función LORA_send



La Figura 59 presenta la implementación del primer nodo final LoRa que funciona con la tarjeta de desarrollo Heltec desde diferentes ángulos; en la Figura 59a se señalan los sensores y los indicadores de alarma con un recuadro de color rojo y verde, respectivamente. En la Figura 59b se muestra el interruptor de encendido/apagado y el panel solar encerrados con un recuadro amarillo y violeta, respectivamente. Por último, en la Figura 59c se marca con un recuadro de color naranja y azul a la ranura para el ingreso de la tarjeta y el orificio para la antena, respectivamente.

Figura 59*Implementación del primer nodo final LoRa*

Nota. a) Vista lateral izquierda. b) Vista frontal. c) Vista lateral derecha.

La Figura 60 presenta la implementación del segundo nodo final LoRa que funciona con el chip RA-01SH desde diferentes ángulos; en la Figura 60a se señalan los sensores y los indicadores de alarma con un recuadro de color verde y amarillo, respectivamente. En la Figura 60b se muestra el interruptor de encendido/apagado y el panel solar encerrados con un recuadro rojo y naranja, respectivamente. Por último, en la Figura 60c se marca con un recuadro de color azul y violeta a la ranura para el ingreso de la tarjeta y el orificio para la antena, respectivamente.

Figura 60

Implementación del segundo nodo final LoRa



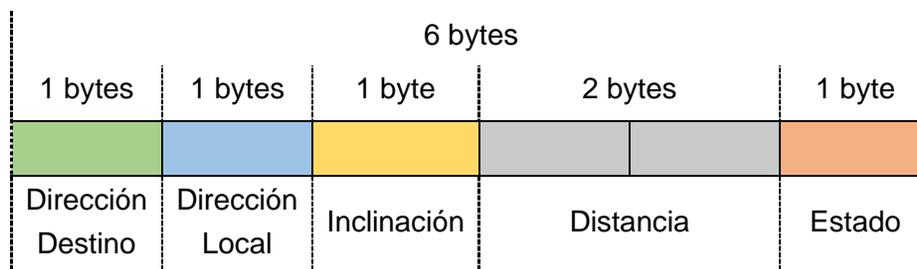
Nota. a) Vista lateral izquierda. b) Vista frontal. c) Vista lateral derecha.

Definición del payload de LoRa

Para la construcción del payload de LoRa se tomó en consideración las variables que se enviaron desde el nodo final hacia el Gateway, en este caso, dirección destino y local, inclinación, distancia y estado. De acuerdo al tipo de datos se definió un número específico de bytes, para la dirección destino y local se estableció 1 byte a cada uno debido a que las identificaciones de dispositivos y gateway se representa de forma hexadecimal hasta FF. De igual forma, para la variable distancia se estableció 2 bytes, es decir se puede representar hasta el número 65535. Por último, la variable inclinación y estado contienen 1 byte cada uno debido a que se necesita representar 0, 1 y 2. Por lo tanto, el número de bytes totales que se definió en el payload es de 6 bytes, como se presenta en la Figura 61.

Figura 61

Payload de LoRa definido



Diseño del Gateway

El diseño del Gateway consta de dos componentes, la tarjeta de desarrollo Heltec y un microcontrolador Raspberry Pi conectados de forma serial para el envío de información. En la tarjeta de desarrollo Heltec se recibe las variables enviadas desde el nodo final mientras que el microcontrolador decodifica la información para el envío de datos a la plataforma IoT.

En la Figura 62 se muestra el diagrama de flujo del receptor, en primer lugar, se incluyó las librerías de LoRa y SPI para establecer la comunicación, se realizó la declaración de pines e inicialización de variables LoRa e identificadores de dispositivos. Se aplicó un condicional para comprobar si existe un paquete entrante, de ser el caso se procede a la lectura de datos de los identificadores, caso contrario sigue verificando paquetes existentes. Si el receptor se encuentra disponible guarda los datos en la variable mensaje. Además, se utilizan dos validaciones para recibir la información, la primera se basa en las longitudes del mensaje enviado y el mensaje recibido con el fin de verificar que no exista pérdida de paquetes. La segunda consiste en la verificación del identificador del dispositivo en un rango de 00 a FF en hexadecimal, es decir, el receptor puede admitir 255 nodos, a su vez, la dirección destino del nodo debe coincidir con la dirección local del receptor con el propósito de prohibir el acceso a dispositivos no deseados. Por último, se imprime el mensaje y el valor de RSSI (del inglés

Received Signal Strength Indicator) por repetidas ocasiones para que se actualicen los datos de forma correcta en la plataforma IoT.

Figura 62

Diagrama de flujo del receptor

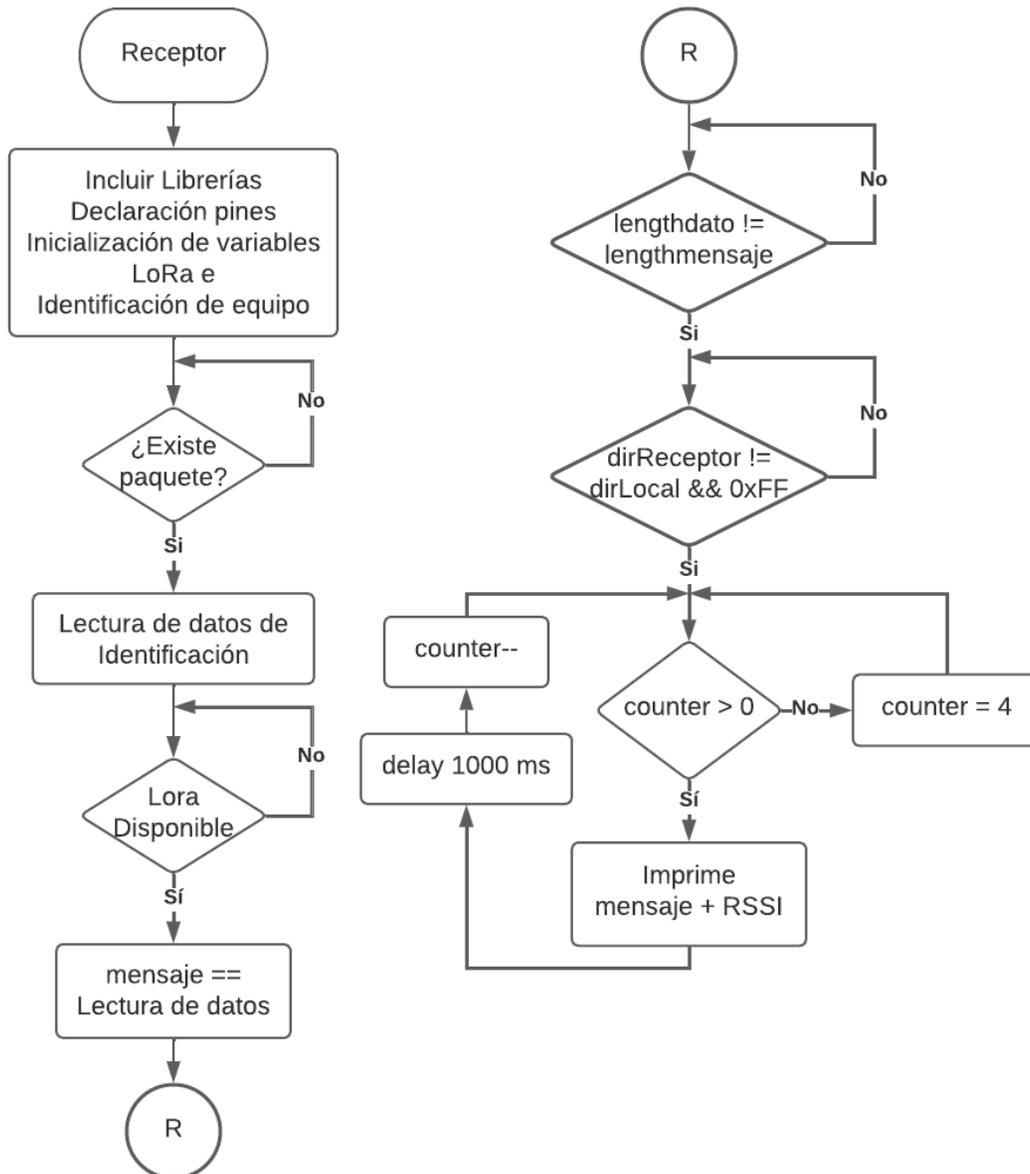
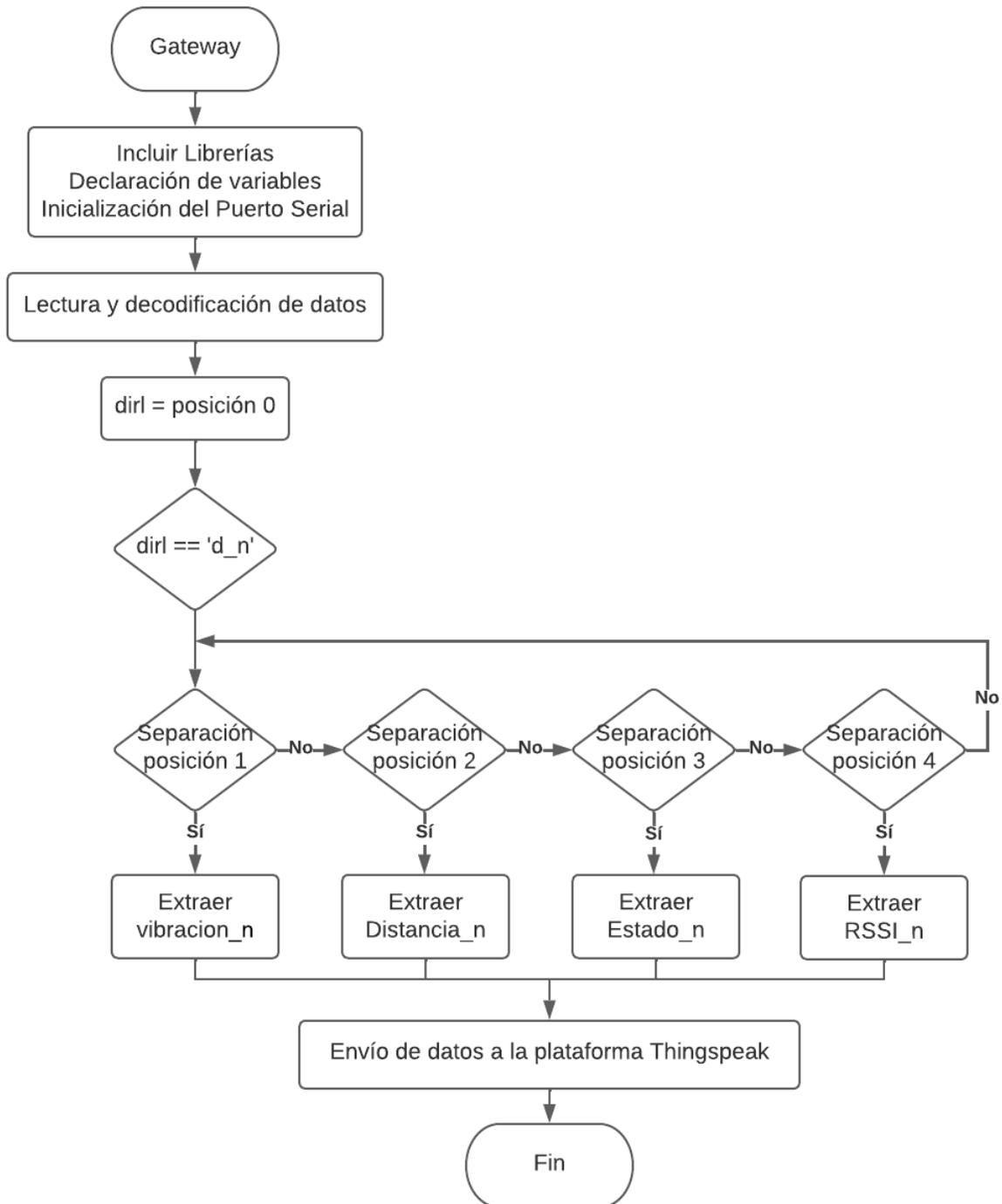


Figura 63*Diagrama de flujo del Gateway*

En la Figura 63 se presenta el diagrama de flujo del Gateway, inicia incluyendo las respectivas librerías, declaración de variables e inicialización de la lectura de datos a través del puerto serial. Como los datos provenientes del receptor se encuentran dentro de un vector es necesario la lectura y decodificación de los datos, para ello, se separan los datos de acuerdo a los espacios designados en el transmisor. Con el primer dato del vector que hace referencia a la dirección local se realizó un condicional para direccionar los datos e identificar a qué nodo corresponden, posteriormente, se guardó cada dato en nuevas variables. Por último, se realiza la solicitud de acceso y escritura de los datos en la plataforma ThingSpeak para cada nodo en su respectivo dashboard.

En la Figura 64 se muestra el resultado final del Gateway LoRa, en la cual se puede apreciar el montaje del equipo desde diferentes ángulos.

Figura 64

Implementación de Gateway LoRa



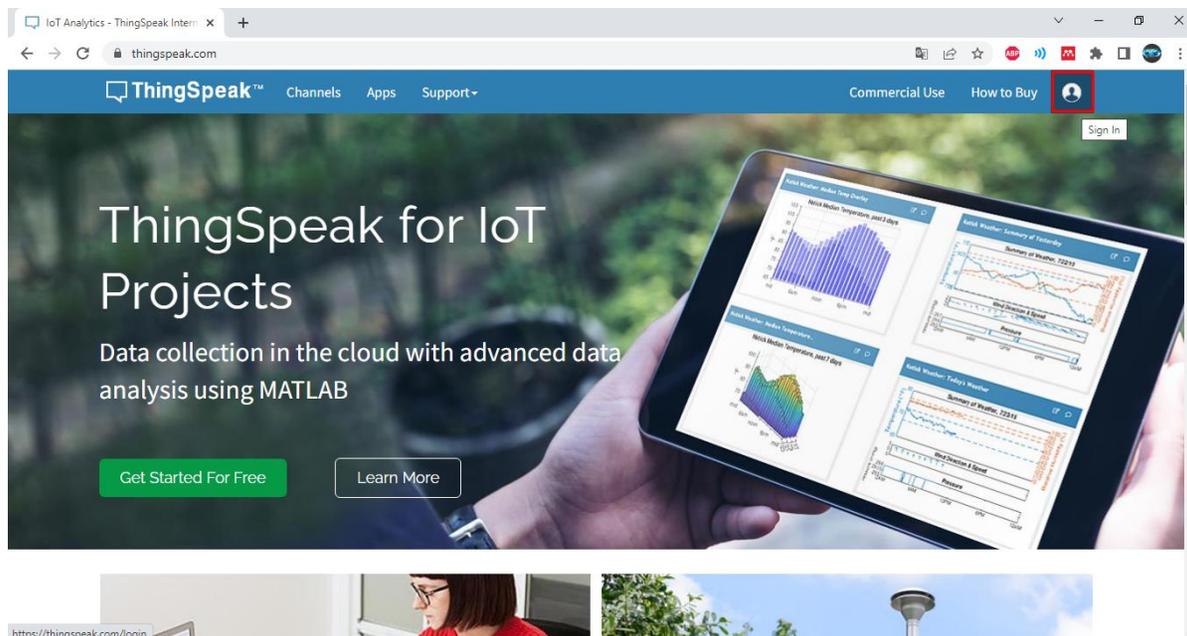
Nota. a) Conexión de alimentación. b) Vista Frontal. c) Conexión de antena.

Configuración del servidor de la tecnología LoRa

La plataforma IoT empleada para la visualización de los datos fue ThingSpeak, para acceder a las funcionalidades que se ofrece es necesario acceder a una cuenta en la página oficial dando clic en el icono que se encuentra enmarcado en la Figura 65.

Figura 65

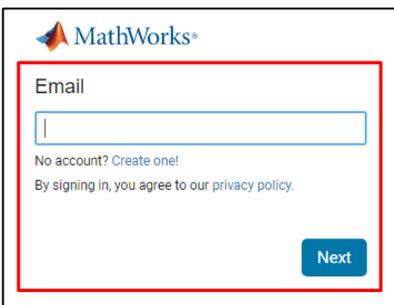
Página oficial de ThingSpeak



A continuación, se debe ingresar el correo y la contraseña del usuario tal como se muestra en la Figura 66; en el caso de no tener una cuenta es necesario la creación de la misma.

Figura 66

Registro de usuario

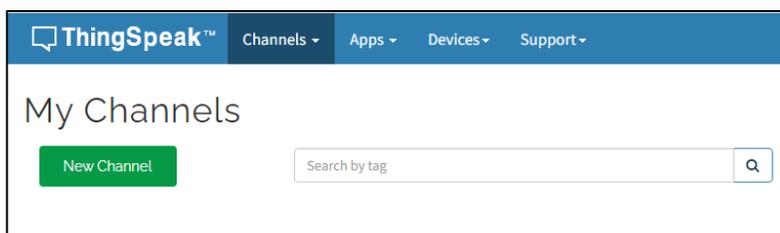


The screenshot shows the MathWorks user registration interface. At the top left is the MathWorks logo. Below it, the word "Email" is displayed above a text input field. Underneath the input field, there is a link that says "No account? Create one!". Below that, a smaller line of text reads "By signing in, you agree to our privacy policy." At the bottom right of the form area, there is a blue button labeled "Next". The entire registration form is enclosed in a red rectangular border.

Una vez iniciada la sesión se mostrará la interfaz gráfica que se visualiza en la Figura 67, en la cual se podrá crear los canales que contendrán la información de las variables de acuerdo a los nodos finales.

Figura 67

Interfaz gráfica de usuario

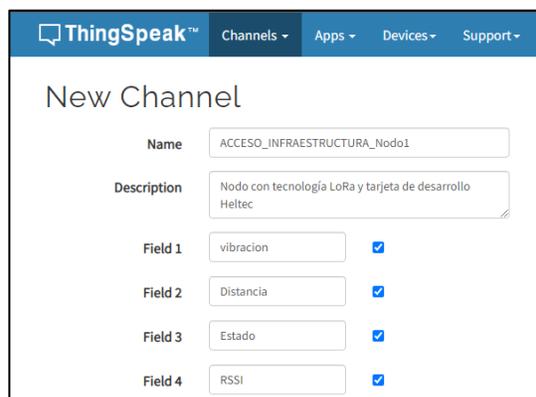


The screenshot displays the ThingSpeak user interface. At the top, there is a blue navigation bar with the ThingSpeak logo on the left and menu items "Channels", "Apps", "Devices", and "Support" on the right, each with a dropdown arrow. Below the navigation bar, the main content area is titled "My Channels". On the left side of this area, there is a green button labeled "New Channel". To the right of this button is a search bar with the placeholder text "Search by tag" and a magnifying glass icon on the right side.

En la Figura 68 se aprecia el ingreso de la información para la creación del canal, para ello es necesario llenar el nombre del nodo y el nombre de los campos que hacen referencia a las variables que recepta el gateway, es necesario tomar en cuenta que dichos nombres deben ser idénticos para una correcta visualización de datos.

Figura 68

Creación de canales



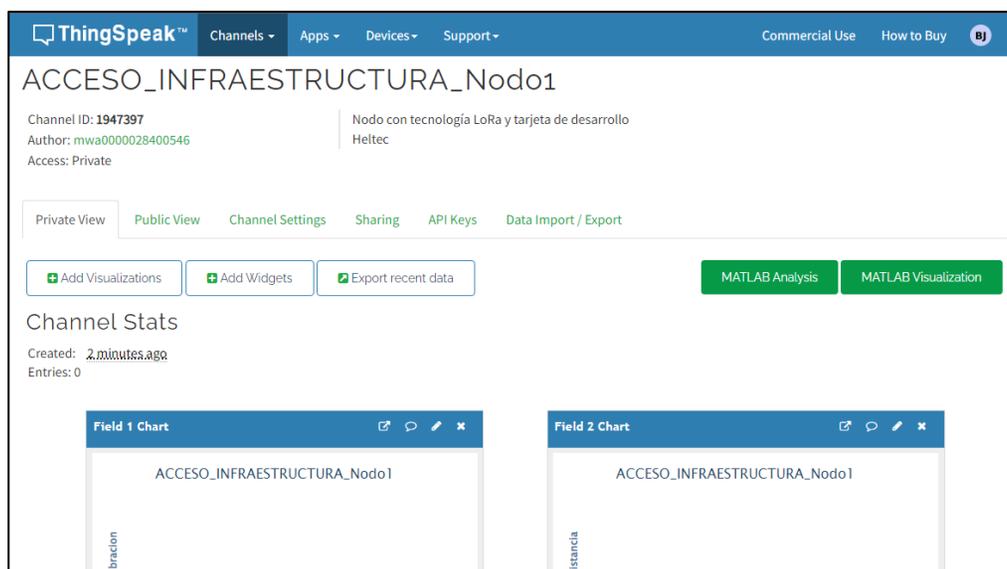
The screenshot shows the 'New Channel' form in the ThingSpeak interface. The form includes the following fields and options:

- Name:** ACCESO_INFRAESTRUCTURA_Nodo1
- Description:** Nodo con tecnología LoRa y tarjeta de desarrollo Heltec
- Field 1:** vibracion (checked)
- Field 2:** Distancia (checked)
- Field 3:** Estado (checked)
- Field 4:** RSSI (checked)

En la Figura 69 se muestra el Dashboard del nodo final, el cual ofrece al usuario diferentes secciones. Las utilizadas en este proyecto son: private view permite añadir gráficas y widgets según las variables o datos requeridos; channel settings sirve para modificar las configuraciones del canal, a través de API Keys es posible la escritura o lectura de datos y ofrece la opción de importar o exportar los resultados.

