



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO IoT PARA
MONITOREAR LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA
DE CONSUMO HUMANO EN LOS TANQUES DE HUILLIS Y
GUANANDO”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

AUTOR: ISRAEL JOSÉ JARA SÁNCHEZ

DIRECTOR(A): Ing. ALBERTO ARELLANO AUCANCELA

Riobamba – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO IoT PARA
MONITOREAR LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA
DE CONSUMO HUMANO EN LOS TANQUES DE HUILLIS Y
GUANANDO”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

AUTOR: ISRAEL JOSÉ JARA SÁNCHEZ

DIRECTOR(A): Ing. ALBERTO ARELLANO AUCANCELA

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, Israel José Jara Sánchez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Israel José Jara Sánchez, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 28 de marzo de 2024



Israel José Jara Sánchez

115003141-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

El Tribunal del Trabajo Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto Técnico, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO IoT PARA MONITOREAR LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO EN LOS TANQUES DE HUILLIS Y GUANANDO**”, realizado por el señor: **ISRAEL JOSÉ JARA SÁNCHEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Paúl Romero Riera; PhD
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



2024-03-28

Ing. Alberto Arellano Aucancela
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



2024-03-28

Ing. Patricio Adolfo Romero
ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



2024-03-28

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a la memoria de tres personas extraordinarias que marcaron mi vida de manera indeleble: mi abuelita Rosa y mis tíos Patricio y Víctor. Aunque ya no estén básicamente conmigo, su amor, apoyo incondicional y sabias enseñanzas siguen vivas en mi corazón y en cada logro alcanzado, fueron mi faro en momentos oscuros, mi inspiración constante y motivación para seguir mis sueños y convertirme en un profesional como siempre lo anhelaron, les dedico este logro como un humilde tributo a su legado. A mi familia, fuente inagotable de amor y apoyo, en especial a mi madre Fanny, cuyo respaldo incondicional ha sido mi soporte en los momentos más difíciles, a mi hijo Samuel, mi mayor motor y razón para superar los obstáculos y seguir adelante con determinación, a mi pareja Stefanía por su incansable cuidado de nuestro hijo mientras me esforzaba por alcanzar mis metas académicas. A mi hermana Priscila cuya compañía ha sido un bálsamo en mi camino y a mi prima Mónica, quien más que una prima, ha sido una segunda madre para mí, brindándome amor, apoyo y orientación en cada etapa de mi vida. Y no puedo olvidar mencionar a mis amigos Erik y Paola, quienes compartieron conmigo esta travesía académica, su amistad sincera y su apoyo inquebrantable fueron un pilar fundamental en mi camino hacia el éxito.

Israel

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento a aquellas personas e instituciones que hicieron posible la culminación de este importante capítulo en mi vida académica. En primer lugar, agradecer a mi prima Daisy, tío Pedro y tía Bacha por facilitarme las prestaciones económicas, sin su apoyo no habría sido posible continuar con mis estudios, su constante respaldo fue fundamental para seguir adelante en este camino hacia la titulación. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de formarme académicamente, durante mi trayectoria en esta institución enfrenté numerosos desafíos que me enseñaron la importancia de la persistencia en la consecución de mis metas. Quiero extender también mi reconocimiento y gratitud a mi tutor, el ingeniero Alberto Arellano, por su confianza en mis capacidades académicas y por su orientación durante el desarrollo de este trabajo de titulación. Así mismo, agradezco al ingeniero Patricio Romero por su valioso seguimiento y aportes en su área de especialización, los cuales fueron fundamentales para optimizar el proceso de investigación y desarrollo del proyecto.

Israel

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xx
RESUMEN.....	xxi
SUMMARY / ABSTRACT.....	xxii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.1.1 Antecedentes.....	3
1.1.2 Formulación del problema.....	4
1.1.2.1 Sistematización del Problema.....	4
1.2 Justificación.....	5
1.2.1 Justificación teórica.....	5
1.2.2 Justificación aplicada.....	6
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo General.....	7
1.3.2 Objetivos Específicos.....	7

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Agua para consumo humano.....	9
2.1.1 Características básicas del agua para consumo humano.....	9
2.1.2 Características físicas del agua para consumo humano.....	10

2.1.3	<i>Tipos de fuentes naturales de agua</i>	11
2.1.3.1	<i>Fuentes subterráneas</i>	11
2.1.3.2	<i>Fuentes superficiales</i>	11
2.2	Internet de las Cosas (IoT)	12
2.2.1	Arquitectura	12
2.2.1.1	Arquitectura IoT de 3 capas	12
2.2.1.2	Arquitectura IoT de 4 capas	13
2.2.2	Gestión y análisis de datos	14
2.2.2.1	Cloud Computing	14
2.2.2.2	Fog Computing	16
2.3	Tecnologías de comunicación de largo alcance LPWAN	18
2.3.1	LoRa	19
2.3.1.1	Modulación LoRa	21
2.3.2	Sigfox	23
2.3.2.1	Infraestructura, descripción y aplicación de tecnología Sigfox	24
2.3.3	NB-IoT	25
2.3.3.1	Arquitectura NB-IoT	26
2.3.4	LTE-M	27
2.4	Protocolos de comunicación	29
2.4.1	Protocolos de comunicación para la capa de enlace físico y local	30
2.4.1.1	WiFi (IEEE 802.11)	30
2.4.1.2	LoRaWAN	31
2.4.1.3	LTE	31
2.4.2	Protocolos de comunicación para la capa de red y transporte	32
2.4.2.1	IPv4	33
2.4.2.2	IPv6	33
2.4.2.3	UDP (User Datagram Protocol)	33
2.4.2.4	TCP (Transmission Control Protocol)	34
2.4.3	Protocolos de comunicación para la capa de aplicación	35

2.4.3.1	<i>CoAP (Constrained Application Protocol)</i>	37
2.4.3.2	<i>AMQP (Advanced Message Queuing Protocol)</i>	39
2.4.3.3	<i>MQTT (MQ Telemetry Transport)</i>	41
2.4.3.4	<i>Websocket</i>	44

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	46
3.1	Estudio del lugar de implementación	46
3.1.1	<i>Estudio de la geografía desde el tanque de Guanando hasta el GAD de Guanando</i> ..	48
3.1.2	<i>Estudio de la geografía desde el tanque de Huillis hasta cabecera de Cahujá Bajo</i> .	49
3.2	Análisis de los requerimientos para el sistema de monitoreo IoT	50
3.3	Análisis comparativo de tecnologías de comunicación LPWAN	51
3.4	Selección de protocolos de comunicación IoT	55
3.4.1	<i>Protocolo de comunicación para la capa de enlace local</i>	55
3.4.2	<i>Protocolo de comunicación para la capa de red y transporte</i>	56
3.4.3	<i>Protocolo de comunicación para la capa de aplicación</i>	57
3.5	Selección de software y hardware para la implementación del sistema IoT	57
3.5.1	<i>Software y hardware para la capa de percepción</i>	58
3.5.1.1	<i>Arduino Nano v3</i>	58
3.5.1.2	<i>Sensor de potencial de hidrógeno (pH)</i>	59
3.5.1.3	<i>Sensor de turbidez</i>	60
3.5.1.4	<i>Sensor de solidos disueltos totales (TDS)</i>	61
3.5.1.5	<i>Sensor de temperatura</i>	62
3.5.1.6	<i>Sensor de distancia</i>	63
3.5.1.7	<i>Arduino IDE</i>	64
3.5.2	<i>Software y hardware para la capa de red</i>	65
3.5.2.1	<i>Módulos LoRa</i>	66
3.5.2.2	<i>Tarjeta de desarrollo ESP32</i>	68