Figura 69

Dashboard del nodo final



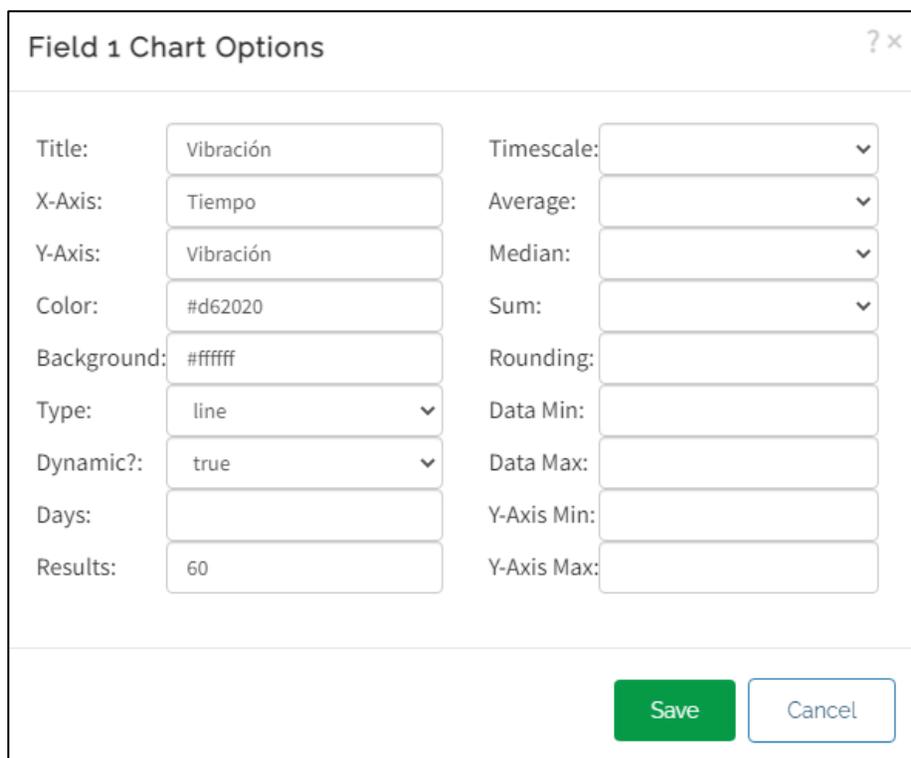
The screenshot shows the dashboard for the channel 'ACCESO_INFRAESTRUCTURA_Nodo1'. The dashboard includes the following elements:

- Channel Information:** Channel ID: 1947397, Author: mwa0000028400546, Access: Private. Description: Nodo con tecnología LoRa y tarjeta de desarrollo Heltec.
- Navigation:** Private View, Public View, Channel Settings, Sharing, API Keys, Data Import / Export.
- Actions:** Add Visualizations, Add Widgets, Export recent data, MATLAB Analysis, MATLAB Visualization.
- Channel Stats:** Created: 2 minutes ago, Entries: 0.
- Visualizations:** Two charts are displayed: 'Field 1 Chart' (vibracion) and 'Field 2 Chart' (Distancia).

Con el fin de identificar con mayor facilidad las variables que la plataforma recibe fue necesario realizar ciertas configuraciones dentro de los campos. En la Figura 70 se muestra el cuadro donde se modificó ciertas características, por ejemplo, el nombre de las variables, sus respectivos ejes, entre otros.

Figura 70

Configuración de las gráficas de los campos



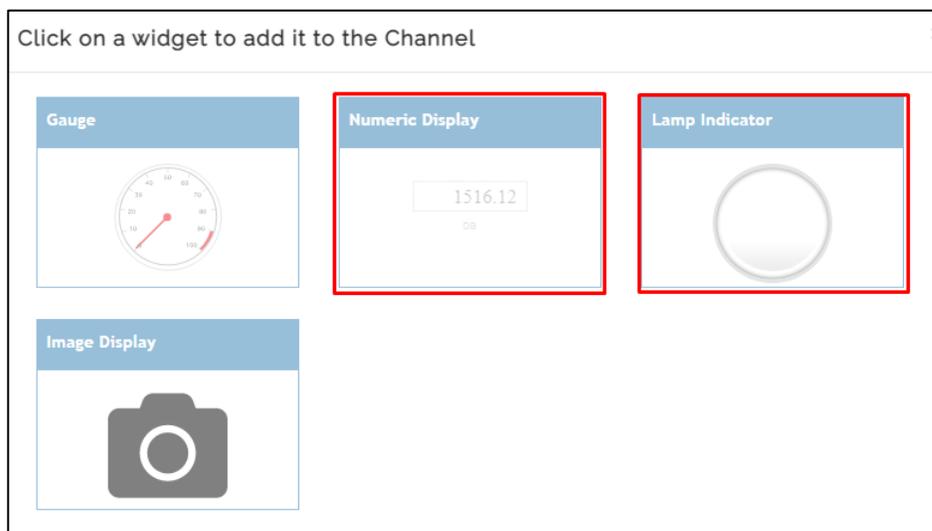
Field 1 Chart Options	
Title:	Vibración
X-Axis:	Tiempo
Y-Axis:	Vibración
Color:	#d62020
Background:	#ffffff
Type:	line
Dynamic?:	true
Days:	
Results:	60
Timescale:	
Average:	
Median:	
Sum:	
Rounding:	
Data Min:	
Data Max:	
Y-Axis Min:	
Y-Axis Max:	

Save Cancel

La plataforma ofrece una variedad de widgets que se pueden asociar a cada una de las variables recibidas. En este caso, para las variables de vibración y estado se utilizó el indicador de lámpara, mientras que, para las variables de distancia y RSSI se empleó un display numérico, como se muestra en la Figura 71.

Figura 71

Tipos de widgets



Para la configuración del widget indicador de lámpara se colocó el nombre de la variable, realizar un condicional de acuerdo al campo y la acción que se desee tomar, como se muestra en la Figura 72.

Figura 72

Configuración del widget indicador de lámpara

The screenshot shows a configuration window titled "Vibracion Options" with a help icon (?) and a close button (X) in the top right corner. The window contains the following fields and options:

- Name:** A text input field containing "Vibracion".
- Condition:** A section labeled "Condition" with the following sub-fields:
 - Field:** A dropdown menu showing "Field 1".
 - Operator:** A dropdown menu showing "is equal to".
 - Value:** A text input field containing "0".
- Action:** The text "turn Lamp ON" is displayed below the condition fields.
- Update Interval:** A text input field containing "15" followed by the label "second(s)".
- Color:** A color selection field showing a green square.

Con respecto a la configuración del widget display numérico que se presenta en la Figura 73, se debe ingresar el nombre de la variable, escoger el campo que se desee asociar, las unidades y el tipo de dato ya sea entero o decimal.

Figura 73

Configuración del widget display numérico

The screenshot shows a configuration window titled "Distancia Options". It contains the following fields and options:

- Name:** Distancia
- Field:** Field 2
- Update Interval:** 15 second(s)
- Units:** cm
- Data Type:** Integer (selected), Decimal
- # of places:** 1

En la Figura 74 se presenta un resumen de los canales creados para LoRa.

Figura 74

Canales creados para la tecnología LoRa

The screenshot shows the "My Channels" interface with a table of channels. The table has columns for Name, Created, and Updated. Two channels are highlighted with a red box:

Name	Created	Updated
ACCESO_INFRAESTRUCTURA_Nodo1 Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2022-04-14	2023-01-24 02:41
ACCESO_INFRAESTRUCTURA_Nodo2 Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2022-08-06	2023-01-24 02:39

Tecnología WiFi

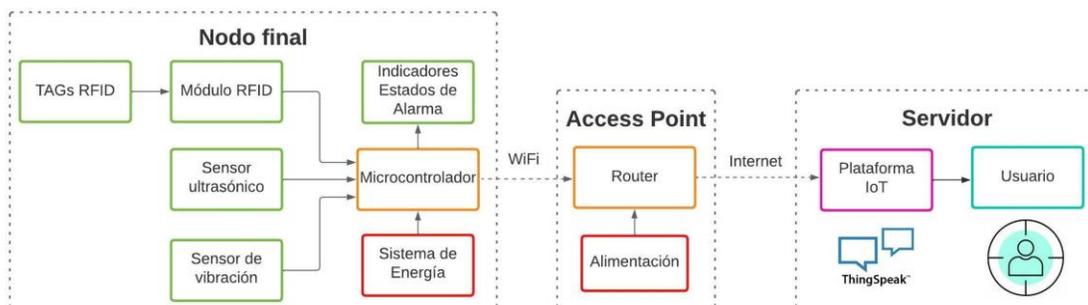
En esta sección se detalla el desarrollo e implementación del prototipo en base a la tecnología WiFi.

Diagrama de Bloques

El prototipo de la tecnología WiFi está constituido por 3 bloques principales como se muestra En la Figura 75 y se describen a continuación.

Figura 75

Diagrama de Bloques de la tecnología WiFi



- **Nodo final:** Compuesto por los componentes descritos en el diagrama de bloques de la tecnología LoRa y su sistema de energía. En este caso, la diferencia radica en que los datos se transmiten a través de un chip que trabaja bajo la tecnología WiFi.
- **Access Point:** Está conformado por un router cuya función es la de recibir los datos desde el transmisor y enviar a la nube. Además, cuenta con la fuente de alimentación conectada a la red de energía.
- **Servidor:** Tiene las mismas funciones que se mencionó en la explicación de la tecnología LoRa, usando un dashboard diferente.

Diseño del nodo final

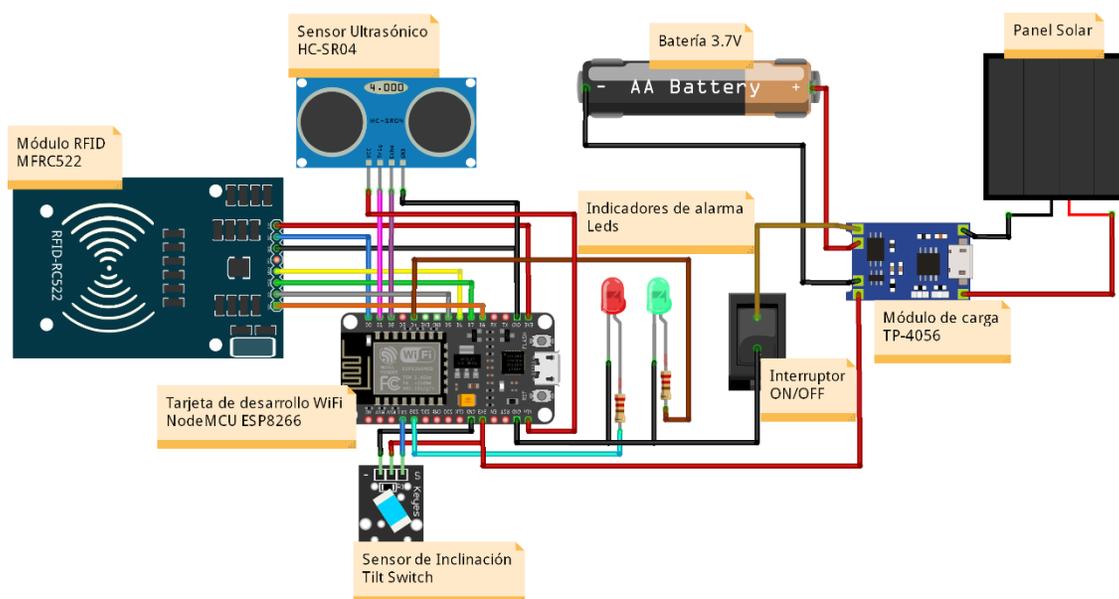
La disponibilidad y el número de pines fueron parte de las consideraciones primordiales que se tomó en cuenta para la implementación del nodo final. En este caso, la tarjeta de desarrollo WiFi es el componente principal, en donde se conectaron los mismos componentes mencionados en la tecnología LoRa con sus respectivas funciones. Cabe recalcar que de igual forma cuenta con un sistema de alimentación autónomo para energizar los componentes.

Diagrama esquemático

En la Figura 76, se muestra la conexión entre los componentes electrónicos para el funcionamiento correcto del nodo final.

Figura 76

Diagrama esquemático de la tecnología WiFi



En la Tabla 27, se describe la conexión de pines entre los componentes electrónicos y la tarjeta de desarrollo WiFi.

Tabla 27*Distribución de pines de la tarjeta WiFi y componentes del nodo final*

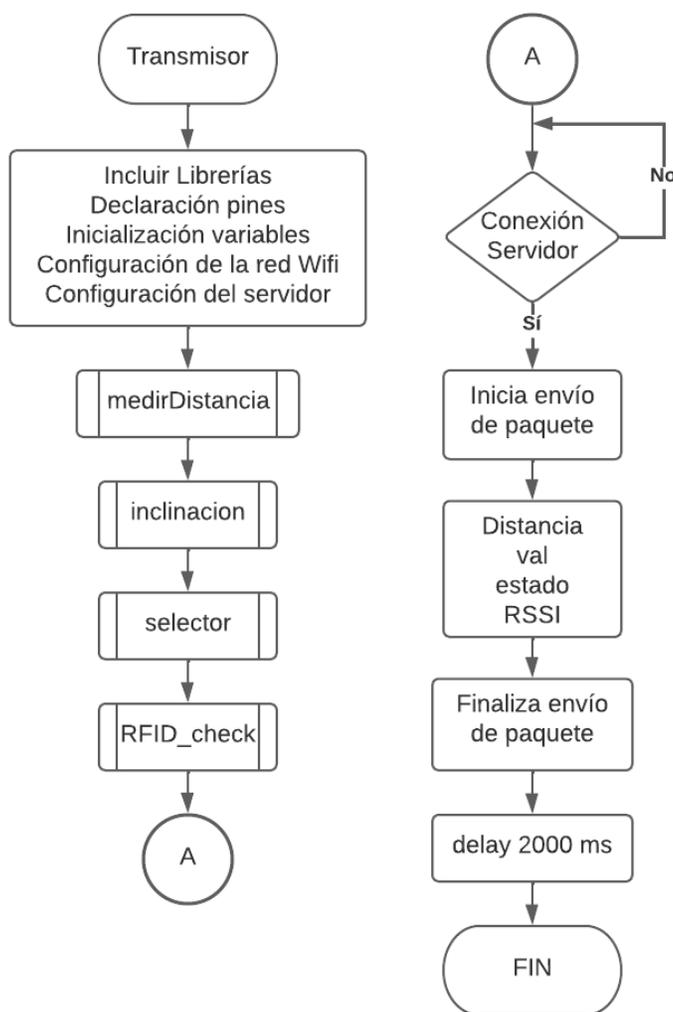
Pines de la tarjeta de desarrollo WiFi	Pines de los componentes electrónicos
Módulo RFID	
GPIO15	SDA
GPIO14	SCK
GPIO13	MOSI
GPIO12	MISO
GND	GND
GPIO16	RST
3.3 V	3.3V
Sensor ultrasónico	
Vin	VCC
GPIO5	TRIG
GPIO4	ECHO
GND	GND
Sensor de inclinación	
GPIO10	SIG
VCC	VCC
GND	GND
Indicadores de alarma	
GPIO2	Led verde
GPIO9	Led rojo

Diagrama de flujo

Para el desarrollo del software y la configuración de la tarjeta de desarrollo WiFi se utilizó el IDE de Arduino. Los diagramas de flujo que se ocuparon para la programación de los nodos finales se describen a continuación.

Figura 77

Diagrama de flujo principal de la tecnología WiFi



El diagrama de flujo de la Figura 77 muestra el funcionamiento principal de la tecnología WiFi. Las funciones *medirDistancia*, *inclinacion*, *selector* y *RFID_check* se explicarán

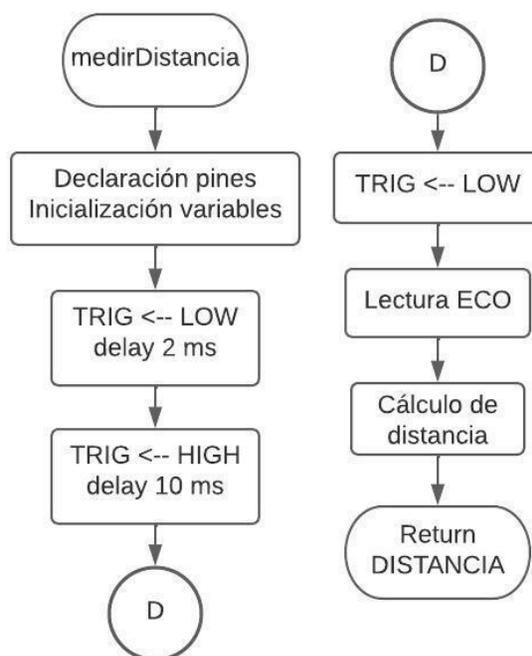
posteriormente con el propósito de detectar la apertura de la tapa de soterramiento.

Inicialmente se incluyen las librerías necesarias para trabajar con el módulo WiFi, RFID y el protocolo de comunicación, en este caso ESP8266WiFi, MFRC522 y SPI, respectivamente. Se realizó la inicialización de pines y la declaración de variables para los dispositivos descritos.

Para la conexión a la red WiFi se configuró dos parámetros, SSID y contraseña. El enlace desde el nodo final a la plataforma IoT requiere de dos variables, dirección del servidor de ThingSpeak y el apiKey que es el identificador único que se generó al crear el proyecto en la plataforma. A continuación, se realizó la captura de los valores registrados por los sensores y la detección de una tarjeta RFID, según sea el caso se activarán los indicadores de alarma. Se verificó la conexión con el servidor, de ser el caso se inicia el envío de paquetes cada dos segundos, que contiene el valor de la distancia, inclinación, estado de alarma y RSSI, y finaliza el envío. Si no cumple la condición reintenta la conexión al servidor.

Figura 78

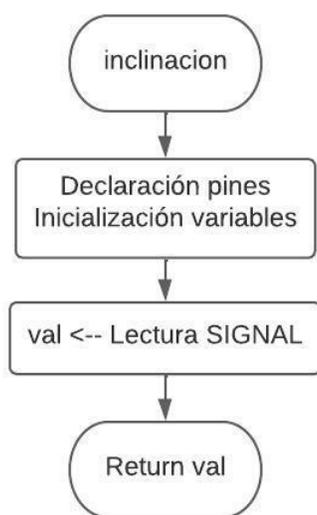
Diagrama de flujo de la función *medirDistancia*



El diagrama de flujo de la función *medirDistancia* se presenta en la Figura 78, la cual parte de la generación de un pulso en el pin TRIG, para ello se inicializa en bajo durante 2 microsegundos, se mantiene el pulso en alto durante 10 microsegundos y por último en bajo, con el fin que capte la señal por el pin ECHO. Para determinar el valor de la distancia se hizo uso de la ecuación (3), transformando el tiempo en microsegundos detectado por el pin ECHO a un valor en centímetros. Como el sensor obtiene el tiempo de ida y vuelta, se divide para dos para establecer correctamente el valor de la distancia entre el sensor y la tapa de soterramiento, finalmente retorna dicho valor.

Figura 79

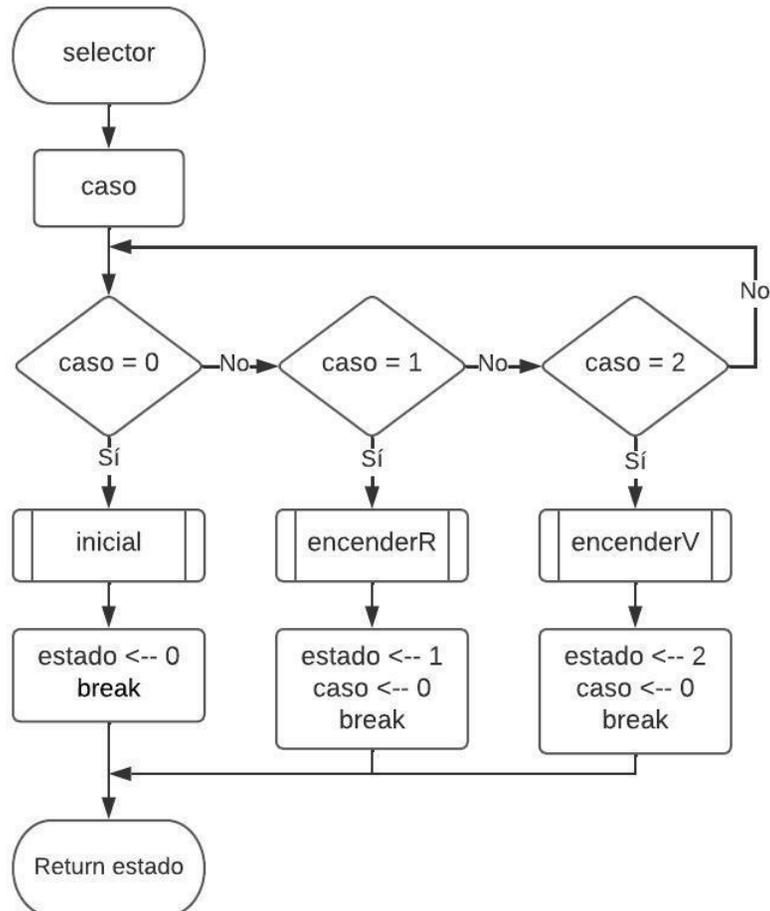
Diagrama de flujo de la función inclinación



En la Figura 79, se presenta el diagrama de flujo que corresponde a la función *inclinacion*. Dicha función lee el pin digital SIGNAL que tendrá valores lógicos 0 o 1 dependiendo del contacto en los extremos del sensor, se guarda dicho valor en la variable denominada val y se retorna.

Figura 80

Diagrama de la función *selector*

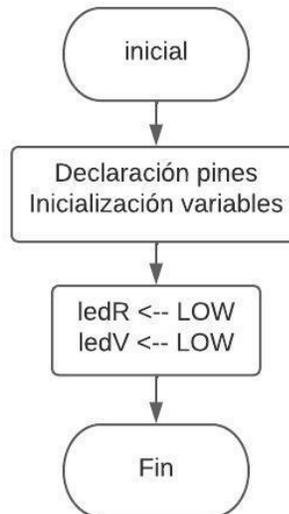


La función *selector* se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 80, que tiene como objetivo establecer el estado de la alarma a través de tres casos. El caso 0 corresponde al estado inicial, el caso 1 hace referencia al acceso denegado y el caso 2 se refiere al acceso autorizado. Al final retorna el valor de la variable estado de acuerdo al caso.

Si el caso es igual a 0, llama a la función *inicial* que se muestra en la Figura 81, en la cual permanecen apagados los indicadores de alarma o leds. Además, se coloca en 0 a la variable estado.

Figura 81

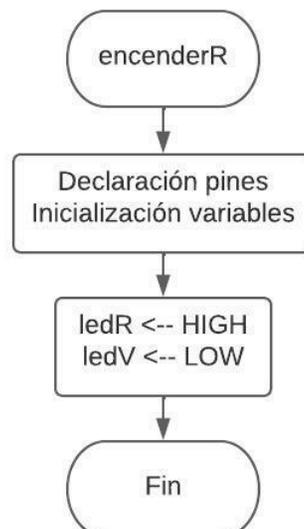
Diagrama de flujo de la función inicial



Si el caso es igual a 1, llama a la función *encenderR* que se muestra en la Figura 82, en la cual se activa el indicador rojo y desactiva el indicador verde. Además, se coloca en 1 a la variable estado y regresa al caso 0.

Figura 82

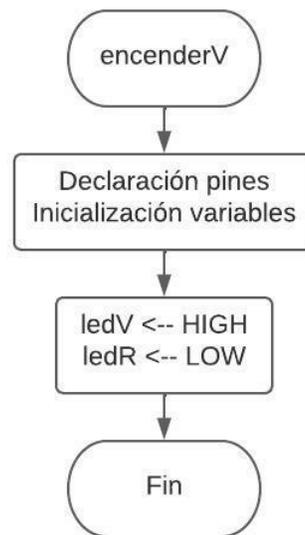
Diagrama de flujo de la función encenderR



Si el caso es igual a 2, llama a la función *encenderV* que se muestra en la Figura 83, en la cual se activa el indicador verde y desactiva el indicador rojo. Además, se coloca en 2 a la variable estado y regresa al caso 0.

Figura 83

Diagrama de flujo de la función *encenderV*



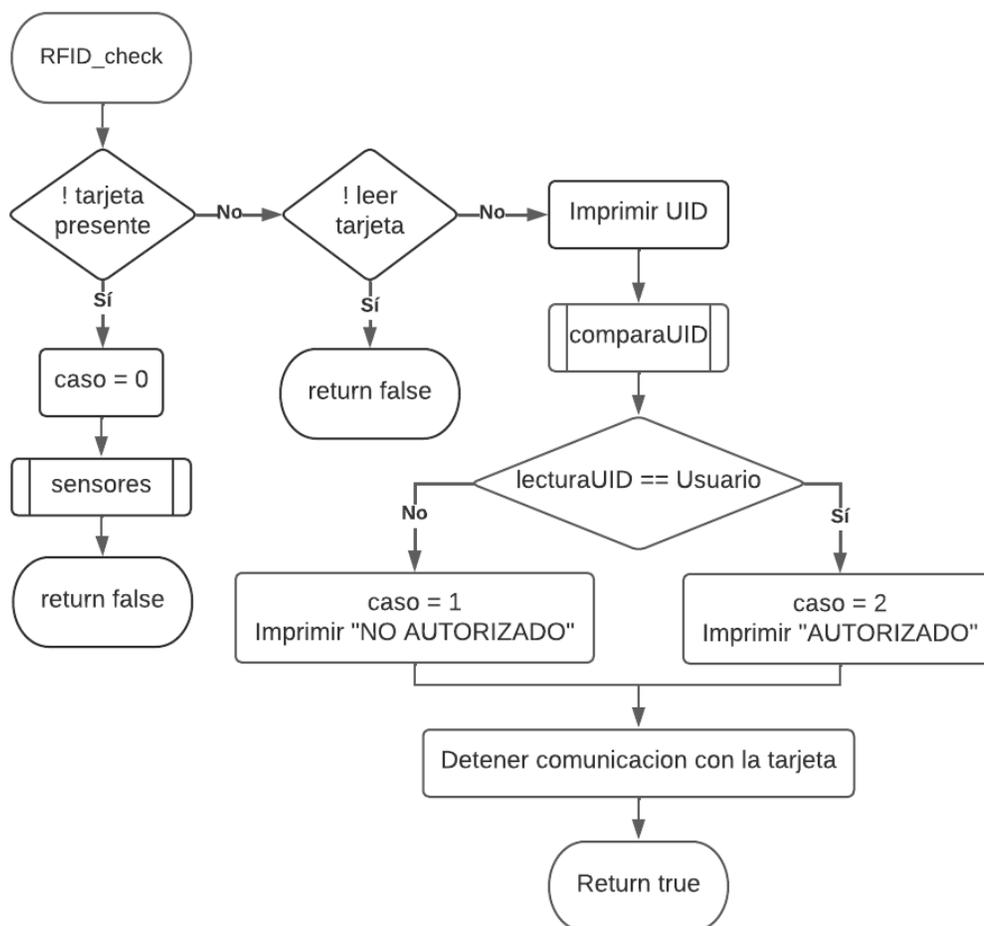
La función *RFID_check* se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 84, se compone de subfunciones que se explicarán más adelante de acuerdo a la acción que deben ejecutar. Se ejecuta un condicional para detectar si no existe una tarjeta presente, si se cumple dicha condición se ejecuta el caso 0, se llama a la función sensores para validar el valor de la distancia e inclinación y retorna esperando por una tarjeta.

El siguiente condicional permite la lectura de los datos de la tarjeta, si es así, se imprime el UID, caso contrario, retorna esperando por otra tarjeta. Para determinar si el usuario está autorizado se llama a la función *comparaUID* que analiza los datos de la UID registrada y la UID leída. Se aplica un condicional que tendrá dos casos, si los datos son iguales se ejecuta el caso 2 y se imprime “AUTORIZADO”, caso contrario, se ejecuta el caso 1 y se imprime “NO

AUTORIZADO”, por último, se detiene la comunicación con la tarjeta y retorna verdadero si existió la verificación de la misma.

Figura 84

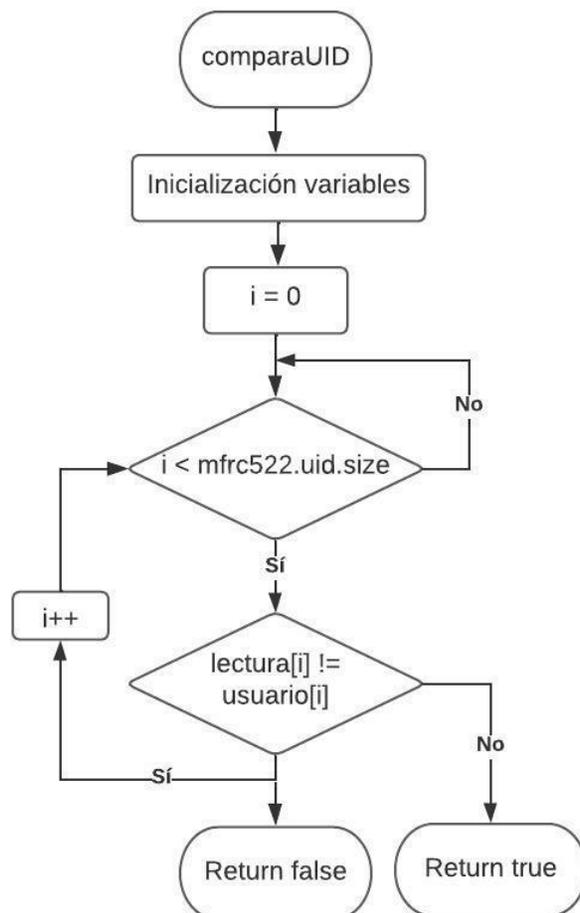
Diagrama de flujo de la función *RFID_check*



La Figura 85 muestra el diagrama de flujo de la función *comparaUID*, para ello es necesario registrar el UID del usuario que será autorizado dentro de un vector de 4 bytes. Se hace uso de un bucle para comparar cada byte entre la tarjeta registrada y leída, si los UID coinciden retorna verdadero, de lo contrario, retorna falso.

Figura 85

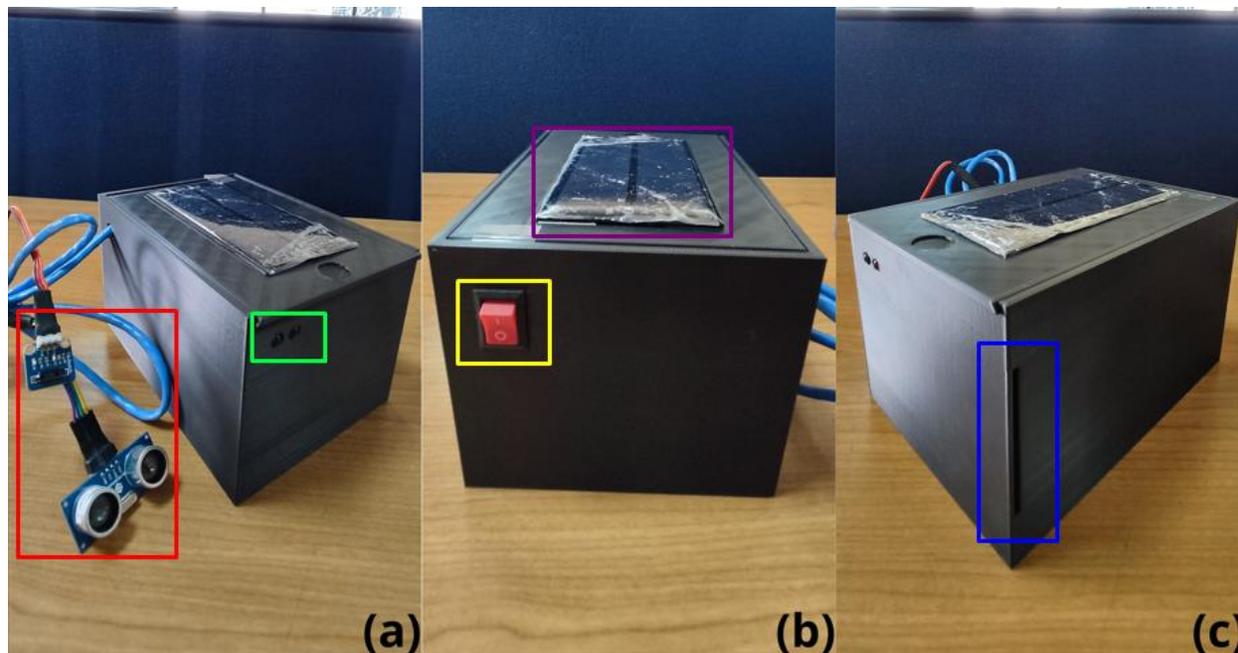
Diagrama de flujo de la función *comparaUID*



La Figura 86a muestra los sensores y los indicadores de alarma que se señalan con recuadro de color rojo y verde, respectivamente. En la Figura 86b se muestra el interruptor de encendido/apagado y el panel solar encerrados con un recuadro amarillo y violeta, respectivamente. Por último, en la Figura 86c se marca con un recuadro azul a la ranura para el ingreso de la tarjeta RFID.

Figura 86

Implementación del nodo final WiFi



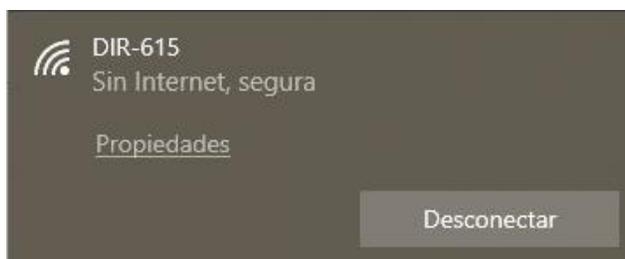
Nota. a) Vista lateral izquierda. b) Vista frontal. c) Vista lateral derecha.

Configuración del router WiFi

Para la configuración del router se mantuvo presionado el botón de *reset* de 10 a 30 segundos con el fin de eliminar cualquier configuración establecida anteriormente. Como siguiente paso se conectó un ordenador a la red del router como se muestra en la Figura 87.

Figura 87

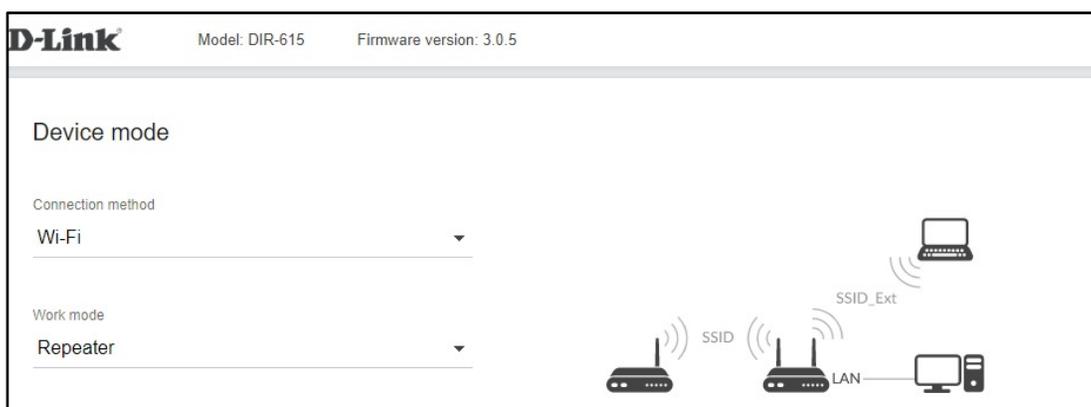
Ingreso a la red del router DIR-615



En el navegador se ingresó a la dirección *http://dlinkrouter* para acceder a las configuraciones del router, en este caso, el router se manejó en modo repetidor con el fin de aumentar el radio de cobertura, como se presenta en la Figura 88.

Figura 88

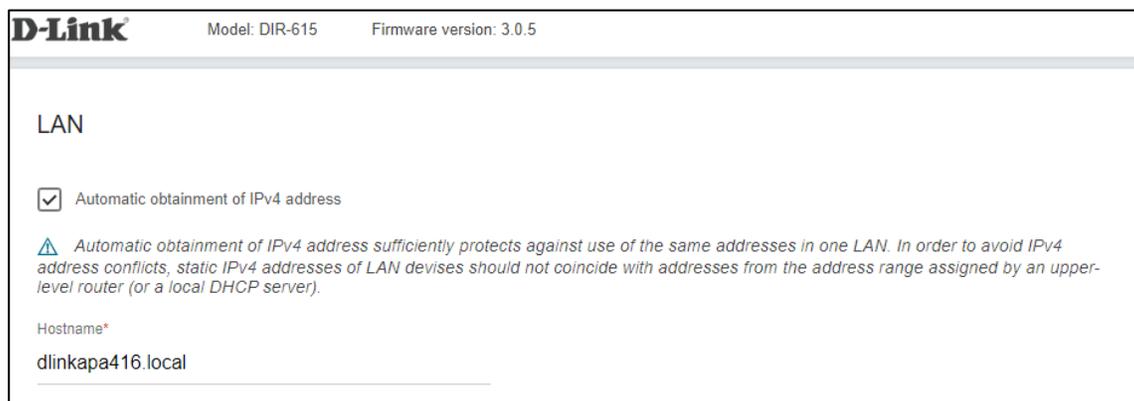
Configuración del router en modo repetidor



Se habilitó el direccionamiento por DHCP seleccionando la casilla de obtención de dirección IP automática como se observa en la Figura 89. A su vez, se genera automáticamente el *hostname* por medio del cual se podrá acceder a las configuraciones del router posteriormente.

Figura 89

Direccionamiento por DHCP del router



En la Figura 90, para escoger la red que se amplificó se seleccionó *Wireless Networks*, una vez identificada la red, se ingresó su respectiva contraseña.

Figura 90

Selección de la red inalámbrica a amplificar

D-Link Model: DIR-615 Firmware version: 3.0.5

Wi-Fi Client

Network name (SSID)*
Brendita

BSSID
02:92:4c:f0:21:5e

Network authentication
WPA2-PSK

Password PSK*
.....

ⓘ Password should be between 8 and 63 ASCII characters

Encryption type*
AES

WIRELESS NETWORKS

La Figura 91 muestra el nombre y la contraseña que se asignó a la red del router, con la cual, se conectó el nodo WiFi.

Figura 91

Configuración del nombre y contraseña de la red

Wireless Network 2.4 GHz

Enable

Broadcast wireless network 2.4 GHz

ⓘ Disabling broadcast does not influence the ability to connect to another Wi-Fi network as a client.

Network name*
Nodo WiFi

ⓘ The number of characters should not exceed 32

Open network

Password*
.....

Los parámetros que se establecieron durante el proceso se puede verificar en el resumen que se muestra en la Figura 92.

Figura 92

Resumen de las configuraciones del router

Summary

LAN

Dynamic IPv4:	Yes
Hostname:	dlinkapa416.local

Wi-Fi 2.4 GHz

Enable:	Yes
SSID:	Nodo WiFi
Encrypt:	WPA2-Personal
Password:	brendasjg301296

Device

Model:	DIR-615
Software version:	3.0.5
Serial number:	TW0P10C004578
Mode:	Repeater
Client SSID:	Brendita

Login data

Username:	admin
Password:	👁️ *****

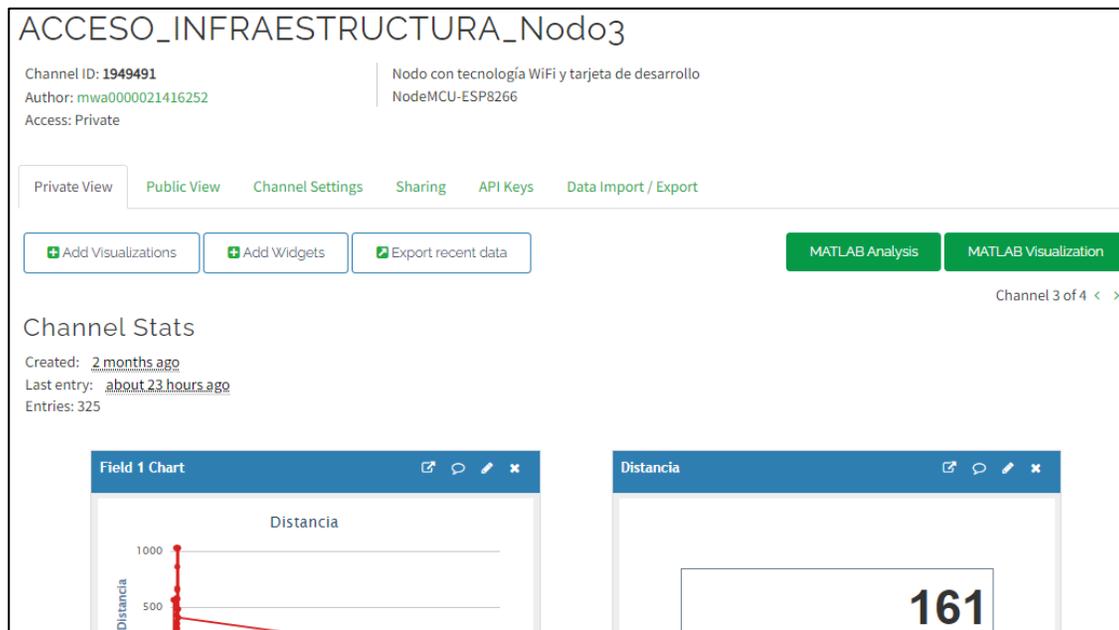
[SAVE CONFIGURATION FILE](#)

Configuración del servidor de la tecnología WiFi

Siguiendo los pasos de la sección de configuración del servidor de la tecnología LoRa se realiza la creación del dashboard del nodo final que funcionará a través de la tecnología WiFi. En la Figura 93 se muestra la interfaz gráfica donde se observa información como el nombre que en este caso es Acceso_Infraestructura_Nodo3, Channel ID, entre otros.

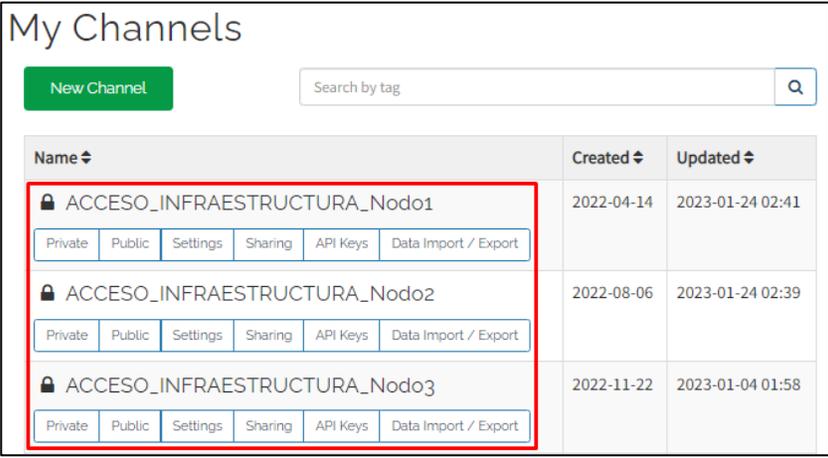
Figura 93

Dashboard del nodo final WiFi



Acceso al usuario

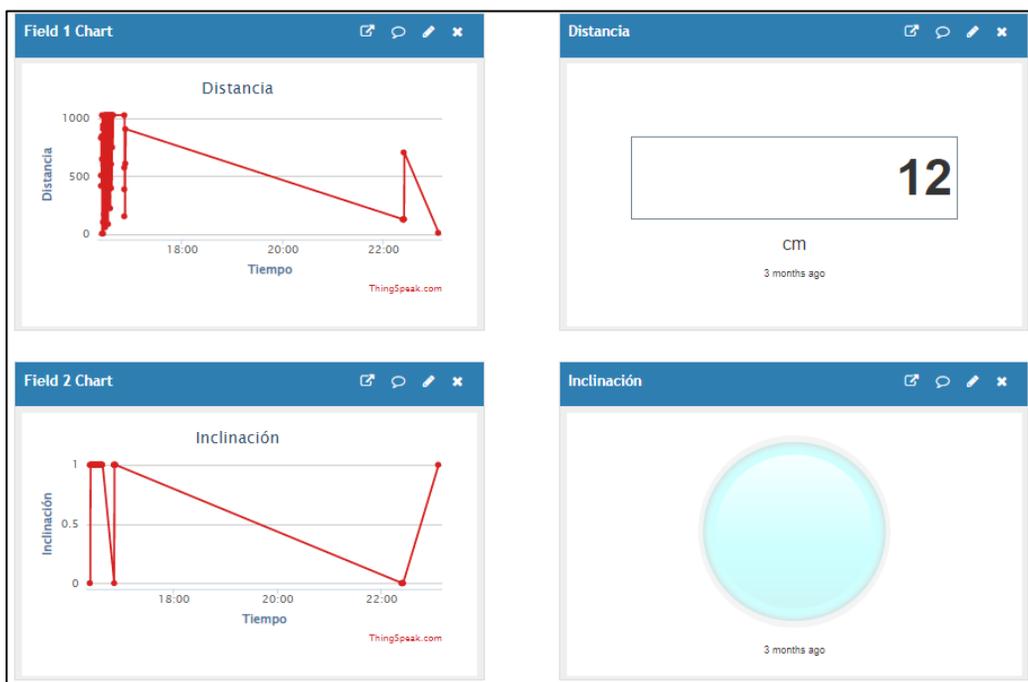
El usuario puede visualizar la información de los nodos finales en la plataforma ThingSpeak a través de un ordenador, para ello se deberá dirigir a la página oficial de ThingSpeak e ingresar el correo y contraseña donde se encuentren los canales creados para el prototipo. Una vez iniciada la sesión se puede escoger uno de los canales que se muestra en la Figura 94 para su respectiva monitorización.