3.5.2.3	<i>HiveMQ</i>	68
3.5.3	Software y hardware para la capa de aplicación	69
3.5.3.1	<i>CPU Intel Core i3 4GB RAM</i>	69
3.5.3.2	<i>Node-RED</i>	69
3.5.3.3	<i>Ngrok</i>	71
3.6	Diagramas del diseño de conexión	71
3.6.1	<i>Esquema de conexión de alimentación del nodo maestro</i>	71
3.6.2	<i>Esquema de conexión de ESP32 con indicadores y módulo LoRa del nodo maestro</i> . 72	
3.6.2.1	<i>Esquema de conexión de indicadores en ESP32 del nodo maestro</i>	73
3.6.2.2	<i>Esquema de conexión de módulo LoRa en ESP32 del nodo maestro</i>	74
3.6.3	<i>Esquema de conexión de alimentación del nodo esclavo</i>	75
3.6.4	<i>Esquema de conexión del microcontrolador Arduino Nano con indicadores, sensores y módulo LoRa del nodo esclavo</i>	75
3.6.4.1	<i>Esquema de conexión de indicadores en Arduino Nano del nodo esclavo</i>	76
3.6.4.2	<i>Esquema de conexión de sensores en Arduino nano para nodo esclavo</i>	77
3.6.4.3	<i>Esquema de conexión de módulo LoRa en Arduino nano para nodo esclavo</i>	78
3.6.5	<i>Esquema de placa PCB y modelado 3D para nodo maestro</i>	78
3.6.6	<i>Esquema de placa PCB y modelado 3D para nodo esclavo</i>	80
3.7	Estructura y diseño de programación en Node-RED	81
3.8	Diagramas de flujo para el sistema de monitoreo IoT	86
3.8.1	<i>Diagrama de flujo para nodo esclavo</i>	86
3.8.2	<i>Diagrama de flujo para nodo master, broker MQTT y servidor Node-RED</i>	87
3.9	Construcción del prototipo IoT	88
3.9.1	<i>Construcción del nodo maestro</i>	88
3.9.2	<i>Construcción del nodo esclavo</i>	89
3.9.3	<i>Construcción de sistema para ubicación de sensores</i>	90

CAPÍTULO IV

4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	92
----	------------------------------------------------------	----

4.1	Implementación del sistema de monitoreo IoT	92
4.1.1	<i>Implementación del sistema 1 (Guanando).....</i>	92
4.1.2	<i>Implementación del sistema 2 (Huillis)</i>	94
4.2	Resultado de datos en Node-RED	96
4.3	Resultado de túnel en Ngrok	100
4.4	Resultado de notificaciones vía Telegram	102
4.5	Resultados de generación de reportes	103
4.6	Pruebas de funcionamiento de los sistemas	104
4.6.1	<i>Funcionamiento de los sensores</i>	104
4.6.1.1	<i>Calibración de sensor de pH (PH-4502C con electrodo E201-BCN).....</i>	104
4.6.1.2	<i>Calibración de sensor de TDS (KS0429)</i>	107
4.6.1.3	<i>Calibración de sensor de Turbidez (KS0414)</i>	107
4.6.2	<i>Análisis de cobertura de los sistemas.....</i>	110
4.6.2.1	<i>Cobertura para el sistema de Guanando</i>	110
4.6.2.2	<i>Cobertura para el sistema de Huillis</i>	113
4.6.3	<i>Análisis de latencia de los sistemas</i>	116
4.6.3.1	<i>Latencia del sistema para Guanando</i>	116
4.6.3.2	<i>Latencia del sistema para Huillis</i>	117
4.6.3.3	<i>Latencia de túnel Ngrok</i>	118
4.6.4	<i>Análisis de tasa de transmisión de los sistemas.....</i>	119
4.6.5	<i>Análisis de consumo de energía de los sistemas.....</i>	120
4.7	Resultados obtenidos del sistema de monitoreo IoT	122
4.7.1	<i>Resultados promedio del sistema de monitoreo IoT (desde el 20 de enero al 28 de enero del 2024).....</i>	135
4.7.2	<i>Cálculo de la varianza de los resultados del sistema de monitoreo IoT (desde el 20 de enero al 28 de enero del 2024)</i>	137
4.8	Análisis económico del sistema.....	140

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	142
5.1	Conclusiones	142
5.2	Recomendaciones	144

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Nivel de TDS ideal para el agua en ppm.....	11
Tabla 2-2: Ventajas e inconvenientes de Fog Computing	17
Tabla 2-3: Características principales del estándar LPWAN.....	18
Tabla 2-4: Versiones del estándar IEEE 802.11 (WiFi)	30
Tabla 3-1: Medidas de los tanques de agua ubicados en los sectores de Huillis y Guanando ...	46
Tabla 3-2: Comparativa entre tecnologías de comunicación LPWAN para la capa de enlace físico	51
Tabla 3-3: Niveles de calificación	53
Tabla 3-4: Calificación de factores para tecnologías LPWAN.....	53
Tabla 3-5: Grado de importancia de los factores para tecnologías LPWAN	54
Tabla 3-6: Calificación cuantitativa de los factores para redes LPWAN	54
Tabla 3-7: Relación de valores cuantitativos con el peso de factores para tecnologías LPWAN	55
Tabla 3-8: Características técnicas del protocolo de comunicación WiFi	56
Tabla 3-9: Características técnicas de los protocolos de comunicación IPv4 y TCP	56
Tabla 3-10: Características técnicas del protocolo de comunicación MQTT	57
Tabla 3-11: Características técnicas de Arduino Nano v3	58
Tabla 3-12: Característica técnicas del sensor de pH (PH-4502C).....	59
Tabla 3-13: Características técnicas del sensor de turbidez (KS0414).....	60
Tabla 3-14: Características técnicas del sensor de turbidez KS0414.....	61
Tabla 3-15: Características técnicas del sensor de temperatura DS18B20	62
Tabla 3-16: Características técnicas del sensor de distancia HC-SR04.....	63
Tabla 3-17: Características técnicas de módulo LoRa RYLR998	66
Tabla 3-18: Características técnicas de módulo LoRa RYLR993	67
Tabla 4-1: Latencia nodo esclavo 1 y maestro 1.....	116
Tabla 4-2: Latencia nodo esclavo 1 - servidor Node-RED	117
Tabla 4-3: Latencia nodo esclavo 2 y maestro 2.....	118
Tabla 4-4: Latencia nodo esclavo 2 - servidor Node-RED	118
Tabla 4-5: Latencia de túnel Ngrok para distintos navegadores	119
Tabla 4-6: Número de paquetes mínimos y máximos de los sistemas en la comunicación.....	119
Tabla 4-7: Tasa de transmisión mínimo y máximo de ambos sistemas	120
Tabla 4-8: Consumo de energía para sistema de Guanando	121
Tabla 4-9: Consumo de energía para sistema de Huillis.....	122

Tabla 4-10: Análisis de la varianza y desviación típica diaria de ambos sistemas para TDS..	137
Tabla 4-11: Análisis de la varianza y desviación típica total de ambos sistemas para TDS....	138
Tabla 4-12: Análisis de la varianza y desviación típica diaria de ambos sistemas para pH	138
Tabla 4-13: Análisis de la varianza y desviación típica total de ambos sistemas para pH	139
Tabla 4-14: Análisis de la varianza y desviación típica diaria de ambos sistemas para Turbidez	139
Tabla 4-15: Análisis de la varianza y desviación típica total de ambos sistemas para Turbidez	140
Tabla 4-16: Detalle económico para construcción de prototipo para el sistema de monitoreo	140

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Etapas de la implementación	7
Ilustración 2-1: Alcalinidad del PH.....	10
Ilustración 2-2: Arquitectura IoT de 3 capas.....	13
Ilustración 2-3: Arquitectura IoT de 4 capas.....	14
Ilustración 2-4: Cloud Computing.....	15
Ilustración 2-5: Modelo de servicios que ofrece Cloud Computing.....	16
Ilustración 2-6: Fog Computing	17
Ilustración 2-7: Bandas de frecuencia para uso de tecnología LPWAN en cada	19
Ilustración 2-8: Logo de tecnología LoRa.....	19
Ilustración 2-9: LoRa / LoRaWAN	20
Ilustración 2-10: Modulación LoRa (CSS)	21
Ilustración 2-11: Características generales de la modulación LoRa.....	22
Ilustración 2-12: Formato convencional de modulación LoRa	22
Ilustración 2-13: Factores de dispersión LoRa.....	23
Ilustración 2-14: Logo tecnología Sigfox.....	23
Ilustración 2-15: Infraestructura Sigfox	24
Ilustración 2-16: Logo tecnología NB-IoT.....	25
Ilustración 2-17: Arquitectura de red NB-IoT.....	27
Ilustración 2-18: Logo tecnología LTE-M.....	27
Ilustración 2-19: Mapa de cobertura a nivel mundial para las tecnologías de LTE-M y NB-IoT	29
Ilustración 2-20: Protocolos de comunicación, modelo OSI.....	29
Ilustración 2-21: Modelo Cliente – Servidor.....	36
Ilustración 2-22: Modelo Publicación – Suscripción	36
Ilustración 2-23: Arquitectura CoAP	37
Ilustración 2-24: Comparativa de las capas utilizadas en CoAP y HTTP	38
Ilustración 2-25: Diagrama de arquitectura de AMQP.....	39
Ilustración 2-26: Diagrama entidades AMQP	40
Ilustración 2-27: Funcionamiento protocolo MQTT	41
Ilustración 2-28: Niveles de calidad de servicio (QoS) para MQTT.....	42
Ilustración 2-29: Trama para mensaje del protocolo MQTT.....	43
Ilustración 2-30: Protocolo WebSocket vs HTTP.....	45
Ilustración 3-1: Ubicación de los tanques en los sectores de Huillis y Guanando	47

Ilustración 3-2: Trayectoria de transmisión desde tanque de Guanando hasta GAD Guanando	48
Ilustración 3-3: Análisis de trayectoria de comunicación desde tanque de Guanando hasta GAD Guanando en Google Earth.....	49
Ilustración 3-4: Trayectoria transmisión desde tanque de Huillis hasta cabecera de Cahujá Bajo	49
Ilustración 3-5: Análisis de trayectoria de comunicación desde tanque principal de Huillis hasta cabecera parroquial de Cahujá Bajo en Google Earth	50
Ilustración 3-6: Arduino Nano v3	58
Ilustración 3-7: Sensor de pH (PH-4502C)	59
Ilustración 3-8: Sensor de Turbidez (KS0414).....	60
Ilustración 3-9: Sensor de TDS (KS0429)	61
Ilustración 3-10: Sensor de temperatura DS18B20.....	62
Ilustración 3-11: Sensor de distancia HC-SR04.....	63
Ilustración 3-12: Software Arduino IDE	64
Ilustración 3-13: Módulo LoRa REYAX RYLR998.....	66
Ilustración 3-14: Módulo LoRa REYAX RYLR993.....	67
Ilustración 3-15: Tarjeta de desarrollo ESP32 de 38 pines	68
Ilustración 3-16: Servidor de MQTT HiveMQ	69
Ilustración 3-17: Interfaz de Node-RED	70
Ilustración 3-18: Convertidor de voltaje DC-DC Step-Down MP1584	71
Ilustración 3-19: Esquema del bloque de alimentación del nodo maestro	72
Ilustración 3-20: Esquema del bloque de microcontrolador ESP32.....	73
Ilustración 3-21: Esquema de conexión de indicadores en ESP32 nodo maestro	74
Ilustración 3-22: Esquema de conexión de módulo LoRa en ESP32	74
Ilustración 3-23: Esquema del bloque de alimentación del nodo esclavo	75
Ilustración 3-24: Módulo conversor Analógico Digital ADS1115	75
Ilustración 3-25: Esquema del bloque de microcontrolador Arduino Nano.....	76
Ilustración 3-26: Esquema de conexión de indicadores en Arduino nano para nodo esclavo...	77
Ilustración 3-27: Esquema de conexión de sensores en Arduino nano para nodo esclavo.....	77
Ilustración 3-28: Esquema de conexión de módulo	78
Ilustración 3-29: Esquema de placa PCB para nodo maestro.....	79
Ilustración 3-30: Diseño de placa PCB en 3D del nodo maestro	79
Ilustración 3-31: Esquema de placa PCB para nodo esclavo	80
Ilustración 3-32: Diseño de placa PCB en 3D del nodo esclavo.....	80
Ilustración 3-33: Flows de sistema de monitoreo IoT en Node-RED	81

Ilustración 3-34: Bloque de programación para configuración de nodos.....	81
Ilustración 3-35: Bloque de programación para recibir paquetes de datos MQTT	82
Ilustración 3-36: Bloque de programación para nodos en mapa	82
Ilustración 3-37: Bloque de programación para manejo de base de datos	83
Ilustración 3-38: Bloque de programación para las gráficas y widgets.....	83
Ilustración 3-39: Bloque de programación para la generación de reportes	84
Ilustración 3-40: Bloque de programación para notificación de alertas en Telegram.....	84
Ilustración 3-41: Bloque de programación para el Login.....	85
Ilustración 3-42: Bloque de programación para el Login – Tiempo de sesión.....	85
Ilustración 3-43: Diagrama de flujo de funcionamiento del nodo censador o nodo esclavo.....	86
Ilustración 3-44: Diagrama de flujo de funcionamiento de nodo master, broker MQTT y procesamiento de la información en servidor Node-RED.....	87
Ilustración 3-45: Construcción del nodo maestro.....	88
Ilustración 3-46: Construcción nodo esclavo 1	89
Ilustración 3-47: Construcción nodo esclavo 2	90
Ilustración 3-48: Construcción de sistema para ubicación de sensores.....	91
Ilustración 4-1: Implementación del nodo esclavo 1.....	93
Ilustración 4-2: Incorporación de sistema flotante que contiene los sensores para nodo esclavo 1	93
Ilustración 4-3: Implementación de nodo maestro 1	94
Ilustración 4-4: Implementación de nodo esclavo 2.....	95
Ilustración 4-5: Incorporación de sistema flotante que contiene los sensores para nodo esclavo 2	95
Ilustración 4-6: Implementación nodo maestro 2.....	96
Ilustración 4-7: Inicio de sesión sistema Dashboard Node-RED	96
Ilustración 4-8: Configuración de enlace Dashboard Node-RED	97
Ilustración 4-9: Visualización de datos de sensores en Dashboard Node-RED	98
Ilustración 4-10: Visualización de datos de sensores en Dashboard Node-RED	98
Ilustración 4-11: Visualización de registro de datos en Dashboard Node-RED	99
Ilustración 4-12: Visualización de reportes en Dashboard Node-RED.....	99
Ilustración 4-13: Visualización de reportes en Dashboard Node-RED.....	100
Ilustración 4-14: Enlace URL generado por Nodo de ngrok en Node-RED	100
Ilustración 4-15: Ingreso a enlace URL de Ngrok.....	101
Ilustración 4-16: Inicio de sesión del sistema a través del enlace de Ngrok	101
Ilustración 4-17: Ingreso al Dashboard del sistema de monitoreo a través del enlace de Ngrok	102