Figura 94*Visualización de canales*

The screenshot shows a web interface titled "My Channels". At the top left is a green "New Channel" button. To its right is a search bar labeled "Search by tag" with a magnifying glass icon. Below this is a table with three columns: "Name", "Created", and "Updated". The table contains three rows, each representing a channel. The first row is highlighted with a red border. Each row has a lock icon, a channel name, and two dates. Below each channel name is a row of buttons: "Private", "Public", "Settings", "Sharing", "API Keys", and "Data Import / Export".

Name	Created	Updated
ACCESO_INFRAESTRUCTURA_Nodo1	2022-04-14	2023-01-24 02:41
ACCESO_INFRAESTRUCTURA_Nodo2	2022-08-06	2023-01-24 02:39
ACCESO_INFRAESTRUCTURA_Nodo3	2022-11-22	2023-01-04 01:58

Una vez seleccionado el canal se podrá visualizar los datos en forma gráfica o de alerta, como se presenta en la Figura 95.

Figura 95*Interfaz gráfica en el ordenador*

Capítulo V

Pruebas y Resultados

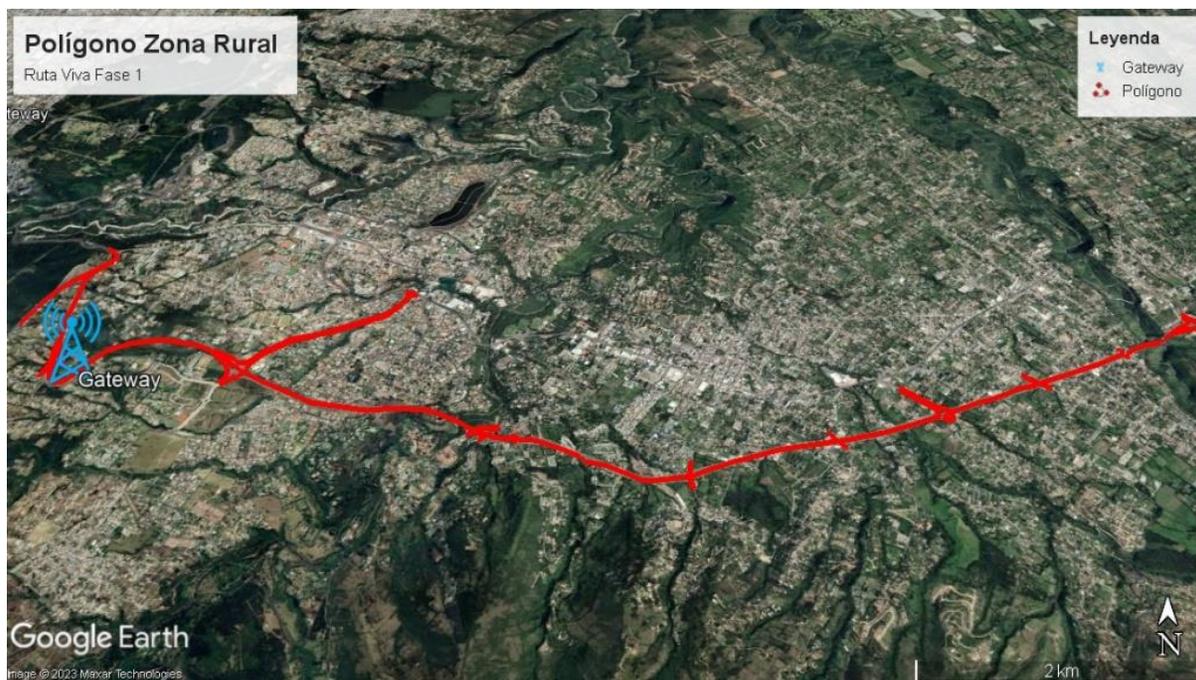
En el presente capítulo se detalla el proceso y las pruebas que se llevó a cabo para verificar el funcionamiento del prototipo. Además, en base a los resultados que se obtuvo se realizará su respectivo análisis.

Definición de escenarios

Para pruebas de cobertura de LoRa se escogieron tres polígonos que fueron Ruta Viva Fase 1 considerado como una zona rural y para la zona urbana se escogieron los polígonos de las Naciones Unidas y República del Salvador porque forman parte de las infraestructuras civiles subterráneas más grandes dentro de la ciudad. Además, se realizó la implementación y pruebas dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas para la tecnología LoRa y WiFi.

Figura 96

Ubicación del Gateway en zona rural



Para el polígono Ruta Viva Fase 1 se ubicó el Gateway en las coordenadas $0^{\circ}12'52.67''S$ y $78^{\circ}27'17.93''O$, como se muestra en la Figura 96. El nodo final de LoRa se fue colocando cada 200 metros en la vía Ruta Viva verificando la recepción de datos. Más adelante se detallan las distancias específicas de las pruebas realizadas.

En la zona urbana se ubicó el Gateway en las coordenadas $0^{\circ}10'38.52''S$ y $78^{\circ}28'40.03''O$ puesto que es punto de intersección de los polígonos, como se muestra en la Figura 97 . El nodo final de LoRa se fue colocando cada 200 metros en línea recta sobre las avenidas Naciones Unidas y 6 de Diciembre.

Figura 97

Ubicación del Gateway en zona urbana



Los nodos finales LoRa se colocaron en 8 tapas de los pozos de la infraestructura subterránea que están desplegadas dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas con el fin

de comprobar su funcionamiento con implementación. En la Figura 98, se muestran las ubicaciones donde se colocó el nodo final y Gateway.

Figura 98

Ubicación de las tapas y Gateway LoRa en la Universidad de las Fuerzas Armadas



En la Tabla 28 se especifica la localización de las tapas mediante la latitud y longitud, y la distancia que existe entre el Gateway y cada una de ellas.

Tabla 28

Tapas de los pozos de revisión, ubicación y distancia al Gateway

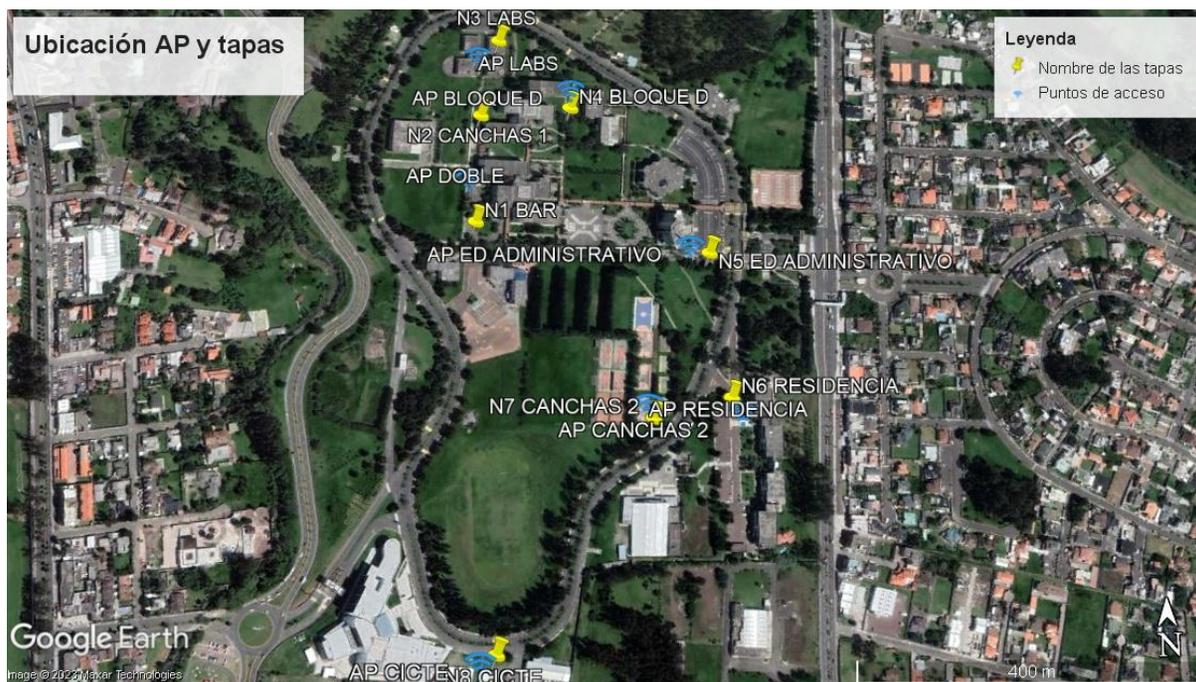
Nº	Nombre de la Tapa	Ubicación		Distancia [m]
		Latitud	Longitud	
1	Bar	0°18'52.26"S	78°26'45.58"O	92
2	Canchas 1	0°18'47.69"S	78°26'45.30"O	83

Nº	Nombre de la Tapa	Ubicación		Distancia [m]
		Latitud	Longitud	
3	Labs. Electrónica	0°18'44.40"S	78°26'44.50"O	172
4	Bloque D	0°18'47.51"S	78°26'41.63"O	101
5	Ed. Administrativo	0°18'53.94"S	78°26'36.28"O	274
6	Residencia	0°18'59.82"S	78°26'35.75"O	386
7	Canchas 2	0°19'00.50"S	78°26'38.81"O	356
8	CICTE	0°19'09.08"S	78°26'45.07"O	556

La ubicación de las tapas donde fueron colocados los nodos finales WiFi, son las mismas coordenadas que se detallan en la Tabla 28. En la Figura 99 se muestran las ubicaciones de las tapas y puntos de acceso.

Figura 99

Ubicación de tapas y Access Point WiFi en la Universidad de las Fuerzas Armadas



En la Tabla 29 se detalla los nombres de los puntos de acceso, las coordenadas y la distancia desde el AP más cercano a las tapas.

Tabla 29

Nombre del AP, ubicación y distancia del TX al RX

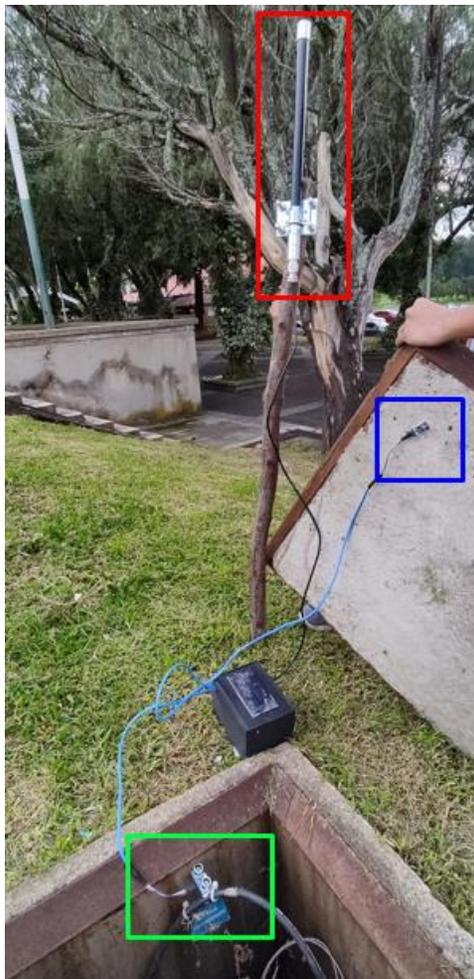
Nº	Nombre de la Tapa	Nombre del AP	Ubicación AP		Distancia [m]
			Latitud	Longitud	
1	Bar	AP Doble	0°18'50"S	78°26'45.64"O	70
2	Canchas 1	AP Doble	0°18'50"S	78°26'45.64"O	75
3	Labs. Electrónica	AP Labs	0°18'44.54"S	78°26'45.21"O	24
4	Bloque D	AP Bloque D	0°18'46.25"S	78°26'41.41"O	40
5	Ed. Administrativo	AP Ed. Admin	0°18'53.17"S	78°26'36.84"O	30
6	Residencia	AP Residencia	0°19'00"S	78°26'35.17"O	20
7	Canchas 2	AP Canchas 2	0°18'59.49"S	78°26'38.82"O	30
8	CICTE	AP CICTE	0°19'08.92"S	78°26'45.49"O	20

Implementación en los pozos de revisión

Una vez definidos los escenarios se procede con la colocación de los nodos finales con tecnología LoRa en cada una de los pozos de revisión, como primer paso se inició con la apertura de la tapa, se ubicó la antena y los sensores.

Figura 100

Implementación del nodo final con tecnología LoRa

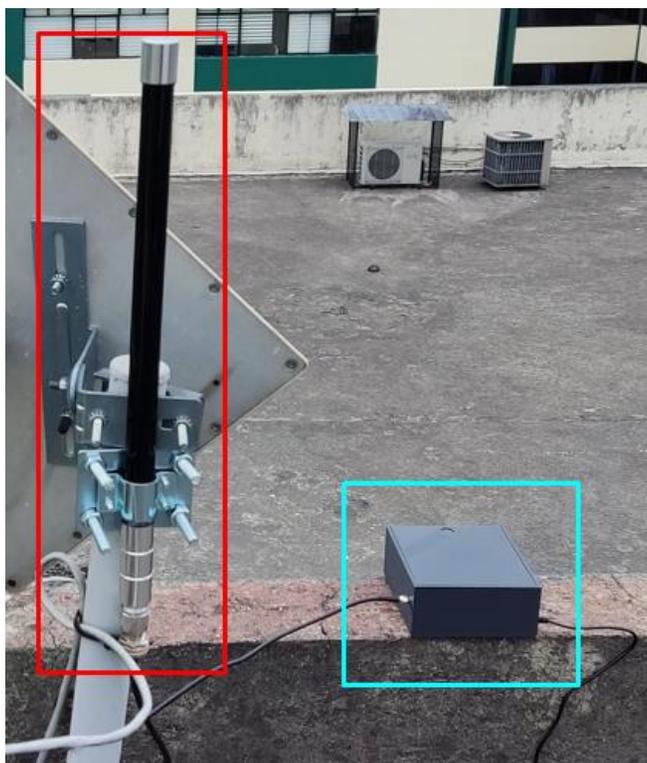


El sensor de inclinación se colocó a 90° con respecto a la tapa y para el sensor de proximidad se calibró de acuerdo a las características físicas del pozo. Por último, la caja del prototipo se colocó a un lado del pozo para una mejor visualización tomando en cuenta que es una prueba piloto, sin embargo, para un escenario real es necesario que la instalación del equipo tenga las debidas seguridades. El resultado final de la implementación se muestra en la Figura 100; la antena, el sensor de proximidad y el sensor de inclinación se señalan a través de un recuadro rojo, verde y azul, respectivamente.

Para la implementación del Gateway se situó en la terraza del Edificio Central siendo un punto estratégico para dar cobertura a todos los puntos de prueba, tiene como ubicación las coordenadas $0^{\circ}18'49.84''S$ y $78^{\circ}26'43.71''O$ en latitud y longitud, respectivamente. En la Figura 101, se muestra la implementación del Gateway donde se destaca la antena y su caja que se encuentra enmarcada por un recuadro de color rojo y turquesa, respectivamente. Para el anclaje de la antena se utilizó un polo y herrajes para mantenerla fija.

Figura 101

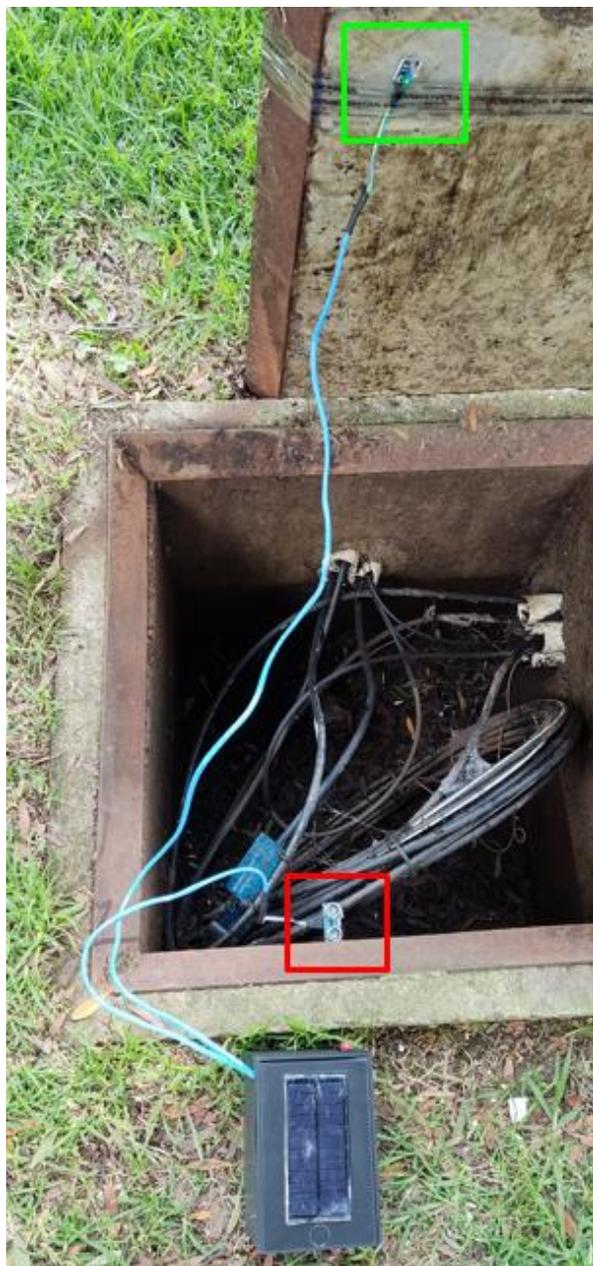
Implementación del Gateway



Para la implementación del nodo final con tecnología WiFi se siguió el mismo proceso descrito anteriormente. El resultado final de la implementación se muestra en la Figura 102; el sensor de proximidad y el sensor de inclinación se señalan a través de un recuadro rojo, y verde, respectivamente.

Figura 102

Implementación del nodo final con tecnología WiFi

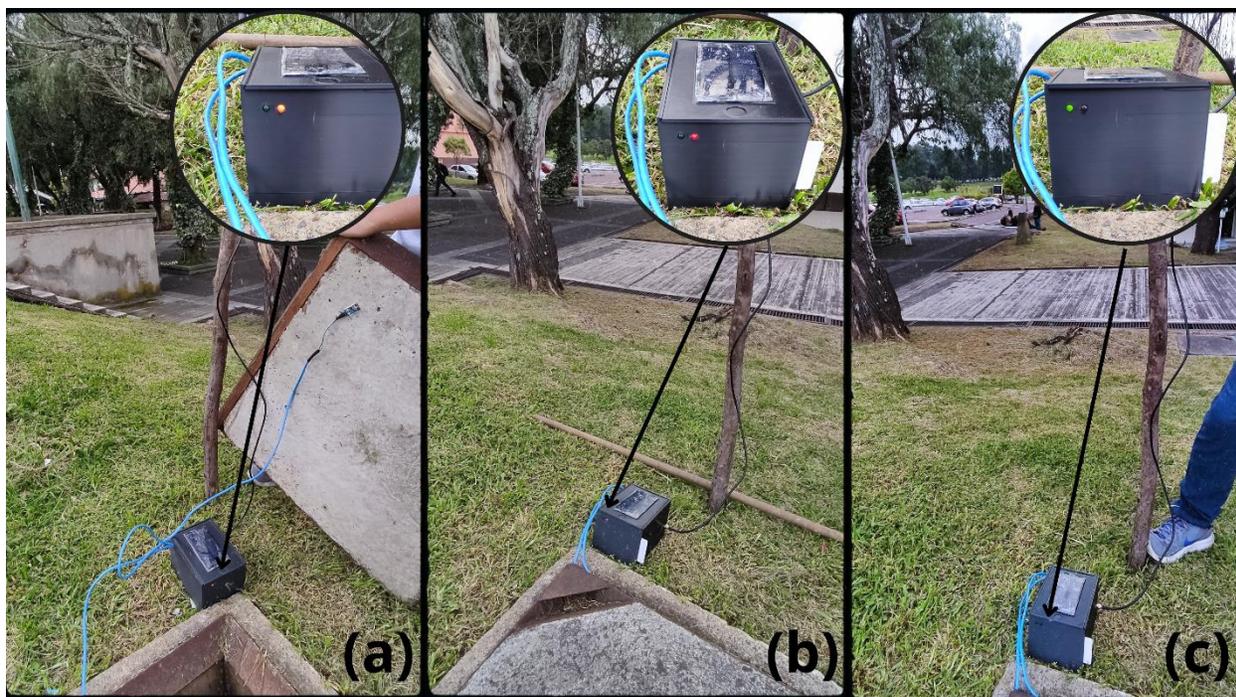
**Pruebas de funcionamiento**

Para verificar el funcionamiento del nodo final de la tecnología LoRa y WiFi se ejecutó 3 escenarios como se presenta en la Figura 103. El primer escenario se realizó la apertura de la tapa sin autorización, en el cual, se activaron los sensores y según las condiciones se emitió la

alarma, en este caso, se encendió el indicador rojo. El segundo escenario consistió en el ingreso de una tarjeta que no está autorizada, por lo tanto, se activó el indicador rojo. Para el tercer escenario se ingresó una tarjeta autorizada y el indicador de alarma que se activó es de color verde.

Figura 103

Escenarios para pruebas de funcionamiento



Nota. a) Apertura de tapa. b) Tarjeta No autorizada. c) Tarjeta autorizada.