Ilustración 4-18: Notificaciones del sistema de monitoreo IoT vía Telegram	103
Ilustración 4-19: Reporte de “DATOS” del monitoreo del sistema generado en Excel.....	103
Ilustración 4-20: Reporte de “RESULTADOS” del monitoreo del sistema generado en Excel	104
Ilustración 4-21: Calibración de voltaje de la tarjeta acondicionadora de pH.....	105
Ilustración 4-22: Soluciones disolventes de pH	105
Ilustración 4-23: Calibración de pH 4	106
Ilustración 4-24: Calibración de pH 7	106
Ilustración 4-25: Calibración de pH 10.01	107
Ilustración 4-26: Curva característica de relación entre la turbidez y la tensión media	108
Ilustración 4-27: Calibración de tarjeta de adaptación para sensor de turbidez	108
Ilustración 4-28: Prueba de sensor de turbidez en agua pura	109
Ilustración 4-29: Prueba de sensor en agua con poca turbidez.....	109
Ilustración 4-30: Prueba de sensor en agua con alta turbidez	109
Ilustración 4-31: Llenado de las características de operación de la antena LoRa RYLR998..	110
Ilustración 4-32: Enlace de radio LoRa con antena RYLR998 para Guanando.....	111
Ilustración 4-33: Mapa de cobertura antena LoRa RYLR998 para Guanando	111
Ilustración 4-34: Prueba de cobertura de módulos LoRa RYLR998 en Guanando	112
Ilustración 4-35: Datos de comunicación entre nodo maestro 1 y nodo esclavo 1.....	112
Ilustración 4-36: Llenado de las características de operación de la antena LoRa RYLR993..	113
Ilustración 4-37: Enlace de radio LoRa con antena RYLR993 para Huillis	114
Ilustración 4-38: Mapa de cobertura antena LoRa RYLR993 para Huillis.....	114
Ilustración 4-39: Prueba de cobertura de módulos LoRa RYLR993 en Huillis.....	115
Ilustración 4-40: Datos de comunicación entre nodo maestro 2 y nodo esclavo 2.....	115
Ilustración 4-41: Reporte de ping de nodo esclavo a nodo maestro.....	116
Ilustración 4-42: ping publicación-suscripción al broker MQTT desde Node-RED.....	117
Ilustración 4-43: Test de velocidad de internet para el servidor.....	118
Ilustración 4-44: Inspector de Ngrok.....	119
Ilustración 4-45: Sensor de corriente ACS172.....	121
Ilustración 4-46: Reporte de censado con valores de consumo de energía	121
Ilustración 4-47: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 20/01/2024	123
Ilustración 4-48: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 20/01/2024.....	124
Ilustración 4-49: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 20/01/2024.....	124
Ilustración 4-50: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 21/01/2024.....	125
Ilustración 4-51: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 21/01/2024.....	125
Ilustración 4-52: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 21/01/2024.....	126

Ilustración 4-53: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 22/01/2024	126
Ilustración 4-54: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 22/01/2024.....	127
Ilustración 4-55: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 22/01/2024.....	127
Ilustración 4-56: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 23/01/2024	128
Ilustración 4-57: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 23/01/2024.....	128
Ilustración 4-58: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 23/01/2024.....	129
Ilustración 4-59: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 24/01/2024	129
Ilustración 4-60: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 24/01/2024.....	130
Ilustración 4-61: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 24/01/2024.....	130
Ilustración 4-62: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 25/01/2024	131
Ilustración 4-63: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 25/01/2024.....	131
Ilustración 4-64: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 25/01/2024.....	132
Ilustración 4-65: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 27/01/2024	132
Ilustración 4-66: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 27/01/2024.....	133
Ilustración 4-67: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 27/01/2024.....	133
Ilustración 4-68: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 28/01/2024	134
Ilustración 4-69: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 28/01/2024.....	134
Ilustración 4-70: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 28/01/2024.....	135
Ilustración 4-71: Resultados promedio de TDS por día, desde el 20 al 28 de enero 2024.....	135
Ilustración 4-72: Resultados promedio de pH por día, desde el 20 al 28 de enero 2024	136
Ilustración 4-73: Resultados promedio de Turbidez por día, desde el 20 al 28 de enero 2024	136

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: DATASHEET LORA RYLR998

ANEXO B: DATASHEET LORA RYLR993

ANEXO C: REPORTES EN DASHBOARD

ANEXO D: BASE DE DATOS PHPMYADMIN

RESUMEN

El sistema de captación de agua ubicado en Huillis y el de distribución ubicado en Guanando no cuentan con un control y evaluación de las características físicas del agua para consumo humano, razón por la cual se realiza limpieza de los tanques únicamente cuando se nota turbidez en el agua, por tanto, el objetivo del presente proyecto técnico fue realizar el “Diseño e implementación de un prototipo IoT para monitorear las características físicas del agua de consumo humano en los tanques de Huillis y Guanando”. El proyecto técnico sigue la siguiente secuencia: analizar el lugar de implementación con la ejecución de pruebas de cobertura con los módulos LoRa RYLR998 y RYLR993, construcción del prototipo y calibración de los sensores para ser ubicados en los tanques de agua, los datos tomados por los sensores son enviados desde los nodos esclavo a los nodos maestro de cada sistema, dónde el nodo maestro a través de la tecnología WiFi y haciendo uso del protocolo de comunicación MQTT pública los datos censados al broker, luego desde un servidor haciendo uso de Node-RED se recuperan los datos a través de la suscripción al broker para analizar, procesar y almacenar la información que posteriormente será visualizada a través del dashboard. Mediante este proceso se logró monitorear con una comunicación a larga distancia las características físicas del agua como TDS, pH y Turbidez con diferentes tiempos de muestreo y con la obtención de reportes la evaluación de 8 días de censado validando de tal manera la eficacia y funcionamiento del prototipo. En ese contexto se concluye que el prototipo funciona y ayuda a tener un monitoreo en tiempo real y de manera remota de las características físicas del agua contenida en los tanques permitiendo tomar acciones preventivas para brindar una mejor calidad de agua para consumo humano.

Palabras clave: <INTERNET DE LAS COSAS (IOT)>, <LORA>, <TOTAL DE SÓLIDOS DISUELTOS (TDS)>, <POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)>, <TURBIDEZ>, <TRANSPORTE DE TELEMETRÍA DE COLAS DE MENSAJES (MQTT)>, <NODE-RED>.

0344-DBRA-UPT-2024



SUMMARY

The water collection system located in Huillis and the distribution system in Guanando lack oversight and assessment of the physical attributes of water for human consumption. Consequently, tank cleaning is initiated exclusively upon the detection of water turbidity. Therefore, the objective of this technical project was to design and implement an IoT prototype to monitor the physical characteristics of water for human consumption in the tanks of Huillis and Guanando. The technical project follows the following sequence: analyzing the implementation site with coverage tests using LoRa modules RYLR998 and RYLR993, prototype construction, and calibration of sensors to be placed in the water tanks. The data collected by the sensors are sent from slave nodes to master nodes of each system, where the master node publishes the sensed data to the broker using WiFi technology and the MQTT communication protocol. Then, data is retrieved from the broker via subscription using Node-RED on a server to analyze, process, and store the information, visualized through a dashboard. Through this process, it was feasible to monitor the physical attributes of water, encompassing Total Dissolved Solids (TDS), pH levels, and turbidity, employing various sampling intervals and acquiring reports for an 8-day assessment of sensing, thereby confirming the effectiveness and operability of the prototype. In this context, it concluded that the prototype functions and facilitates real-time and remote monitoring of the physical characteristics of water contained in the tanks, allowing for preventive actions to provide better quality water for human consumption.

Keywords: <INTERNET OF THINGS (IOT) >, <LORA>, <TOTAL DISSOLVED SOLIDS (TDS) >, <PH>, <TURBIDITY>, MESSAGE QUEUE TELEMETRY TRANSPORT (MQTT) >, <NODE-RED>.



Lic. Maritza Larrea Mg.

0603370784

INTRODUCCIÓN

El agua es trascendental para muchas funciones que debe cumplir nuestro cuerpo y se encuentra presente en nuestro entorno, es importante que las personas se encuentren bien hidratadas siendo esto fundamental para mantenernos saludables, el agua cumple funciones muy importantes: Permite el transporte de nutrientes a las células, colabora el progreso digestivo, en la respiración y en la circulación sanguínea, interviene en la contracción de los músculos y da flexibilidad y elasticidad a los tejidos, participa en el buen funcionamiento del cerebro y de los nervios, entre otros. El consumir agua que no ha sido tratada correctamente está relacionada con la transmisión de enfermedades como: el cólera, diarreas, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. (OMS, 2022)

La parroquia de Guanando tiene una población de mil doscientos habitantes, dicha población hace uso de fuentes como río o vertiente para abastecerse de agua para consumo humano, la Junta Administrativa de Agua de Consumo Humano Chazo Bajo, Guanando, La providencia de Huillis es la encargada de abastecer a toda esta población de agua a través de una red de tanques reservorios que facilitan la distribución por cada uno de los sectores que componen la parroquia a través de tuberías, esta red se inicia en Los Huillis (Cahuají Bajo) y pasa por Chazo Bajo, Guanando para terminar finalmente su recorrido en La Providencia beneficiando a las comunidades de Cahuají Bajo, Guzo Grande, Barrios San Antonio, San José, Copatillo, San Lorenzo, Guzo Chico, Huillis, Trigoloma, El Shuyo y el Arrayan, no obstante el agua que llega hasta cada uno de los hogares no tiene ningún control y solo se realizan limpiezas en los tanques eventualmente lo que facilita la contaminación del agua. (GAD Guanando, 2023)

Es importante que el agua proporcionada a una población sea gestionada de forma correcta para no exponerlos a riesgos de salud, garantizando el mejoramiento de la calidad de vida, siendo esta una de las prioridades máximas en la atención de las comunidades las cuales se encuentran en situaciones de calamidad y subdesarrollo. Por lo cual, el brindar una solución de un sistema IoT para monitorear y determinar las características físicas del agua de consumo humano se considera como un beneficio inmediato a la población, mejorando las condiciones de salubridad y mejorando las posibilidades de desarrollo humano.

La aplicación de un sistema IoT nos permite hacer uso de diferentes conjuntos de tecnologías interconectadas, tiene el entendimiento para procesar la información y compartirla mediante un Dashborard/ Portal Web, este tipo de sistemas cumple los requerimientos de precisión, seguridad, eficiencia en cuanto a costos e interoperabilidad, además IoT logra unir la infraestructura física y el mundo digital. Una de las características importantes de IoT es que debe garantizar la escalabilidad, es decir, nos permitirá manejar el crecimiento continuo de trabajo de manera fluida

sin perder la calidad del servicio, por ejemplo, si existe una cantidad de diez tanques de agua e inicialmente se implementa el sistema en dos tanques, gracias a la escalabilidad que ofrece IoT posteriormente se puede ir implementando para el resto de los tanques sin perder la calidad del servicio. (CHAKRAY, 2023)

La implementación del sistema IoT para monitorear y determinar las características físicas del agua de consumo humano en los tanques ubicados en los sectores de Huillis y Guanando no solo ayudará a tomar acciones preventivas, también permitirá resguardar la salud humana, debido a que el consumo de agua y la salud humana se encuentran estrechamente relacionadas, reduciendo así la posibilidad de enfermedades transmitidas por el consumo de agua contaminada y brindando una buena calidad de vida.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

En el capítulo I se presentan los antecedentes, planteamiento del problema y la justificación que fundamentan el trabajo de titulación, en el mismo se detallan los diferentes trabajos que tienen un impacto relativo al tema de titulación.

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Antecedentes

IoT Monitor – WQ es una plataforma IoT que utiliza microcontroladores para la monitorización remota de la calidad del agua haciendo el seguimiento de variables como el pH, conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto para abordar eficazmente los desafíos de la caracterización del agua para consumo humano en lugares remotos utilizando sensores de precisión y haciendo uso de la tecnología de Lora para la transmisión de los datos. (IoTMonitor-WQ: A Remote Water-Quality Monitoring IoT Platform, 2023)

Halim Falthoni en el año de 2021 en Taiwán diseñó un sistema de supervisión de la calidad del agua en el lago Tunghai mediante el uso de tecnologías IoT y LoRaWAN, el sistema consiste en la recolección de datos como pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura haciendo uso de sensores adecuados para la calidad del agua ayudando a otros investigadores de la Universidad de Tunghai a analizar el proceso de tratamiento de aguas residuales antes de la liberación hacia el medio ambiente. (Falthoni, y otros, 2020)

En la Universidad de Málaga, ubicada en España, Christian Martos desarrolló un sistema portátil para la monitorización de la calidad del agua, el sistema consta de un conjunto de componentes que incluye un sistema Arduino equipado con un conjunto de módulos diseñados para medir la turbidez, pH y la temperatura del agua, empleando el uso de una App móvil Android que realiza el trabajo de un Gateway como especie de intermediario para enviar los datos y poder ser recopilados en un servicio de la nube para posteriormente procesar los datos y obtener los resultados de la misma a través de una aplicación web, permitiendo a los usuarios tener la capacidad de acceder y visualizar los datos de manera colaborativa de todas las mediciones realizadas. (Martos Reyes, 2021)