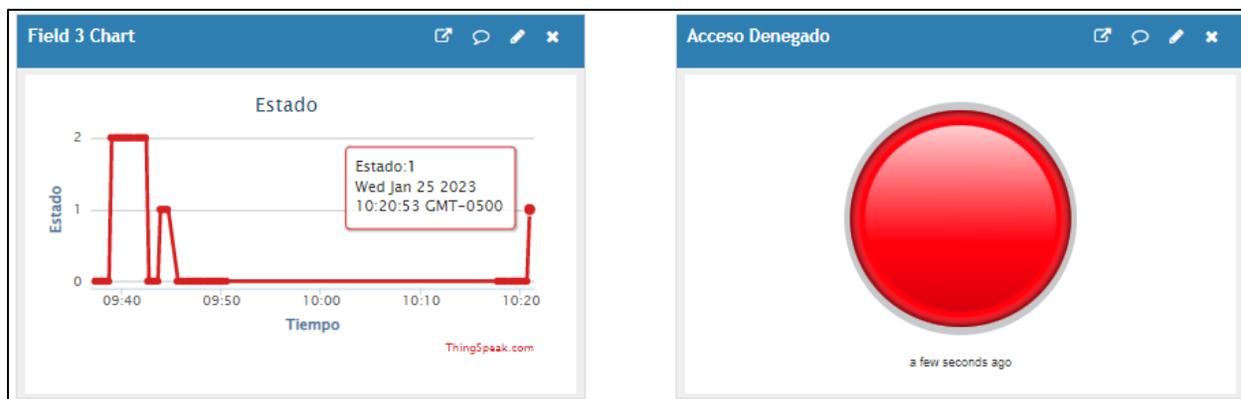
En la plataforma ThingSpeak se pueden apreciar las alarmas de cada uno de los escenarios descritos anteriormente. En la Figura 104a se muestra el valor que registra el sensor de proximidad que en este caso es 1010 cm, en la Figura 104b se indica el valor de 0 del sensor de inclinacion y por último, de acuerdo a dichas condiciones en la Figura 104c se indica la alarma de acceso denegado, que corresponde al estado 1.

Figura 104

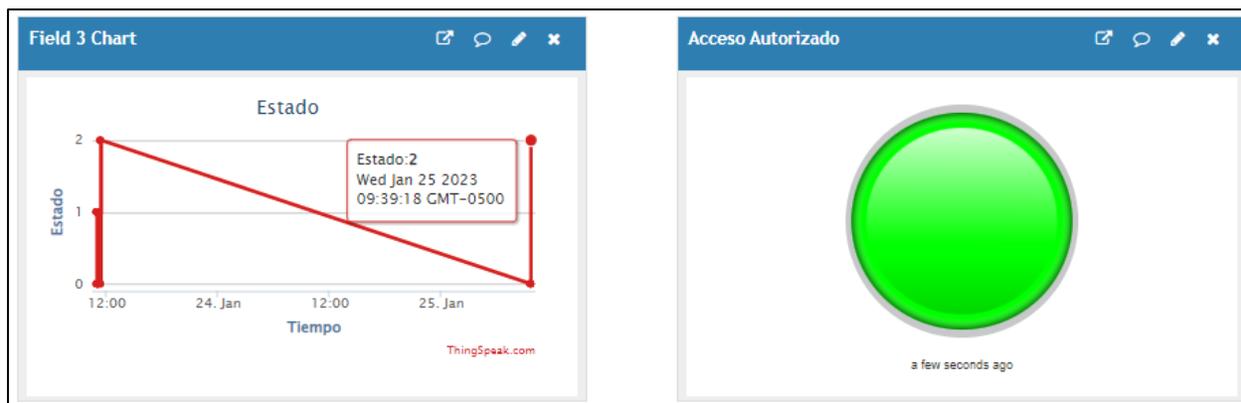
Indicador de alarma no autorizado activado por sensores



En la Figura 105, se muestran el indicador de alarma NO autorizado en la plataforma ThingSpeak cuando su estado es 1. Una vez registrado el valor del estado, en este caso 1, se activa la lámpara en color rojo.

Figura 105*Indicador de alarma no autorizado*

En la Figura 106, se muestran el indicador de alarma autorizado en la plataforma ThingSpeak cuando se da el tercer escenario. Una vez registrado el valor del estado, en este caso 2, se activa la lámpara en color verde.

Figura 106*Indicador de alarma autorizado*

La plataforma ThingSpeak ofrece la posibilidad de exportar los datos del canal a un archivo CSV, el cual contiene información que se puede administrar, buscar o filtrar de acuerdo a las necesidades del usuario ya sea por fechas, horas o valores de las variables. En la Figura

107 se muestra un ejemplo de un archivo CSV procesado en excel con la información de los campos. Los datos del field1 representa los valores de distancia, field2 son valores de inclinación, field3 son valores de estado y field4 son valores de RSSI, con su respectiva fecha y hora de registro.

Figura 107

Archivo de datos exportados de la plataforma ThingSpeak

	A	B	C	D	E
1	created_at	field1	field2	field3	field4
2	2023-01-24 14:57:53 UTC	3	0	0	-94
3	2023-01-24 14:58:08 UTC	4	0	0	-93
4	2023-01-24 14:58:23 UTC	4	0	0	-92
5	2023-01-24 14:58:38 UTC	3	0	0	-92
6	2023-01-24 14:58:53 UTC	4	0	0	-92
7	2023-01-24 14:59:08 UTC	2	0	0	-91
8	2023-01-24 14:59:23 UTC	2	1	0	-93
9	2023-01-24 14:59:38 UTC	3	1	0	-91
10	2023-01-24 14:59:53 UTC	4	1	0	-94

En la Figura 108 se puede visualizar los datos obtenidos del Gateway en el monitor serial de la Raspberry. Se planteó un escenario en donde se envían datos al mismo tiempo desde dos nodos diferentes modificando el estado de cada uno de ellos, comprobando de esta forma que el Gateway es capaz de recibir información de distintos nodos y de fabricante diferente, en este caso Heltec y Ai-Thinker, cabe mencionar que ambas tarjetas de adquisición trabajan con un chip LoRa basado en SX1276/1278, también se realizó pruebas con diferentes tarjetas de adquisición LoRa basados en SX1262/1268, en las cuales, no se logró establecer la conexión.

Para comprobar que el Gateway diseñado es capaz de recibir información de distintos nodos y de diferente fabricante, en este caso Heltec y Ai-Thinker se planteó un escenario en donde se envían datos al mismo tiempo de dos nodos diferentes, modificando sus valores. En

la Figura 108 se muestran 3 pruebas de dicho escenario, los datos que se muestran corresponden a los valores de inclinación, distancia, estado de alarma y RSSI del nodo 1 y 2. Es necesario mencionar que dicho Gateway recibió información de tarjetas de desarrollo que trabajan con un chip LoRa basado en SX1276/1278.

Figura 108

Pruebas de funcionamiento del Gateway

<pre> ***nodo1*** 1 153 2 -122 ****nodo2*** 0 2219 1 -125 </pre>	<pre> ***nodo1*** 0 148 1 -123 ****nodo2*** 0 2218 1 -125 </pre>	<pre> ***nodo1*** 1 151 0 -122 ****nodo2*** 1 7 0 -126 </pre>
(a)	(b)	(c)

Nota. a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3.

Cobertura

Zona rural

Como resultado de las pruebas que se realizó en el polígono de la Ruta Viva se alcanzó una cobertura de hasta 12 km con línea de vista. En la Figura 109 se muestra la ubicación del Gateway con su respectiva antena enmarcados en color amarillo y verde, respectivamente. La flecha de color rojo señala aproximadamente la Parroquia Pifo, siendo el último lugar donde se logró enviar datos al Gateway.

Figura 109

Ubicación del Gateway sobre la Ruta Viva



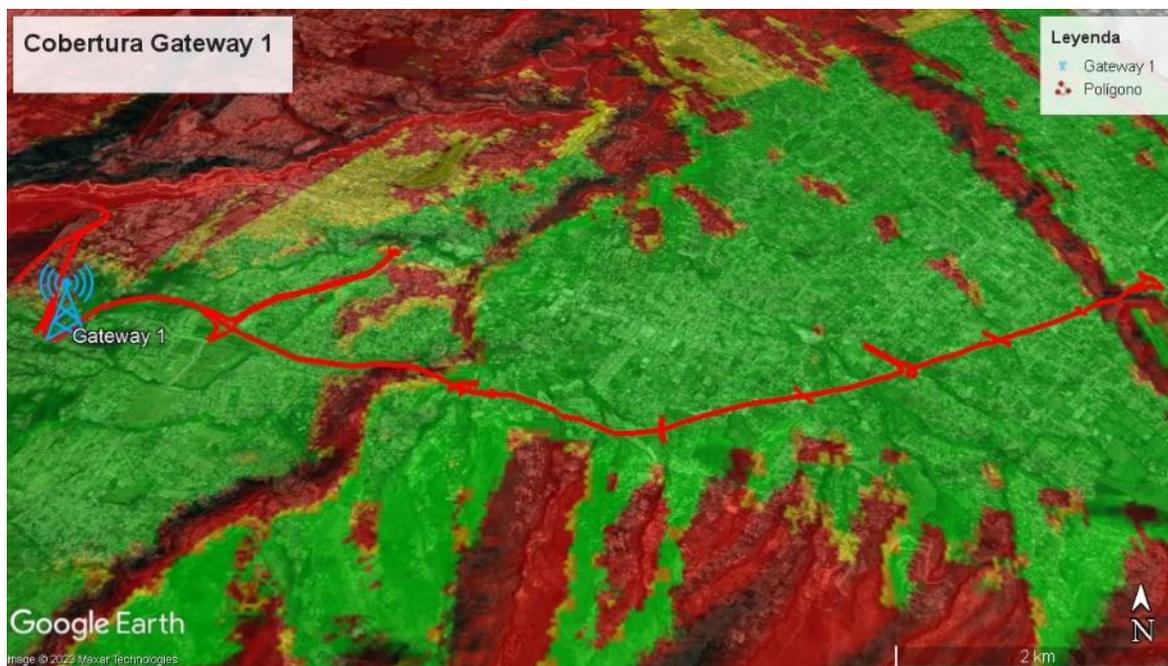
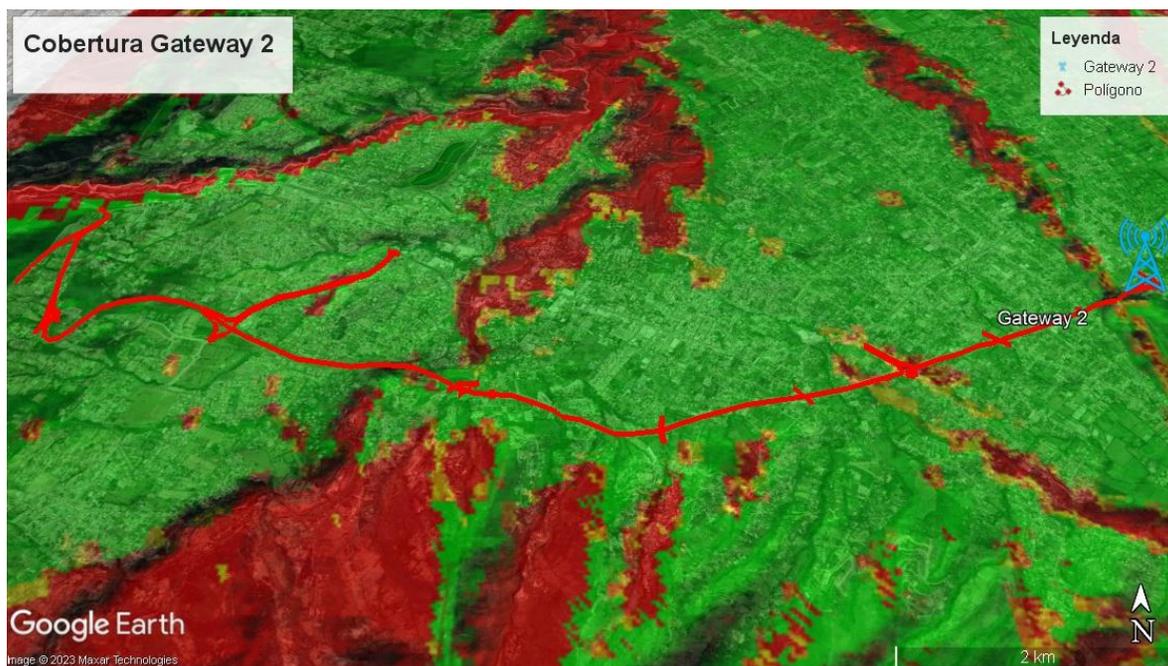
A través del software Radio Mobile se realizó la simulación de la cobertura del Gateway bajo parámetros basados en las características del receptor LoRa descritas en la Tabla 30.

Tabla 30

Parámetros para la simulación de cobertura LoRa

Parámetros	Valores
Frecuencia	915 MHz (902 MHz – 928 MHz)
Potencia del transmisor	20 dBm
Tipo de antena	Omnidireccional
Ganancia de antena	10 dBi
Altura de la antena	3 m
Modelo de propagación	Longley-Rice

El resultado se muestra en la Figura 110. Se puede observar que el color verde predomina en la mayor parte de la Ruta Viva lo que indica que existe muy buena señal, existen pequeños tramos donde la señal es débil identificado por el color rojo.

Figura 110*Cobertura Gateway 1 – Ruta Viva***Figura 111***Cobertura Gateway 2 – Ruta Viva*

Como se ha mencionado anteriormente el polígono Ruta Viva Fase 1 tiene aproximadamente 304 tapas y el Gateway diseñado acepta 255 nodos finales, por lo tanto, es necesario usar un Gateway adicional al final del polígono. Lo que se desea conseguir es que las tapas sean distribuidas equitativamente a cada Gateway con el fin de asegurar su desempeño y cobertura. En la Figura 111 se observa la ubicación del segundo Gateway y su zona de cobertura que de igual forma que el primer Gateway la señal es muy buena en todo el trayecto.

Zona urbana

Para las pruebas de cobertura en la zona urbana se colocó el Gateway entre la Av. Naciones Unidas y Av. 6 de Diciembre como se muestra en la Figura 112.

Figura 112

Ubicación del Gateway en zona urbana

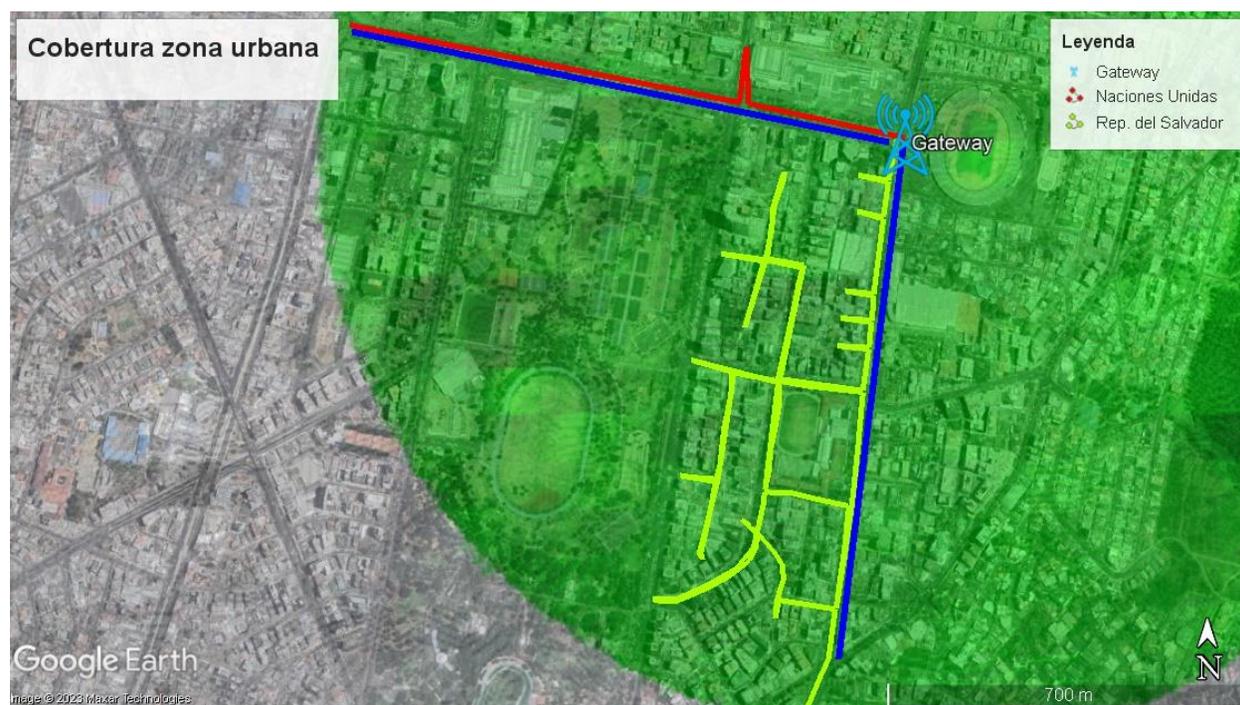


Nota. a) Vista Av. Naciones Unidas, b) Vista Av. 6 de Diciembre

En la Figura 113 se observa la simulación de la cobertura indicando que la señal es muy buena en todo el terreno, pero en pruebas de campo no se obtuvo dicho resultado porque existen diversos obstáculos como edificios, árboles, entre otros, que impidieron la línea de vista directa, por lo cual dentro de la cobertura se señala con líneas de color azul el alcance real del Gateway en zona urbana. Por lo tanto, se cubrió una distancia de 1.2 km que abarcó la Av. Naciones Unidas hasta la intersección con la Av. 10 de Agosto y desde la Av. 6 de Diciembre hasta la Av. Eloy Alfaro cubrió 1 km. Se realizó pruebas en las calles colindantes a la Av. 6 de Diciembre pero no se obtuvo conexión.

Figura 113

Cobertura Zona Urbana



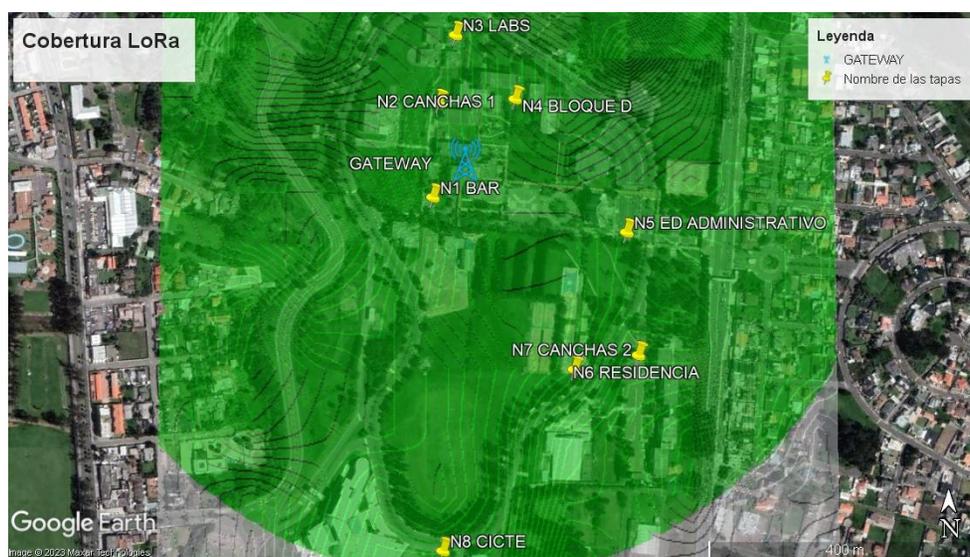
Una prueba adicional que se realizó en el sector fue el cambio de antena del nodo final que tiene una ganancia de 3 dBi con el propósito de reducir el tamaño del prototipo, dando como resultado valores de RSSI similares a los que se obtuvo con la antena de 10 dBi.

Campus Sangolquí

En la Figura 114 se muestra la cobertura de la tecnología LoRa dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas dando como resultado muy buena señal abarcando todo el campus, pero en las pruebas de campo se evidenció que la recepción de datos tardó más tiempo de lo habitual, sobre todo en los Laboratorios de Electrónica y la Residencia, debido a que existen obstáculos como árboles y edificios que se interponen entre la línea de vista.

Figura 114

Cobertura dentro del campus Tecnología LoRa



Para la simulación en Radio Mobile se utilizaron los parámetros basados en el Access Point utilizado como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31

Parámetros para la simulación de la cobertura WiFi

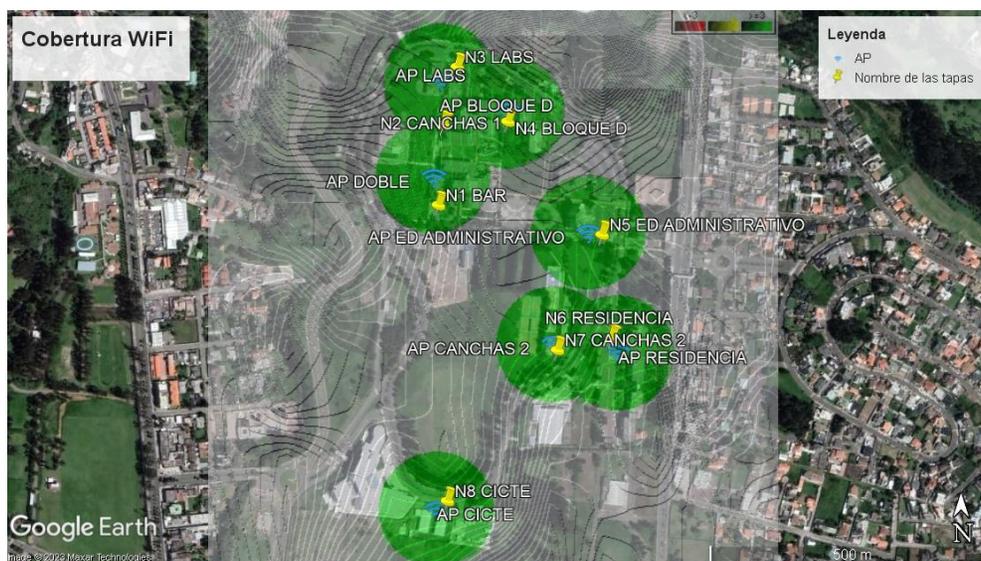
Parámetros	Valores
Frecuencia	2.447 GHz (2.436 GHz – 2.458 GHz)
Potencia del transmisor	20 dBm

Parámetros	Valores
Tipo de antena	Omnidireccional
Ganancia de antena	5 dBi
Altura de la antena	1 m
Modelo de propagación	Longley-Rice

La Figura 115 muestra el área de cobertura de cada Access Point que aproximadamente alcanzó 100 metros con línea de vista, no se obtuvo ninguna novedad con respecto a la recepción de datos.

Figura 115

Cobertura dentro del campus Tecnología WiFi



Análisis de resultados

Para analizar los resultados del prototipo es importante mencionar ciertos criterios que manejan la tecnología LoRa y WiFi para los valores de RSSI. La tecnología LoRa establece un rango de valores de RSSI para que el Gateway reciba los datos correctamente desde el nodo final mencionando que si tiene un valor de -30 dBm la señal es fuerte y si el valor es de -120

dBm la señal es débil. Además, se toma en consideración que mientras el valor de RSSI se acerque a 0 la transmisión de datos será confiable (Vargas, 2022).

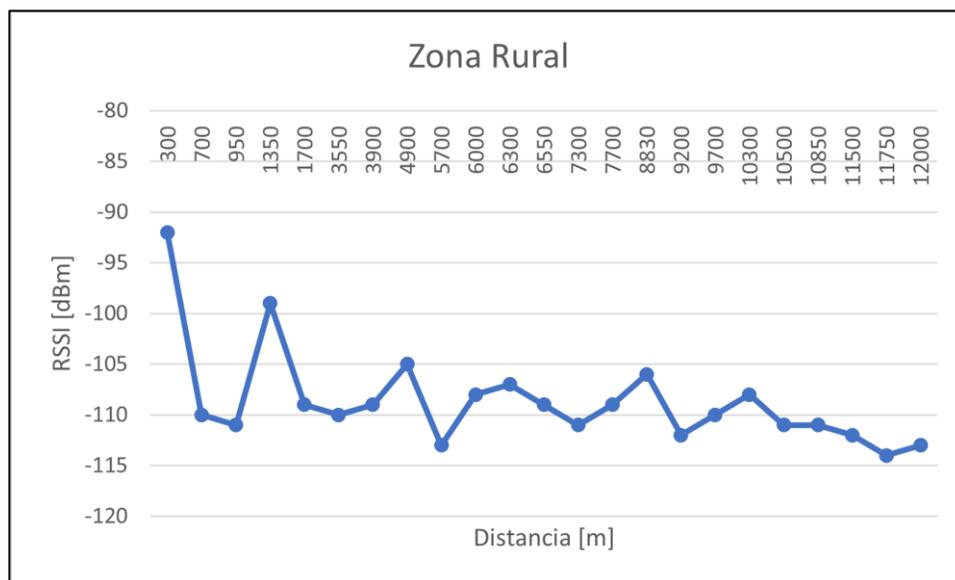
Según la tecnología WiFi establece valores de RSSI para calificar su intensidad de señal que son: -20 dBm a -60 dBm la señal es excelente, -60 dBm a -70 dBm es buena, -70 dBm a -80 dBm es buena, pero con tasas de transferencias bajas y -80 dBm a -100 dBm es mala (Gualdrón et al., 2006).

Zona rural

En la Figura 116 se muestra los valores de RSSI tomados durante el trayecto de la Ruta Viva en relación a la distancia que existe desde el Gateway hasta los diferentes puntos de prueba. Los valores de RSSI están un rango de -92 dBm a -114 dBm y en base a los criterios de RSSI de LoRa se determina que los datos se registraron correctamente y los cambios que se observan se debe a que el lugar presenta zonas irregulares en distintos tramos.

Figura 116

Valores RSSI de zona rural



En la Tabla 32 muestra el resumen de los valores de RSSI a diferentes distancias del Gateway.

Tabla 32

Valores RSSI de zona rural

Distancia [m]	RSSI [dBm]
300	-92
700	-110
950	-111
1350	-99
1700	-109
3550	-110
3900	-109
4900	-105
5700	-113
6000	-108
6300	-107
6550	-109
7300	-111
7700	-109
8830	-106
9200	-112
9700	-110
10300	-108
10500	-111

Distancia [m]	RSSI [dBm]
10850	-111
11500	-112
11750	-114
12000	-113

Zona urbana

En relación a los valores de RSSI que presentan la Tabla 33 y Tabla 34 se entiende que están dentro del rango para establecer comunicación LoRa sin pérdida de datos o conexión.

Tabla 33

Valores RSSI en el polígono República del Salvador

Distancia [m]	RSSI [dBm]
200	-87
400	-91
600	-99
800	-98
1000	-100

Tabla 34*Valores RSSI en el polígono Naciones Unidas*

Distancia [m]	RSSI [dBm]
200	-85
400	-93
600	-95
800	-101
1000	-99
1200	-101

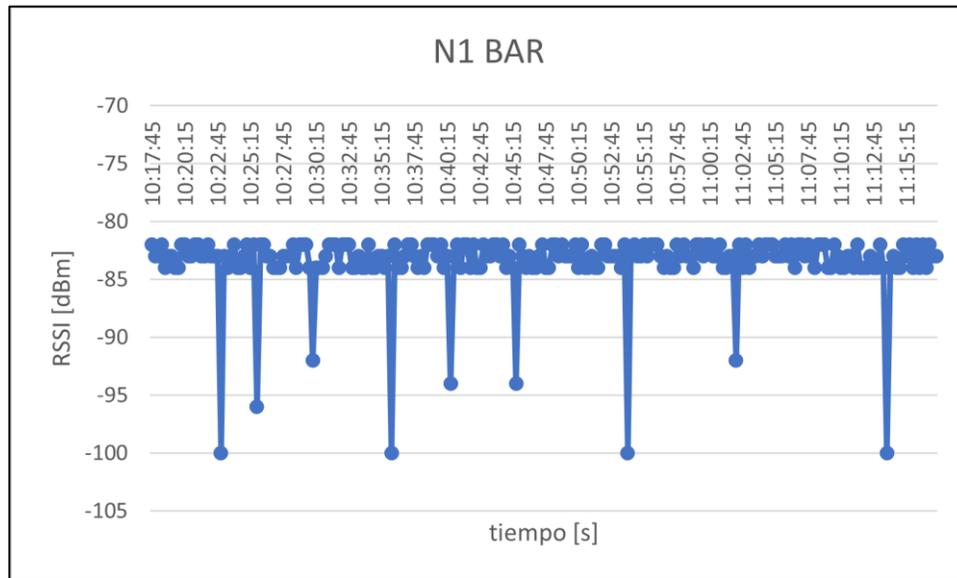
Dentro del campus con tecnología LoRa

El tiempo que se estableció para la recolección de datos en cada punto de prueba fue de aproximadamente una hora, el cual se dividió en dos etapas. La primera etapa se le asignó 30 minutos para comprobar el funcionamiento de los sensores dentro de dicho tiempo cada 5 minutos se realizó la apertura de la tapa de los pozos de revisión. Con respecto a la segunda etapa, se ocupó el tiempo restante para verificar la detección de la tarjeta RFID ingresada de manera aleatoria.

Desde la Figura 117 hasta la Figura 124 se realizó las gráficas que corresponden a los valores RSSI en función del tiempo en cada uno de los puntos de pruebas.

Figura 117

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N1 Bar

**Figura 118**

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N2 Canchas 1

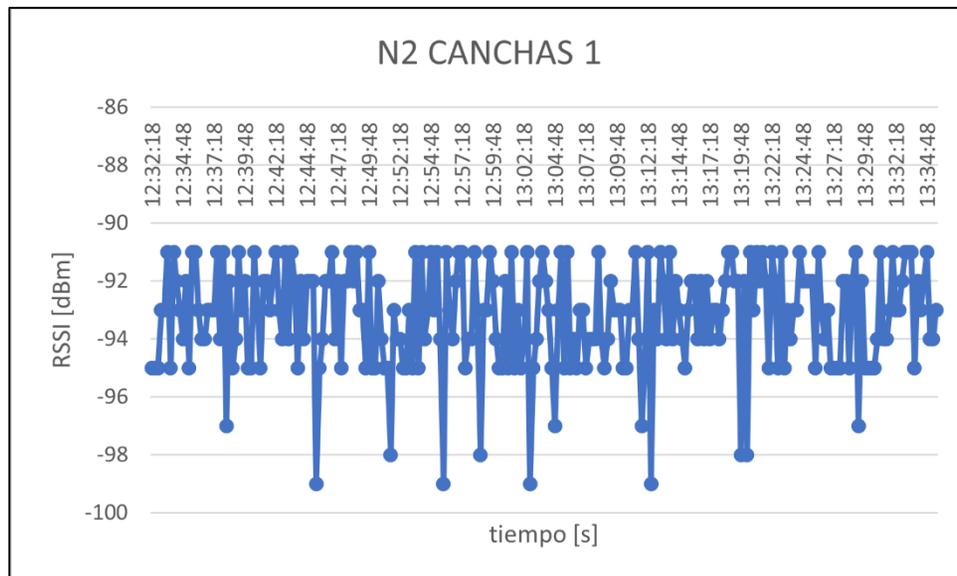
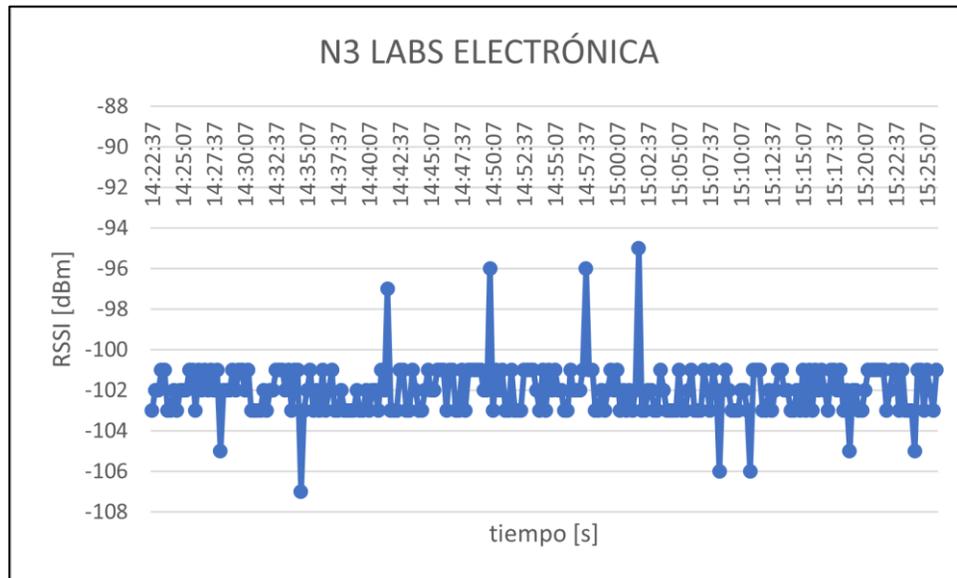


Figura 119

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N3 Laboratorios Electrónica

**Figura 120**

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N4 Bloque D

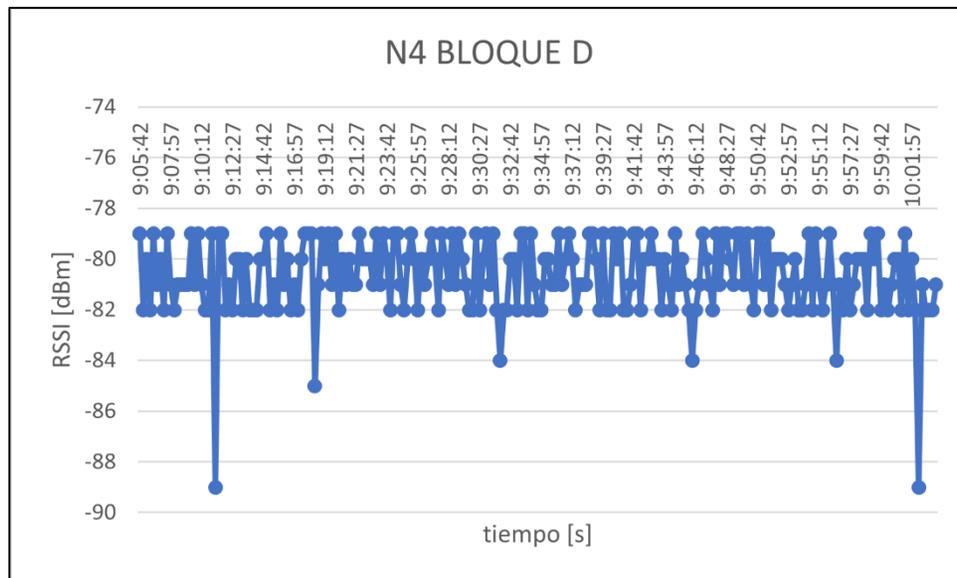
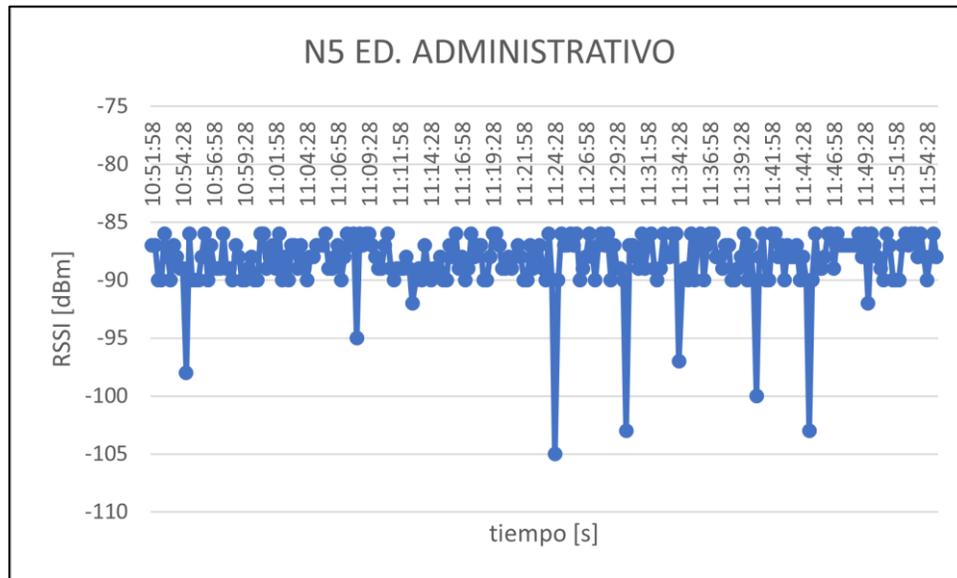


Figura 121

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N5 Ed. Administrativo

**Figura 122**

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N6 Residencia

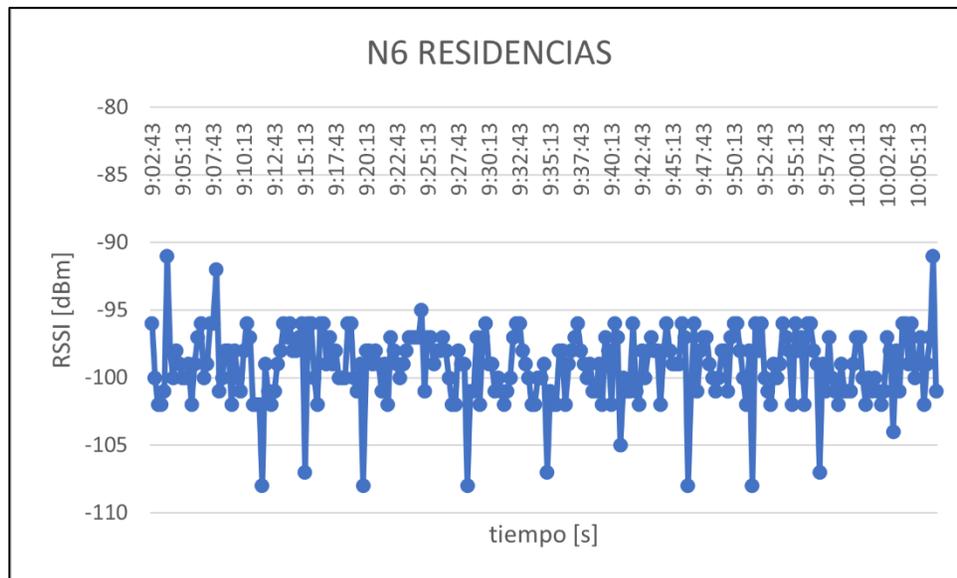
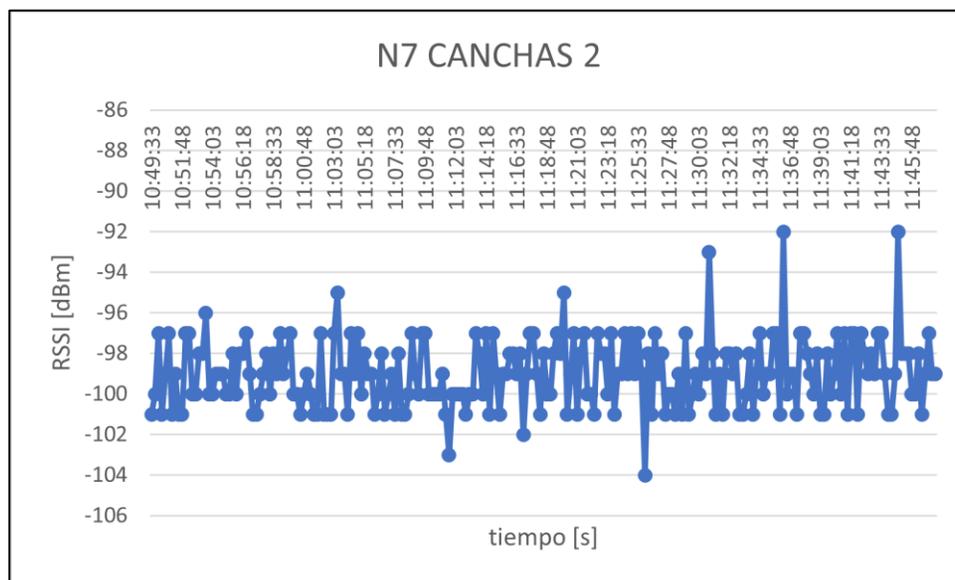
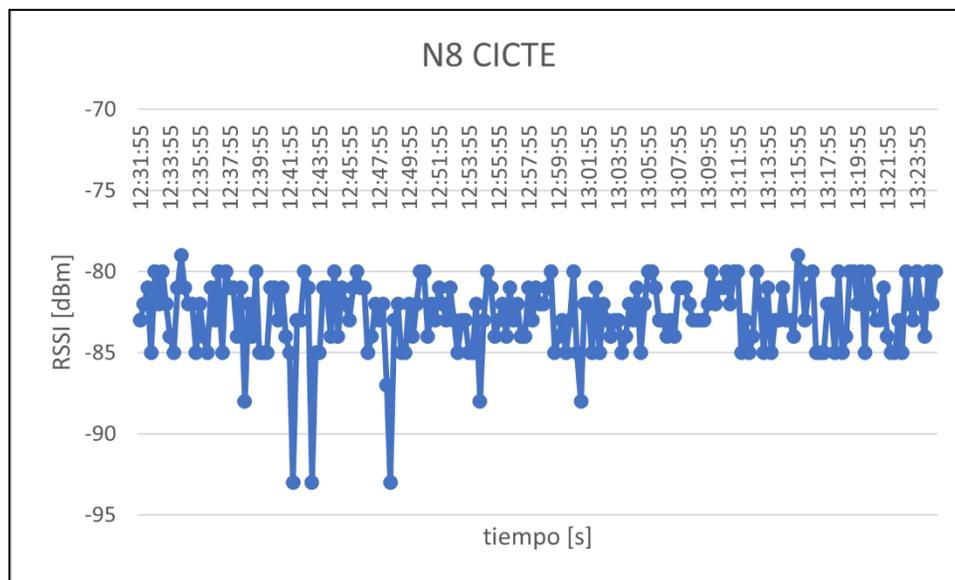


Figura 123

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N7 Canchas 2

**Figura 124**

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N8 CICTE



En la Tabla 35 se presenta un resumen de los valores críticos como el promedio, mínimos y máximos que se obtuvieron de las gráficas presentadas anteriormente. De los datos

obtenidos basados en el promedio se encuentran en un rango de valores de RSSI desde -80.66 [dBm] hasta -102.01 [dBm] de lo cual se puede deducir que se obtuvo una transferencia de datos adecuada puesto que se encuentra dentro del rango establecido por la tecnología LoRa. Por otro lado, también se observaron picos mínimos y máximos que van desde -79 [dBm] hasta -108 [dBm] debido a diferentes interferencias que se dieron durante la toma de datos en los distintos puntos de prueba.

Tabla 35

Valores RSSI de los puntos de prueba con tecnología LoRa

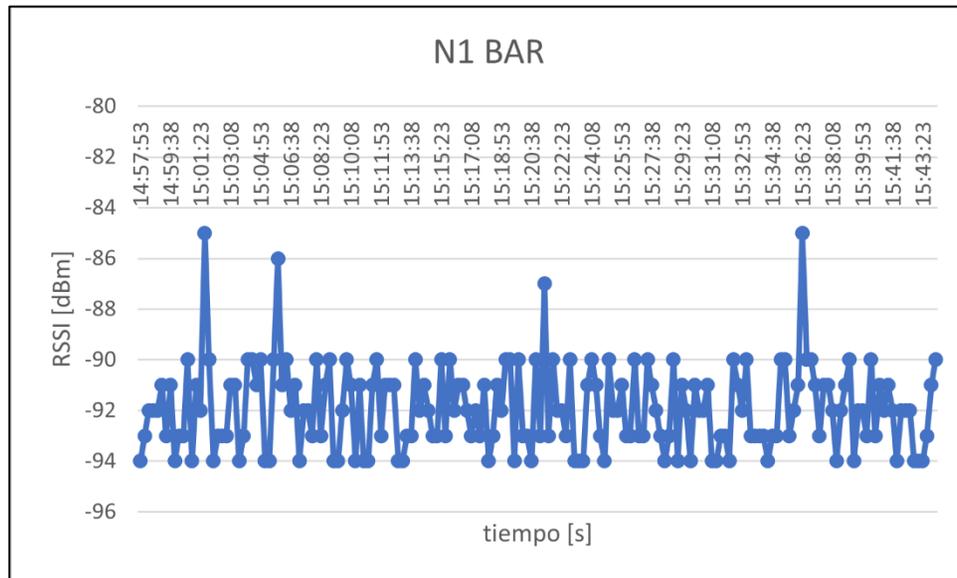
Nombre de las tapas	Mínimo [dBm]	Máximo [dBm]	Promedio [dBm]
N1 Bar	-100	-82	-83.46
N2 Canchas 1	-99	-91	-93.23
N3 Labs	-107	-95	-102.01
N4 Bloque D	-89	-79	-80.66
N5 Ed. Administrativo	-105	-86	-88.37
N6 Residencia	-108	-91	-99.15
N7 Canchas 2	-104	-92	-99
N8 Cictc	-93	-79	-82.71

Dentro del campus con tecnología WiFi

Desde la Figura 125 hasta la Figura 132 se realizó las gráficas que corresponden a los valores RSSI en función del tiempo en cada uno de los puntos de pruebas.