En la Universidad de Catalunya, ubicada en Barcelona, Rubén Adrián de la Cámara diseñó un sistema de monitorización remota para un depósito de agua mediante LoRa, el mismo que permite monitorizar, automatizar procesos y transmitir datos de recolectados de un depósito de agua para consumo humano, mismos que son típicos en las pequeñas poblaciones, facilitando el control periódico de pH sobre el agua que se consume sin necesidad de recurrir a las instalaciones sino de una manera remota. Para la implantación se hace uso de la tecnología LoRa sumado al entorno Arduino para poder obtener los datos de manera remota, haciendo uso de la plataforma TTN se suben los datos para ser procesados y al mismo tiempo se añade una comunicación GSM/GPRS para enviar mensajes de alerta dando lugar a un sistema completo. (DE LA CÁMARA, 2019)

En la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), ubicada en Ecuador, Lisbeth Guevara y Henry Suintaxi desarrollaron un sistema llamado WaterAlert para el monitoreo del agua basado en el paradigma del internet de las cosas (IoT) y tecnología de comunicación inalámbrica, el mismo que permite determinar la calidad del agua dulce que se consume en las zonas rurales. Asimismo, aplican el uso de la metodología SCRUM para el desarrollo del prototipo ya que permite un trabajo colaborativo, el sistema permite generar alertas cuando el agua no cumple con los parámetros de calidad del agua dulce según lo establece la OMS. (GUEVARA JIMÉNEZ, 2021)

1.1.2 Formulación del problema

La implementación de un prototipo IoT para la determinación de las características físicas del agua de consumo humano se lo llevará a cabo en el tanque de captación (principal) ubicado en el sector denominado Huillis y en el tanque de distribución de la parroquia de Guanando, lugares que se cuenta con los permisos pertinentes por parte de la Junta de Agua de consumo humano Chazo Bajo y el GADPR Guanando. En el trayecto que va desde el tanque de captación hasta el tanque de distribución existen otros tanques, pero no se cuenta con las autorizaciones para intervenir en los mismos, debido a que requiere de un conjunto de permisos que le compete a cada una de las comunidades, por tanto, se interviene únicamente en ambos tanques autorizados por los entes locales.

1.1.2.1 Sistematización del Problema

¿Cuáles son las características que se pueden determinar bajo las condiciones físicas de los tanques que abastecen agua para consumo humano en los tanques de Huillis y Guanando?

¿Qué tecnologías y sensores se pueden utilizar en la implementación de sistemas IoT para monitorear y determinar las características del agua de consumo humano en los sectores Huillis y Guanando?

¿Cuáles son las condiciones de rendimiento del sistema IoT para monitorear y determinar las características físicas del agua de consumo humano en los tanques de Huillis y Guanando?

1.2 Justificación

1.2.1 Justificación teórica

En el mundo existen al menos dos mil millones de personas que hacen uso de una fuente de agua para consumo humano de las cuales en su mayoría se encuentran contaminadas por diferentes factores, dentro de uno de estos factores la contaminación microbiana representa un mayor riesgo con respecto a la salubridad y transmisión de enfermedades como la diarrea, el cólera, la disentería, fiebre tifoidea y la poliomielitis. Se calcula que a causa de estas enfermedades hay cerca de 485 000 muertes cada año. En 2020, el 74 % de la población mundial utilizaba un suministro de agua para consumo humano gestionado de manera segura. (OMS, 2022)

En 2020, Ecuador registró un total de 1 238 fuentes de agua cruda, provenientes de fuentes subterráneas (principalmente pozos y vertientes), con un 54,4% de la mayor captación por parte de los GADM, y entre las fuentes de captación superficiales se reportó un total de 565 fuentes, (principalmente quebradas y ríos), con un 45.6% de captación. A nivel nacional el 90 % de los municipios cuenta con uno o más sistemas de tratamiento del agua para consumo humano, el resto consumen el agua directamente de las fuentes que se obtiene el agua. (AME-INEC-ARCA-BDE, 2021)

En la parroquia de Guanando, el acceso de la población a los servicios básicos de la red pública misma que es entubada proveniente de las vertientes ubicadas en Los Huillis comunidad de Cahujá es de un 45,26 %, mismas que no cuentan con una protección adecuada lo que facilita la contaminación del agua representando un grave problema para la salud de sus pobladores. Al llevar a cabo un monitoreo de las características del agua de consumo humano se pueden tomar todas las acciones pertinentes en base a estos resultados. (GADPR Guanando, 2014)

Es necesario al momento de proveer agua para consumo humano cumplir con los requisitos que establece la Norma INEN 1108, el cual se refiere al análisis bacteriológico, físico y químico de

acuerdo con los métodos normalizados para el agua potable y residual. En el 2020, los GADM reportaron que el 83,3% de municipios declararon el cumplimiento de la Norma INEN 1108, al regular esta norma los GADM se enmarcan a la agenda 2023 de la ONU cumpliendo con el Objetivo 6: “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”. La población se ampara las leyes nacionales e internacionales que exigen y garantizan agua de calidad, entre las leyes nacionales se tienen: Derechos del buen vivir, Ley de aguas para el buen vivir, Ley de Gestión Ambiental y Ley Orgánica de Salud. (AME-INEC-ARCA-BDE, 2021)

El uso de un sistema IoT para monitorear y determinar las características del agua de consumo humano en los tanques de Huillis - Guanando se potencializa para llevar un control del estado del agua en tiempo real desde cualquier dispositivo que tenga acceso a internet, el sistema recolecta los datos de los sensores y son enviados a la nube para ser procesados, para posteriormente indicar mediante una interfaz gráfica los diferentes niveles de las características censadas, permitiendo tomar acciones preventivas para regular los valores del agua según como lo requiera.

Es importante que el agua proporcionada a una población sea gestionada de forma correcta para no exponerlos a riesgos de salud, garantizando el mejoramiento de la calidad de vida, siendo esta una de las prioridades máximas en la atención de las comunidades las cuales se encuentran en situaciones de calamidad y subdesarrollo. Por lo cual, el brindar una solución de un sistema IoT para monitorear y determinar las características del agua de consumo humano se considera como un beneficio inmediato a la población, mejorando las condiciones de salubridad y mejorando las posibilidades de desarrollo humano.

1.2.2 Justificación aplicativa

Se plantea la implementación un sistema IoT que permita monitorear y determinar las características físicas del agua de consumo humano en los tanques ubicados en los sectores de Huillis y Guanando mismos que se abastecen a través de una vertiente que se encuentra en la localidad de los Huillis, con la ayuda de los sensores seleccionados se logrará medir cada una de las características del agua pertinentes para el monitoreo de cada uno de los parámetros a través de una interfaz gráfica. Las ubicaciones de la red de tanques pertenecientes a la Junta de Agua de Consumo Humano Huillis – La Providencia se encuentran en su mayoría alejadas de las cabeceras comunales, por tanto, se tiene una vegetación y distancia considerable hasta un punto donde se pueda tener acceso a internet para enviar los datos del censado y ser posteriormente procesados. Para solventar la comunicación entre el nodo de censado y el gateway se precisa ocupar una

tecnología de largo alcance como lo es LoRa, que es la más usada en largas distancias por su cobertura que oscila entre 10 – 20 Km de distancia teóricos con un mínimo de consumo de energía en los nodos de censado.