Figura 125

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N1 Bar

**Figura 126**

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N2 Canchas 1

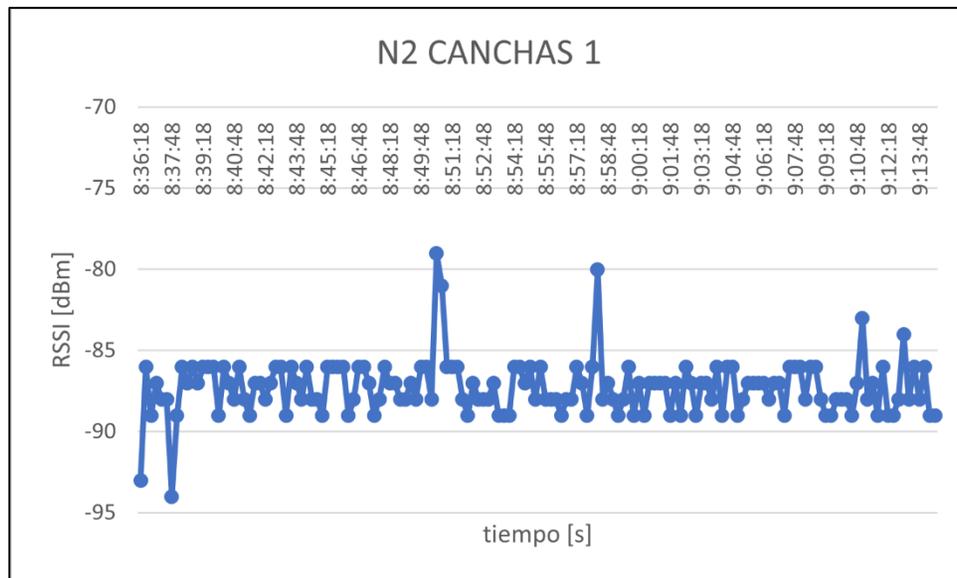


Figura 127

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N3 Laboratorios Electrónica

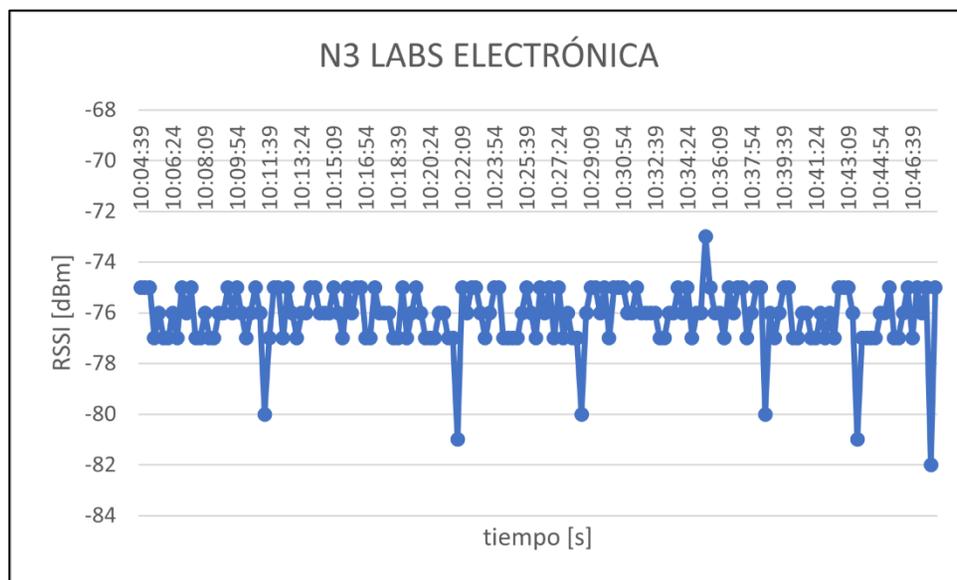


Figura 128

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N4 Bloque D

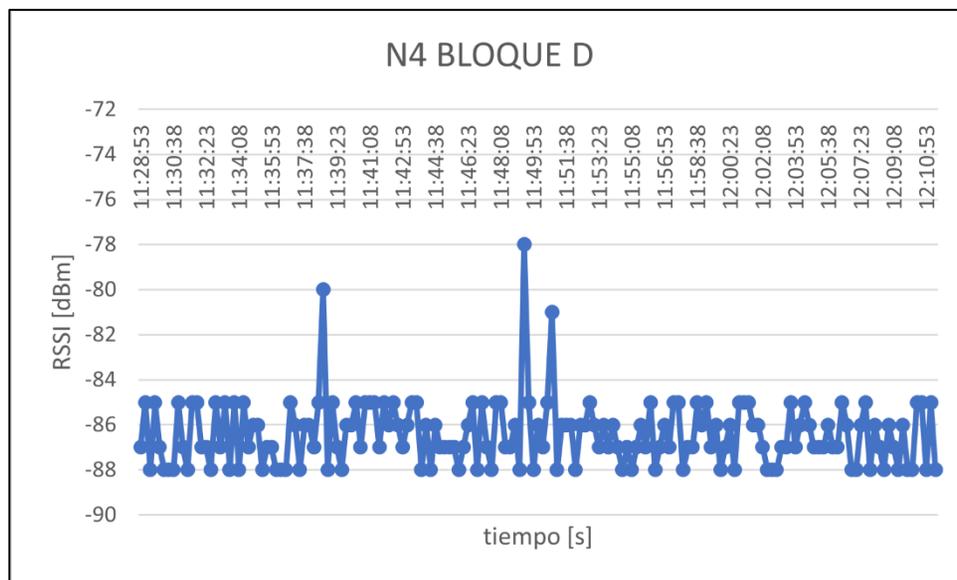
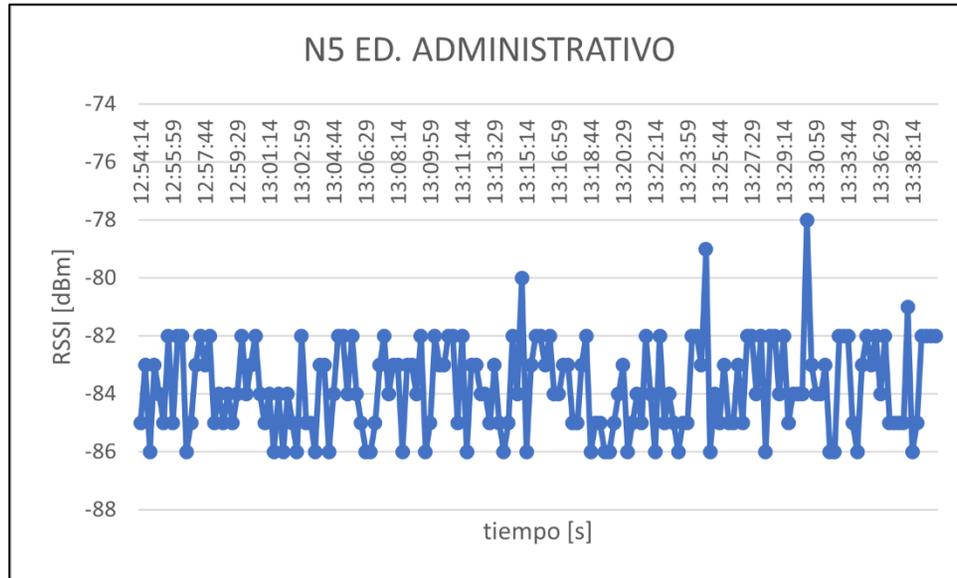


Figura 129

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N5 Ed. Administrativo

**Figura 130**

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N6 Residencias

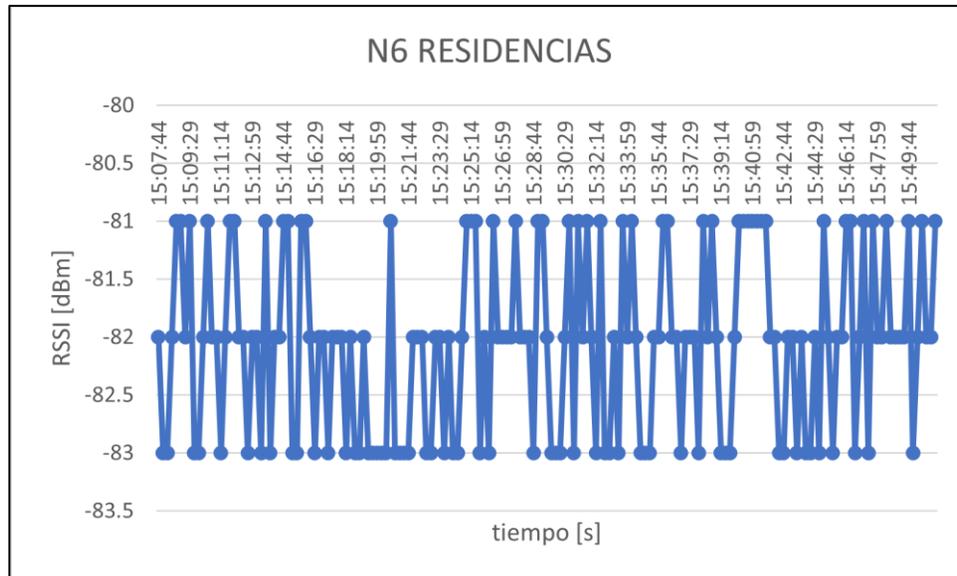
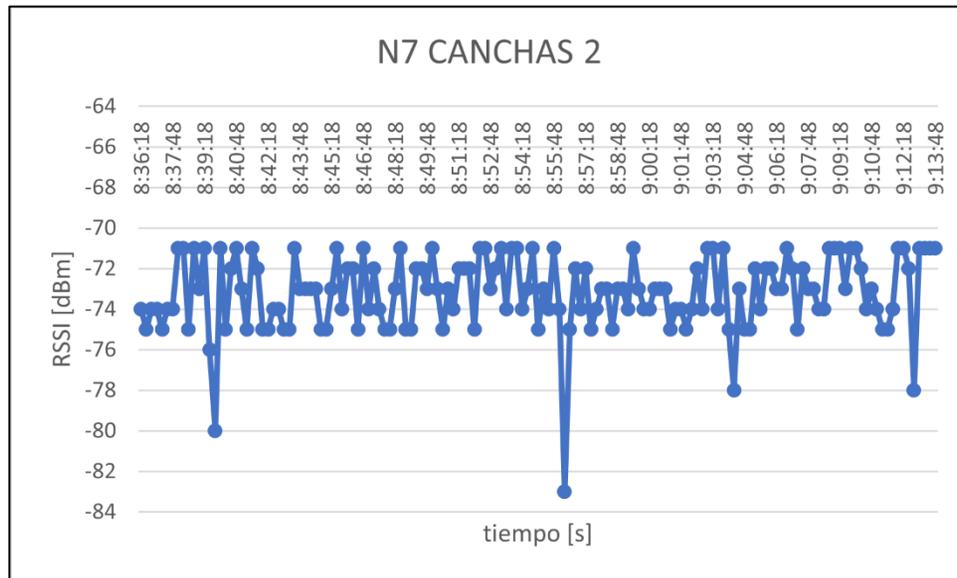
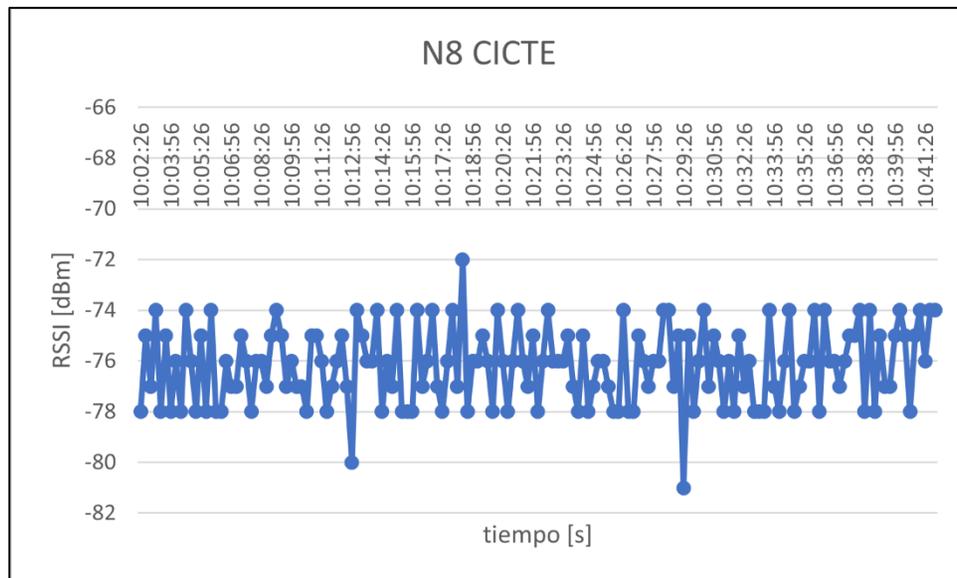


Figura 131

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N7 Canchas 2

**Figura 132**

Gráfica de valores de RSSI de la tapa N8 CICTE



En la Tabla 36 se presenta un resumen de los valores críticos como el promedio, mínimos y máximos que se obtuvieron de las gráficas presentadas anteriormente. De los datos

obtenidos basados en el promedio se puede deducir que se encuentran en un rango de valores de RSSI desde -73.20 dBm hasta -91.92 dBm por lo que se encuentra dentro del rango de bueno y malo. Por otro lado, durante las pruebas también se observaron picos mínimos y máximos que van desde -71 dBm hasta -94 dBm debido a la conexión de red que se dio en los distintos puntos de prueba.

Tabla 36

Valores RSSI de los puntos de prueba con tecnología WiFi

Nombre de las tapas	Mínimo	Máximo	Promedio
N1 Bar	-94	-85	-91.92
N2 Canchas 1	-94	-79	-87.28
N3 Labs	-82	-73	-76.14
N4 Bloque D	-88	-78	-86.40
N5 Ed. Administrativo	-86	-78	-83.77
N6 Residencia	-83	-81	-82.07
N7 Canchas 2	-83	-71	-73.20
N8 Cictc	-81	-72	-76.18

Conectividad

Para subir los datos en la plataforma IoT es necesario la conexión a Internet de los prototipos con tecnología LoRa y WiFi. Se implementó un punto de acceso, donde se conectó una Raspberry Pi que forma parte del Gateway LoRa y el módulo NodeMCU ESP8266 para WiFi. Mediante la aplicación Fing instalada en un dispositivo móvil se puede verificar que dichos equipos se encuentran conectados a la red y observar las IPs designadas como se

presenta en la Figura 133. La dirección IP enmarcada por un cuadro de color rojo corresponde a la Raspberry Pi, mientras que el cuadro de color verde pertenece a la IP del módulo de WiFi.

Figura 133

Dispositivos conectados a la red



Para verificar la conexión de los equipos y asegurar la llegada de los paquetes de datos se realizó una petición ICMP mediante el comando ping en la consola de un ordenador. Se realizó un ping a la dirección IP de la Raspberry Pi, se envió 59 paquetes de los cuales se recibió 59 paquetes y 0 paquetes perdidos como se evidencia en la Figura 134.

Figura 134

Petición ICMP a la Raspberry Pi

```
C:\Users\HP>ping 192.168.128.191 -t

Haciendo ping a 192.168.128.191 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.128.191: bytes=32 tiempo=59ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.128.191: bytes=32 tiempo=10ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.128.191: bytes=32 tiempo=30ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.128.191: bytes=32 tiempo=10ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.128.191: bytes=32 tiempo=14ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.128.191: bytes=32 tiempo=18ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.128.191: bytes=32 tiempo=11ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.128.191: bytes=32 tiempo=38ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.128.191: bytes=32 tiempo=9ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.128.191: bytes=32 tiempo=12ms TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.128.191:
    Paquetes: enviados = 59, recibidos = 59, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
    Mínimo = 6ms, Máximo = 59ms, Media = 15ms
```

Además, se hizo un ping hacia la dirección IP del módulo WiFi. En este caso, se enviaron 60 paquetes y se recibieron todos los paquetes sin pérdidas como se muestra en la Figura 135.

Figura 135

Petición ICMP al módulo WiFi

```
C:\Users\HP>ping 192.168.128.223 -t
Haciendo ping a 192.168.128.223 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.128.223: bytes=32 tiempo=462ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.128.223: bytes=32 tiempo=40ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.128.223: bytes=32 tiempo=248ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.128.223: bytes=32 tiempo=7ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.128.223: bytes=32 tiempo=16ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.128.223: bytes=32 tiempo=4ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.128.223: bytes=32 tiempo=4ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.128.223: bytes=32 tiempo=8ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.128.223: bytes=32 tiempo=10ms TTL=255
Respuesta desde 192.168.128.223: bytes=32 tiempo=4ms TTL=255
Estadísticas de ping para 192.168.128.223:
    Paquetes: enviados = 60, recibidos = 60, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
    Mínimo = 2ms, Máximo = 462ms, Media = 26ms
```

Consumo de energía

Para obtener el consumo de energía total del dispositivo es necesario conocer la corriente de operación de cada uno de sus elementos, por ello en la Tabla 37 se detalla el valor teórico cuando están en funcionamiento obteniendo un resultado de 129 mA, siendo este el valor del consumo de corriente teórico.

Tabla 37

Consumo de corriente teórico del nodo final LoRa

Componente	Consumo de corriente [mA]
Heltec Lora 32 V2	60

Componente	Consumo de corriente [mA]
Módulo RFID	26
Módulo ultrasónico	15
Módulo inclinación	25
Led	3
Total	129

Para medir el consumo de corriente del nodo final LoRa se realizó la conexión de un amperímetro en serie a la batería. El resultado de dicha medición marcó 128.4 mA a 5V como se muestra en la Figura 136.

Figura 136

Consumo de corriente práctico del nodo final LoRa



El porcentaje de error en el consumo de corriente del nodo final LoRa de acuerdo al valor teórico y práctico es de 0.465%. A su vez el consumo de energía fue de 642 mWh. El cálculo para la duración de la batería se realiza en base a la potencia de la batería y del nodo final, como se presenta en la siguiente ecuación.

$$t = \frac{P_{bateria}}{P_{nodo}} \quad (4)$$

$$t = \frac{V_{bateria} \cdot I_{bateria}}{V_{nodo} \cdot I_{nodo}} \quad (5)$$

$$t = \frac{3.7 V \cdot 4800 mAh}{5 V \cdot 129 mA}$$

$$t = 27.53 h$$

De acuerdo a los cálculos obtenidos se estima que la batería se descarga en 27.53 horas, pero se recomienda que no se llegue a una descarga mayor del 50% para mantener su vida útil, por lo cual se considera que la disponibilidad de la batería será de 13.77 horas para el tiempo que carezca de luz solar.

Tabla 38

Consumo de corriente teórico del nodo final WiFi

Componente	Consumo de corriente [mA]
Node MCU ESP8266	80
Módulo RFID	26
Módulo ultrasónico	15
Módulo inclinación	25
Led	3
Total	149

La Figura 137 muestra el valor del consumo de corriente de 155.2 mA a 5V correspondiente al nodo final WiFi.

Figura 137

Consumo de corriente práctico del nodo final WiFi



El porcentaje de error del consumo de corriente del nodo final WiFi de acuerdo al valor teórico y práctico es de 4.16%. A su vez el consumo de energía fue de 776 mWh.

Para el cálculo de la duración de la batería se realiza en base a las ecuaciones 4 y 5, dando como resultado 23.84 horas.

$$t = \frac{3.7 V \cdot 4800 mAh}{5 V \cdot 149 mA}$$

$$t = 23,84 h$$

De acuerdo a los cálculos obtenidos se estima que la batería se descarga en 23.84 horas, pero se recomienda que no se llegue a una descarga mayor del 50% para mantener su vida útil, por lo cual se considera que la disponibilidad de la batería será de 11.92 horas para el tiempo que carezca de luz solar.

Costos del prototipo

El valor de los elementos o equipos se establecieron en base a valores comerciales, es necesario tomar en consideración que para la implementación de la tecnología LoRa se adquirió tarjetas de desarrollo y antenas desde otro país por lo que su valor será más alto debido a su importación. A continuación, se mostrará diferentes tablas de costos referentes a cada nodo y el Gateway.

Tabla 39

Costo del Nodo 1

Cantidad	Materiales	Costo
1	Tarjeta de desarrollo Heltec LoRa32 V2	\$ 50
1	Módulo RFID	\$ 5
1	Módulo ultrasónico	\$ 3
1	Módulo inclinación	\$ 2
1	Antenas	\$ 35
1	Sistema autónomo de energía	\$ 16
1	Diseño e impresión de caja en 3D	\$ 80
1	Otros	\$ 8
	Total	\$ 199

Tabla 40*Costo del Nodo 2*

Cantidad	Materiales	Costo
1	Tarjeta de desarrollo Ra-01SH IPEX	\$ 15
1	Tarjeta de desarrollo Heltec kit WiFi 32	\$ 35
1	Módulo RFID	\$ 5
1	Módulo ultrasónico	\$ 3
1	Módulo inclinación	\$ 2
1	Antenas	\$ 35
1	Sistema autónomo de energía	\$ 16
1	Diseño e impresión de caja en 3D	\$ 80
1	Otros	\$ 8
	Total	\$ 199

Tabla 41*Costo del Gateway*

Cantidad	Materiales	Costo
1	Tarjeta de desarrollo Heltec LoRa32 V2	\$ 50
1	Raspberry Pi 3 Model B	\$ 150
1	Antenas	\$ 20
1	Diseño e impresión de caja en 3D	\$ 60
	Total	\$ 280

Tabla 42*Costo del Nodo 3*

Cantidad	Materiales	Costo
1	Tarjeta de desarrollo Node MCU ESP8266	\$ 16
1	Módulo RFID	\$ 5
1	Módulo ultrasónico	\$ 3
1	Módulo inclinación	\$ 2
1	Sistema autónomo de energía	\$ 16
1	Diseño e impresión de caja en 3D	\$ 80
1	Router D-Link 615	\$ 20
1	Otros	\$ 8
	Total	\$ 150

Tabla 43*Costos finales del proyecto*

Cantidad	Detalle	Costo
1	Nodo 1	\$ 199
1	Nodo 2	\$ 199
1	Gateway	\$ 280
1	Nodo 3	\$ 150
4	Mano de obra	\$ 700
	Total	\$ 1528

En la Tabla 43 se detalla el valor de cada uno de los nodos y el Gateway, además se incluye el valor de mano de obra analizando el costo del diseño y configuración, tomando en cuenta que algunos equipos fueron adquiridos del exterior y que es un prototipo, se tiene un valor total de \$1528.