El sistema IoT planteado cumple con la arquitectura: etapa de percepción (censado), etapa de red (comunicación entre nodo y gateway) y aplicación (portal web). En la capa percepción se obtendrán los datos de medición por los sensores como: potencial hidrógeno, sólidos totales disueltos y turbiedad, la información obtenida es enviada por la capa de red desde el nodo hacia el gateway y finalmente llegamos a la capa de aplicación donde vamos a procesar la información para establecer parámetros del monitoreo de todas las variables, almacenamiento de los datos de censado haciendo uso de bases de datos y posteriormente realizar el envío de toda la información procesada para ser presentada mediante un portal web para el monitoreo de las características físicas del agua en tiempo real, en la Ilustración 1-1 se detallan las etapas de la implementación.

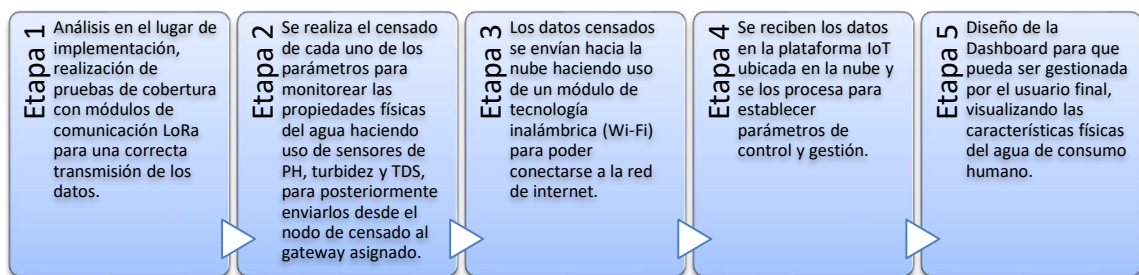


Ilustración 1-1: Etapas de la implementación

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General*

Diseño e implementación de un prototipo IoT para monitorear las características físicas del agua de consumo humano en los tanques de Huillis y Guanando

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Determinar qué características físicas del agua de consumo humano se pueden monitorear en los tanques ubicados en Huillis y Guanando.
- Analizar los diferentes tipos de tecnologías y sensores para monitorear y determinar las características físicas del agua de consumo humano en los tanques de Huillis y Guanando

haciendo uso de las variables de pH, TDS y turbidez, así como la transmisión y almacenamiento de la información a ser procesada.

- Diseñar un sistema IoT para monitorear y determinar las características físicas del agua de consumo humano.
- Implementar un sistema IoT para monitorear y determinar las características físicas del agua de consumo humano en los tanques de Huillis y Guanando.
- Evaluar la comunicación del prototipo IoT implementado en los tanques de Huillis y Guanando mediante parámetros, como cobertura, latencia de comunicación, tasa de transmisión y consumo de energía, además mediante el procesamiento de las variables transmitidas, como pH, TDS y turbiedad determinar las características físicas del agua de consumo humano.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el desarrollo de la investigación teórica que aborda los conceptos y características principales como las características físicas del agua para consumo humano, internet de las cosas, tecnologías de comunicación de largo alcance, protocolos de comunicación, tarjetas de desarrollo, plataformas para servicios IoT y herramientas para el desarrollo de dashboard.

2.1 Agua para consumo humano

El agua segura para el consumo humano presenta diversos propósitos, incluyendo beber, cocinar, preparación de alimentos, actividades de higiene personal y usos comunes del hogar. Uno de los principales criterios para calificar el agua como apta para el consumo humano es que esté libre de impurezas, sea saludable y carezca de microorganismos o parásitos que pueden representar un riesgo para la salud de las personas. Existen ciertas cualidades o atributos básicos que permiten determinar de manera evidente si el agua es adecuada para el consumo humano, los cuales incluyen aspectos como su apariencia, olor y sabor. (Alcora, 2023)

2.1.1 *Características básicas del agua para consumo humano*

- **El color:** es uno de los primeros parámetros que los humanos analizamos para determinar si el agua puede ser usada domésticamente, siempre y cuando ésta sea incolora, si se presentara cierto color o sale turbia se sabe que existe la presencia de sustancias contaminantes por tanto disminuye su calidad.
- **El olor:** el olor del agua debe ser inodora para considerarla apta para el consumo humano, el olor ayuda a determinar si ha estado en contacto con productos químicos, bacterias o materia orgánica.
- **El sabor:** es utilizado para determinar la calidad del agua y su pureza, si el agua presenta un cierto sabor desagradable ya se la considera de mala calidad, esto generalmente ocurre por la presencia de algas o bacterias y sólidos disueltos.

2.1.2 Características físicas del agua para consumo humano

Potencial Hidrógeno (pH)

El pH mide el nivel de acidez o la alcalinidad del agua como se indica en la Ilustración 2-1, el pH se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua, el agua con un pH bajo es ácida, y el agua con un pH alto es básica o alcalina. El valor que establece la norma INEN 1108 apto para el consumo humano es de 6,5 a 8,5. (NTE INEN 1108)

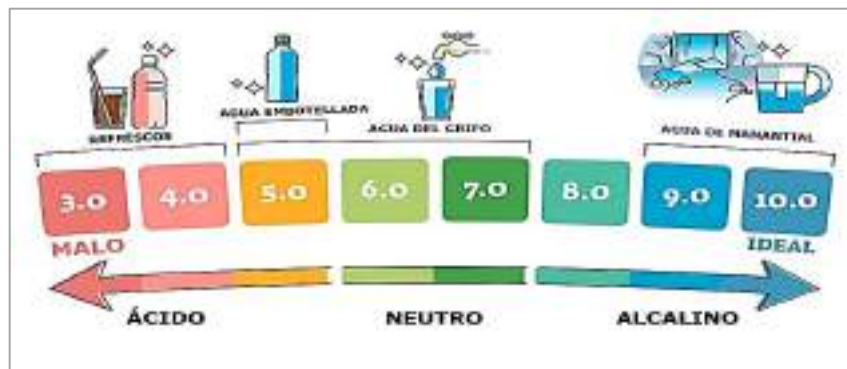


Ilustración 2-1: Alcalinidad del PH

Fuente: (OMEGA Laboratorios)

Turbiedad

Es el valor de partículas en suspensión en el agua, la turbidez es un indicativo de una mayor probabilidad de contaminación microbiológica y por compuestos tóxicos, que se adhieren a la materia dispersa en el agua y en consecuencia significa una mayor dificultad en la desinfección efectiva del agua. De acuerdo con la OMS y la norma INEN 1108 la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5 NTU (Unidad de Turbidez Nefelométrica), y estaría idealmente por debajo de 1 NTU. (Lenntech, 2023)

Sólidos Totales Disueltos (SDT o TDS)