Para ver el funcionamiento final del prototipo escanee el código QR y le direccionará a un video en el canal de YouTube.



Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Una vez realizado el estudio teórico se llegó a la conclusión que no existe ningún sistema que permite controlar el acceso de la infraestructura civil subterránea en la ciudad de Quito, por lo cual se propone este proyecto como una posible solución a dicha problemática con ayuda de las tecnologías LoRa y WiFi, debido a que LoRa permite el envío de datos a largas distancias a un bajo consumo, por otro lado, en la ciudad se encuentran distribuidos 40 puntos de acceso WiFi cercanos a ciertos polígonos con los cuales se puede aprovechar para alcanzar a ciertos puntos críticos donde no exista cobertura LoRa.

Gracias a la investigación realizada se definió dos variables adecuadas para la correcta detección de la apertura de una tapa y no permitir falsas alarmas, en este caso, la proximidad y la inclinación trabajaron en conjunto en base a una condición preestablecida. De acuerdo a dichas variables se logró dimensionar los dispositivos electrónicos necesarios para la construcción del prototipo tanto para la tecnología LoRa y WiFi, resaltando que cada uno tiene su sistema de energía autónomo. Por último, se escogió dispositivos disponibles en el mercado que realicen dichas funcionalidades a bajos costos aprovechando sus características.

Se diseñó una red con tecnología LoRa definiendo un payload de 6 bytes que contienen los siguientes datos; dirección destino y dirección local para identificar el nodo y permitir el acceso de la información, valores de los sensores de inclinación y distancia, y, por último, el estado de alarma. El Gateway diseñado permite administrar 255 nodos finales y acepta tarjetas de desarrollo LoRa de diferente fabricante siempre y cuando funcione con el chip SX1278/SX1276. Otro punto importante dentro de LoRa fue la colocación de antenas con una ganancia de 10 dBi para alcanzar mayor cobertura. De acuerdo a las pruebas de campo realizadas se concluye que la antena del Gateway es la principal porque a través de ella se

define la cobertura, en los nodos finales se puede colocar una antena de 3 dBi que no ocasiona ningún inconveniente en la transmisión de los datos

La tecnología WiFi consta de un nodo final que fue conectado a la red a través de un punto de acceso, el mismo que tiene dos antenas de 5 dBi alcanzando 100 metros de cobertura. Los datos de los sensores y el estado de alarma se registraron directamente a la plataforma.

La plataforma IoT que se utilizó para visualizar los datos fue ThingSpeak debido a su desempeño en aplicaciones IoT, a través del API Key se enlazó el dashboard de cada nodo final que contiene gráficas de los datos de inclinación, distancia, estado de alarma y RSSI; cada uno está asociado a un widget para que su interfaz gráfica sea más amigable al usuario y se pueda dar aviso a las autoridades competentes de cualquier actividad inusual en tiempo real.

El rendimiento de los prototipos con tecnología LoRa y WiFi se comprobó mediante la medición de corriente y voltaje para obtener el consumo energético, valores de RSSI para verificar la intensidad de señal y la apertura de las tapas para verificar la detección de señales de los sensores. Los resultados del consumo de energía arrojaron que la batería se descarga en 27.53 horas y 23.84 horas para el nodo final LoRa y WiFi, respectivamente, por lo cual se observa que la batería de LoRa dura un poco más que WiFi. Acerca de los valores de RSSI tomados de las pruebas de tecnología LoRa en la zona rural fue de -92 dBm a -114 dBm, zona urbana de -85 dBm a -101 dBm, en el campus de -79 dBm hasta -108 dBm, y -71 dBm hasta -94 dBm para WiFi en el campus, por lo cual se deduce que se encuentran dentro del rango para la transferencia de datos confiable. Para verificar la detección de señales por parte de los sensores se realizaron pruebas de funcionamiento con la apertura de las tapas y los sensores colocados en su respectiva ubicación, a través de los indicadores led se verificó la detección de señal de forma física y en la plataforma IoT se visualizó las alertas por medio de widgets.

Los resultados de la tecnología LoRa sobre la cobertura en zonas rurales con línea de vista alcanzó 12 km y en zonas urbanas con alta concurrencia se obtuvo 1.2 km, con respecto a los costos se estima que un nodo y un Gateway cuesta 479 dólares sin añadir mano de obra ni propiedad intelectual, mientras que, el consumo de energía alcanzó 0.642 W. La tecnología WiFi cubrió un área de 100 m con línea de vista, con un costo de 150 dólares solo del prototipo físico y un consumo de energía de 0.776 W. De acuerdo a los datos descritos anteriormente se concluye que las dos tecnologías presentan ciertas características similares como el envío de datos confiable y un bajo consumo de energía, pero se diferencian en el radio de cobertura y costos debido a que LoRa puede alcanzar mayores distancias, mientras que WiFi es más económico.

Enfocándose en la utilidad del prototipo para la infraestructura civil subterránea de la ciudad las dos tecnologías se pueden complementar dependiendo de la ubicación del polígono. Por ejemplo, en el polígono de la Ruta Viva Fase 1 se puede utilizar la tecnología LoRa con dos Gateway dando cobertura a 304 tapas, mientras que, en el polígono de Plaza Pomasqui se podría colocar un Access Point cubriendo 5 tapas, la opción de colocar un Gateway LoRa no sería la adecuada debido a que no existen polígonos aledaños y se desperdiciaría la cobertura. En ciertos casos podría existir una combinación de tecnologías como ocurre con el polígono República del Salvador, en el cual se emplearía un Gateway y distintos APs donde existan zonas de sombra.

Se recomienda colocar las antenas en lugares altos para mejorar la zona de cobertura y evadir obstáculos que puedan existir en la línea de vista o por la orografía de la ciudad. Es indispensable asegurar los sensores que se van a ubicar dentro la tapa debido a que es una zona húmeda y puede existir errores de calibración o daños. Para preservar los equipos es necesario otorgarle un nivel de protección IP puesto que están expuestos al polvo y agua.

Además, se recomienda que si se va a traer equipos del exterior se realice la petición con tiempo porque puede existir inconvenientes durante el envío.

Trabajos futuros

Se propone la realización de un sistema de gestión remota amigable con el usuario para dar autorización de acceso y hacer uso de la infraestructura civil subterránea porque actualmente el registro de usuarios se realiza mediante la programación en el nodo final.

Debido a que el control de acceso a los pozos de revisión tiene un alto grado de responsabilidad es necesario implementar herramientas de ciberseguridad que identifiquen intrusos o ataques.

En vista de que los datos se visualizan en una plataforma IoT vía web es necesario crear una aplicación móvil para mejorar la monitorización del acceso a la infraestructura, además, que incluya notificaciones en tiempo real.

Se plantea la opción de implementar la tecnología LoRa en el ámbito de las Smart Cities, enfocándose en la seguridad de la ciudadanía a través de un botón de pánico.

Adaptar el Gateway para que funcione con diferentes chips de LoRa e implementar en un escenario real con los niveles de protección IP necesarios.

Bibliografía

- Abella, A., Ortiz de Urbina Criado, M., & De Pablos Heredero, C. (2015). Information reuse in smart cities ecosystems. *El Profesional de La Información*.
<https://revista.profesionaldelainformacion.com/index.php/EPI/article/view/epi.2015.nov.16/23789>
- Aerosemi. (2015). MT3608 - High Efficiency 1.2MHz 2A Step Up Converter. *Aerosemi*.
- Ai Thinker. (2020). Ra-01SH Specification. *Ai Thinker*.
- ARCOTEL. (2017). Norma Técnica para Despliegue y tendido de Redes Físicas Soterradas. *Agencia de Regulación y Control de Las Telecomunicaciones*. www.lexis.com.ec
- Arun Francis G, Arulselvan M, Elangkumaran P, Keerthivarman S, & Vijaya Kumar J. (2019). Object Detection Using Ultrasonic Sensor. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*.
- Baquero, C., & Martínez, V. (2020). Diseño y construcción de prototipo electrónico para la detección del robo en tapas del acueducto mediante señales de vibraciones. *Repositorio Universidad de La Salle*.
https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electricahttps://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/585
- Beyene, Y. D., Jantti, R., Tirkkonen, O., Ruttik, K., Iraj, S., Larmo, A., Tirronen, T., & Torsner, J. (2017). NB-IoT Technology Overview and Experience from Cloud-RAN Implementation. *IEEE Wireless Communications*, 24(3), 26–32. <https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600418>
- Bourguignon, F., & Pleskovic, B. (2005). *Annual World Bank Conference on Development Economics*. World Bank Publications.
- Bouskela, M., Casseb, M., Bassi, S., De Luca, C., & Facchina, M. (2016). *La ruta hacia las smart*

cities: Migrando de una gestión tradicional a la ciudad inteligente. Inter-American Development Bank.

Burbano, C. (2017). Implementación de una red de sensores inalámbricos LPWAN mediante módulos LoRa para el monitoreo de la calidad del agua en 2 ríos. *Repositorio Universidad Estatal Francisco José de Caldas*. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6433>

Cárdenas, Á. (2016, November 28). *¿Qué es una plataforma IoT?* Secmotic Smart Inside. <https://secmotic.com/plataforma-iot/#gref>

Chaudhari, B. S., Zennaro, M., & Borkar, S. (2020). LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations. *Future Internet 2020, Vol. 12, Page 46, 12(3)*, 46. <https://doi.org/10.3390/FI12030046>

Chen, W., Jeong, S., & Jung, H. (2020). WiFi-Based Home IoT Communication System. *J. Lnf. Commun. Converg. Eng.*, 18(1), 8–15. <https://doi.org/10.6109/jicce.2020.18.1.8>

Chicaiza, D. (2009). Estudio de las redes de sensores bajo el agua y sus principales aplicaciones. *Repositorio Universidad de Las Fuerzas Armadas*.

D-Link. (2019). DIR-615 Wireless N 300 Router. *D-Link*. <https://in.dlink.com/en/products/dir-615-wireless-n300-router>

Daviteq. (2021). Sigfox Technology - Make Things Come Alive. In *Wireless Communication White-paper*. <https://www.daviteq.com/blog/en/sigfox-technology-make-things-come-alive/>

DCIM. (2021a, November 11). *Panel Solar Mini 6 V 140 mAh SBE-12060*. Diseño, Construcción e Implementación Mecatrónica. <https://dcimecuador.com/producto/panel-solar-mini-6-v-140-mah-sbe-12060/>

DCIM. (2021b, November 12). *Batería Recargable Ultrafire 18650 3.7V 4800mAh Li-Ion*. Diseño,

Construcción e Implementación Mecatrónica. <https://dcimecuador.com/producto/bateria-recargable-wzs-ultrafire-18650-3-7v-4800mah-li-ion/>

Dewanto, S. A., Munir, M., Wulandari, B., & Alfian, K. (2021). MFRC522 RFID Technology Implementation for Conventional Merchant with Cashless Payment System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1737, 12012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1737/1/012012>

Einstronic. (2017). Introduction to NodeMCU ESP8266. *Einstronic, Turn on the Future*.
www.einstronic.com

El Comercio. (2020, August 31). *703 puntos WiFi públicos y gratuitos fueron habilitados en Quito*. El Comercio . <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/puntos-wifi-publicos-gratuitos-quito.html>

Ertürk, M. A., Aydın, M. A., Büyükakkaşlar, M. T., & Evirgen, H. (2019). A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies. *Future Internet 2019*, 11(10), 216.
<https://doi.org/10.3390/FI11100216>

Espinoza, H. (2021). *Plataforma basada en Internet de las Cosas (IoT) para la medición y monitoreo remoto del nivel de gas sulfuro de hidrógeno generado por baterías de montacargas eléctricos en entornos logísticos*. Universidad Politécnica Salesiana.

Everything RF. (2018). What is LoRa? In *Editorial Team Everything RF*.
<https://www.everythingrf.com/community/what-is-lora>

Galindo Iván, & Acosta Jonathan. (2021). Sistema de monitoreo electromecánico que verifica el estado de las tapas ancladas a cámaras de inspección subterránea basado en IoT. *Repositorio Fundación Universitaria Los Libertadores*.
https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/4398/Galindo_Acosta_2021.p

df?sequence=1&isAllowed=y

- García, L., Jiménez, J., Lloret, J., & Lorenz, P. (2019). WiFi and LoRa Energy Consumption Comparison in IoT ESP 32/ SX1278 Devices. *Repositorio de La Universidad Politécnica de Valencia*. <http://hdl.handle.net/10251/180545>
- García, L., Jiménez, J. M., Taha, M., & Lloret, J. (2018). Wireless Technologies for IoT in Smart Cities. *Macrothink Institute*, 10(1). <https://doi.org/10.5296/npa.v10i1.12798>
- Garrido, R. (2015). Estudio Plataformas IoT. *Repositorio de La Universidad de Cataluña*.
- Goel, R. K., Singh, B., & Zhao, J. (2012). *Underground Infrastructures: Planning, Design, and Construction*. Butterworth-Heinemann.
- Gridling, G., & Weiss, B. (2007). Introduction to Microcontrollers. *Institute of Computer Engineering*.
- Grupo Electrostore. (2022, May 22). *Módulo elevador de voltaje 2A MT3608 ajustable step-up boost*. Grupo Electrostore. <https://grupoelectrostore.com/shop/modulos-y-shields/reguladores-de-voltaje/modulo-elevador-de-voltaje-2a-mt3608-ajustable-step-up-boost/>
- GSMA. (2022). Narrowband – Internet of Things (NB-IoT). In *GSM Association*. <https://www.gsma.com/iot/narrow-band-internet-of-things-nb-iot/>
- Gualdrón, O., Pinzón, S., De Luque, L., Díaz, I., & Vásquez, S. (2006). Una herramienta para la predicción de la intensidad de la señal recibida (RSSI) para Wireless LAN 802.11B. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. www.gsr.unican.es
- Handsontec. (2021). RC522 RFID Development Kit. *Handson Technology*. www.handsontec.com
- Heltec Automation. (2018). WIFI LoRa 32 (V2) . In *Heltec Automation*.

<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>

Heltec Automation. (2019). WiFi Kit 32 . *Heltec Automation*. <https://heltec.org/project/wifi-kit-32/>

Herrera, C., Tran, T., Egas, C., Pereira, V., & Sá Silva, J. (2016). Reliability in Wireless Sensor Networks for Environment Monitoring. *Revista Universidad Politécnica Nacional*.

https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/621

Höllner, J., Tsiatsis, V., Mulligan, C., Karnouskos, S., Avesand, S., & Boyle, D. (2014). M2M and IoT Technology Fundamentals. In *From Machine-To-Machine to the Internet of Things*.

Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407684-6.00005-X>

Ismail Al-Alawi, A. (2006). WiFi Technology: Future Market Challenges and Opportunities. *Journal of Computer Science*, 2(1), 13–18.

Jimbo, P., Jimbo, M., & Aguilar, A. (2017). DM Quito – Ecuador - Smart City para el 2022. *Revista Publicando*, 4(10 (1)), 559–573.

<https://revistapublicando.org/revista/index.php/crv/article/view/448>

Karl, H., & Willig, A. (2005). Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. *Wiley*.

<http://profsite.um.ac.ir/~hyaghmae/ACN/WSNbook.pdf>

Kumar, V., Yadav, P., & Indrusiak, L. (2022). Resilient Edge: Can we achieve Network Resiliency at the IoT Edge using LPWAN and WiFi? *Repositorio de La Universidad de Cornell*.

<https://doi.org/10.48550/arxiv.2205.03729>

Lavric, A., & Petrariu, A. I. (2018). LoRaWAN communication protocol: The new era of IoT. *2018 14th International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, 74–77.

<https://doi.org/10.1109/DAAS.2018.8396074>

Leantec. (2019). Datasheet HC-SR04. *Leantec Robotics and Electronics*. www.leanotec.es

- Llanca, P. (2017). Análisis y seguimiento del modelo de Smart City en el Gran Santiago. *Repositorio Universidad Americana*. <https://biblioteca.uam.edu.ni/recolector/Record/cl-uchile145025>
- Luciano, M. (2019). Control de acceso mediante RFID. *FRVM de La Universidad Tecnológica Nacional*.
- Łuczak, S., Ekwí, M., & Phan, H.-P. (2021). Electric-Contact Tilt Sensors: A Review. *Review. Sensors*, 21, 1097. <https://doi.org/10.3390/s21041097>
- Manyika, J., Chui, M., Bisson, P., Woetze, J., Dobbs, R., Bughin, J., & Aharon, D. (2015). The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype. *Mickinsey Global Institute*. www.mckinsey.com/mgi.
- Merino, J. C. (2019, October). Despliegue Y Evaluación de una Red On-Site LoRaWAN basada en The Things Network Stack versión 3. *Repositorio Universidad Cantabria*. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/17087/420136.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moko LoRa. (2021, September 14). *Comparación entre LoRa y otras tecnologías inalámbricas*. Moko LoRa. <https://www.mokolora.com/lora-and-wireless-technologies/>
- Montagny, S. (2022). LoRa-LoRaWAN and Internet Of Things. *Universidad Savoie Mont Blanc*. www.univ-smb.fr/lorawan
- Murdyantoro, E., Nugraha, A. W. W., Wardhana, A. W., Fadli, A., & Zulfa, M. I. (2019). A review of LoRa technology and its potential use for rural development in Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2094. <https://doi.org/10.1063/1.5097480>
- NanJing Top Power ASIC Corp. (2015). TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with

Thermal Regulation in SOP-8. *NanJing Top Power ASIC Corp.*

Navas, A. (2020). Índice y Modelo de Ciudades Inteligentes del Ecuador 2019-2020 . *Innovarium*.
https://www.researchgate.net/publication/353421392_Indice_y_Modelo_de_Ciudades_Inteligentes_del_Ecuador_2019-2020_-_Smart_City_Index_and_Model_for_Ecuador

Palter, J. (2019). What are Smart Security Systems? In *Real Time Networks*.
<https://www.realtimenetworks.com/blog/what-are-smart-security-systems>

Pasha, S. (2016). Thingspeak Based Sensing and Monitoring System for IoT with Matlab Analysis . *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*.
<https://media.neliti.com/media/publications/263492-thingspeak-based-sensing-and-monitoring-0bde9a4b.pdf>

Peek, S. (2021). Affordable Access Control Systems for Small Businesses. In *Business*.
<https://www.business.com/access-control-systems/smart/>

Pérez, D., & Risco, R. (2020). Implementation of Lora of Lorawan as a future scenario of industry 4.0 in peruvian agro-industry sector. *Revista Universidad de Piura*.

Quinga, A. (2019). Manual de procesos para la administración de catastro de infraestructura civil subterránea para redes de telecomunicaciones en el DMQ basados en las buenas prácticas del PMI. *Repositorio de La Universidad de Las Américas UDLA*.
<https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/11029/1/UDLA-EC-TMAED-2019-06.pdf>

Rao Jaladi, A., Khithani, K., Pawar, P., Malvi, K., & Sahoo, G. (2017). Environmental Monitoring Using Wireless Sensor Networks(WSN) based on IOT. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net

Raspberry Pi. (2016). Buy a Raspberry Pi 3 Model B. In *Raspberry Pi*.

<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>

Raspberry Pi Foundation. (2014). What is a Raspberry Pi? In *Raspberry Pi Foundation*.

<https://www.raspberrypi.org/help/what->

Rodríguez, J. (2016). Dispositivo LoRa de comunicación a largo alcance y bajo consumo energético para aplicaciones del ámbito del desarrollo. *Interuniversitario de La Universidad Politécnica Complutense de Madrid*.

https://oa.upm.es/44890/1/TFM_JOSE_DANIEL_RODRIGUEZ_MUNCA.pdf

Secretaría de Territorio. (2022). *Registro de Grado de Ocupación o Uso de la Infraestructura Instalada*. Geoportal Ciudadano DMQ.

<https://pam.quito.gob.ec/PAM/Geoportales/GeoInternet.aspx#info>

Semiconductors, N. (2016). MFRC522 Standard performance MIFARE and NTAG frontend. *NXP Semiconductors*.

Sierra Wireless. (2021). What is Narrowband IoT (NB-IoT)? In *Sierra Wireless*.

<https://www.sierrawireless.com/iot-blog/what-is-nb-iot/>

Sigfox. (2018). Sigfox Technical Overview. *Sigfox*.

Singhania, V. (2015). The Internet of Things: An Overview Understanding the Issues and Challenges of a More Connected World. *Internet Society*.

SunFounder. (2021, August). Tilt Switch. *SunFounder*.

https://docs.sunfounder.com/projects/sensorkit-v2-arduino/en/latest/lesson_21.html

Taipe, G. (2017). Modelización metodológica para la evaluación del rendimiento de un deportista de alto rendimiento empleando redes de sensores inalámbricos (WSN). *Repositorio Universidad de Las Fuerzas Armadas*.

<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/13768>

Tavares, E., Spanhol, F., & Castro, Á. (2021). Deployment of a LoRaWAN network and evaluation of tracking devices in the context of smart cities. *Journal of Internet Services and Applications*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/S13174-021-00138-7>

The Things Network. (2016). What are LoRa and LoRaWAN? In *The Things Network*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>

UNIT Electronics. (2022, May 7). *TP4056 Cargador de Baterías Li-Ion*. UNIT Electronics. <https://uelectronics.com/producto/tp4056-con-proteccion-dual-microusb-tipo-c-cargador-de-baterias-li-ion-li-po/>

Vargas, J. (2022). Desarrollo de un sistema de comunicación inalámbrico basado en tecnología LoRa para el sensado remoto de variables eléctricas. *Repositorio de La Universidad Politécnica Salesiana*.

Wang, H., Sui, H., Li, J., Chacko Scholar, S. P. G., & Job Assistant Professor, D. (2018). Security mechanisms and Vulnerabilities in LPWAN. *IOP Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/396/1/012027>

Zhmud, V. A., Kondratiev, N. O., Kuznetsov, K. A., Trubin, V. G., & Dimitrov, L. V. (2018). Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 1015, 32189. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032189>