Los Sólidos Totales Disueltos está conformado principalmente por las sales, los minerales, los metales y cualquier otro compuesto orgánico o inorgánico que se encuentra disuelto en el agua, o que haya pasado a través del filtro con abertura de 1.5 micras. Los SDT son procedentes de fuentes de aguas naturales, residuales, industriales, efluentes urbanas y agrícolas. Las concentraciones de TDS o SDT procedentes de fuentes naturales varían de 30 mg/litro a 6000 mg/litro, esto dependerá directamente de la solubilidad de los minerales en las diferentes zonas geológicas, la OMS

mediante un estudio menciona la recomendación de los niveles de TDS en el agua para consumo humano como se indica en la Tabla 2-1. (Carbotecnia, 2021)

Tabla 2-1: Nivel de TDS ideal para el agua en ppm

Nivel de TDS	Clasificación
Menos de 300 ppm	Excelente
300 ppm – 600 ppm	Nivel bueno
600 ppm – 900 ppm	Nivel aceptable
900 ppm – 1200 ppm	Nivel Pobre o no recomendable
Más de 1200 ppm	Inaceptable

Fuente: Organización Mundial de la Salud (OMS), 2011

2.1.3 Tipos de fuentes naturales de agua

La mayor parte del agua se encuentra en el planeta tierra, que en su mayoría se encuentra en estado líquido, pero también se puede encontrar en estado sólido principalmente en glaciares y gaseoso en la atmósfera. Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), los océanos componen el 97% del agua del planeta.

En cada una de las regiones existen diferentes características geográficas, por tanto, el acceso al agua no es la misma en cada área poblacional, el tipo de fuente de agua va a depender directamente de las condiciones hidro-geológicas de cada región. (Fan del Agua, 2018)

2.1.3.1 Fuentes subterráneas

Las fuentes de agua subterráneas se encuentran en acuíferos, que son formaciones geológicas conformadas por estratos porosos e impermeables que almacenan agua dulce bajo la superficie terrestre. En zonas frías es posible que se encuentren estas aguas en estado congelado, mientras que, en regiones áridas o semiáridas, representan la principal fuente de agua dulce. Tienen un papel esencial en el ciclo hidrológico, cuando llueve el agua se filtra en ríos y lagos para luego surgir como manantiales. Este tipo de fuentes de agua son de las más aptas para el consumo humano además de ser un recurso valioso en el ámbito de la agricultura y la alimentación. (AQUAe, 2022)

2.1.3.2 Fuentes superficiales

Este tipo de fuente de agua son aquellas que circulan sobre la superficie del suelo, se generan a partir de las lluvias, nieve o por el afloramiento de aguas subterráneas, están conformadas por el

agua de ríos, lagos, arroyos, etc. Las aguas superficiales siguen el camino que les presente una menor resistencia de tal manera que se torna correntosa. (INDUANALISIS , 2019)

2.2 Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas se enfoca a la interconexión de los objetos cotidianos a través de internet, permitiéndoles recopilar y compartir datos para realizar diferentes tipos de tareas de una manera más eficiente y automatizada. El IoT tiene múltiples enfoques, como hogar inteligente, coches conectados, salud y bienestar, industria, agricultura inteligente, ciudades inteligentes.

La tecnología IoT se basa en la conectividad, la capacidad de procesamiento de dato, el almacenamiento en la nube y la inteligencia artificial para hacer que los objetos sean más eficiente e inteligentes, además permite implementar diferentes niveles de seguridad y privacidad de los datos según sea requerido, interoperabilidad entre los dispositivos y la gestión de grandes volúmenes de datos que son generados por los objetos que se encuentran conectados. (Red Hat, 2023)

2.2.1 Arquitectura

El rendimiento de los sistemas IoT están directamente ligados con el trabajo coordinado que deben realizar los dispositivos que conforman la arquitectura IoT. La arquitectura está conformada por elementos constituyentes, estructura de red y tecnologías de nube que funcionan bajo lineamientos de los diferentes protocolos y estándares de seguridad de IoT establecidos, además, se distinguen los dispositivos y sensores de las capas de arquitectura IoT para ubicar la consistencia de un sistema a través de los protocolos y puertas de enlace. (Guinea Mobile, 2022)

2.2.1.1 Arquitectura IoT de 3 capas

Es la arquitectura más sencilla de IoT, está compuesta por capa de percepción, capa de red y capa de aplicación como se muestra en la Ilustración 2-2, siendo perfecta desde el punto de vista conceptual, porque describe completamente la lógica de la tecnología. (T- Systems, 2018)

- **Capa de percepción:** en esta capa se ubican los sensores que son los encargados de recoger la información del entorno.
- **Capa de Red:** se encarga de la conexión entre los dispositivos o hacia dispositivos de red o servidores.

- **Capa de Aplicación:** es la capa final donde se enmarcan las aplicaciones del usuario, donde puede visualizar cualquier aplicación ya sea doméstica o industrial que haga uso de dispositivos IoT.

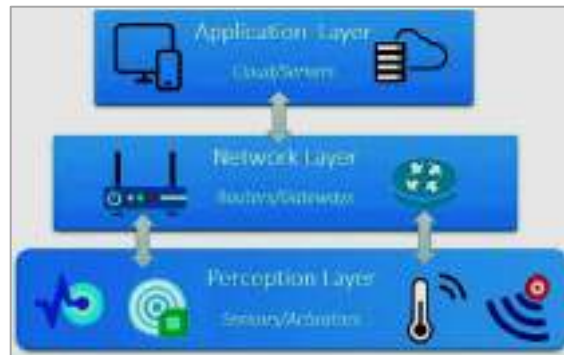


Ilustración 2-2: Arquitectura IoT de 3 capas

Fuente: mPython, 2017

2.2.1.2 *Arquitectura IoT de 4 capas*

Es una arquitectura fundamental comúnmente utilizada para diseñar y organizar sistemas de IoT, está compuesta por capa de detección, capa de red, capa de procesamiento de datos y capa de aplicación como se indica en la Ilustración 2-3. (GeeksForGeeks, 2023)

- **Capa de Detección:** es la capa inferior que recopila los datos de las diferentes fuentes, esta capa incluye sensores y actuadores.
- **Capa de Red:** proporciona la comunicación y conectividad entre los dispositivos del sistema IoT, aquí se incluyen los diferentes protocolos y tecnologías de comunicación, además, se pueden incluir características de seguridad como encriptación y autenticación para proteger la comunicación de personas no autorizadas (GeeksForGeeks, 2023).
- **Capa de Procesamiento de Datos:** hace referencia a los componentes de software y hardware que son los encargados de almacenar, analizar y procesar la información proporcionada por los dispositivos de sensado, para su cumplimiento existe una variedad de tecnologías, herramientas, sistemas de gestión de datos, plataformas de análisis y algoritmos de aprendizaje automático.
- **Capa de Aplicación:** es la capa superior que interactúa directamente con el usuario final, proporciona las diferentes interfaces que permiten al usuario visualizar la información del entorno que se está controlando y a la vez también proporciona un fácil control de este. Esta capa también permite el análisis y procesamiento de datos y transformarlos en información

significativa, esto puede incluir algoritmos de aprendizaje automático, herramientas de visualización de datos entre otras capacidades de análisis avanzadas (GeeksForGeeks, 2023).

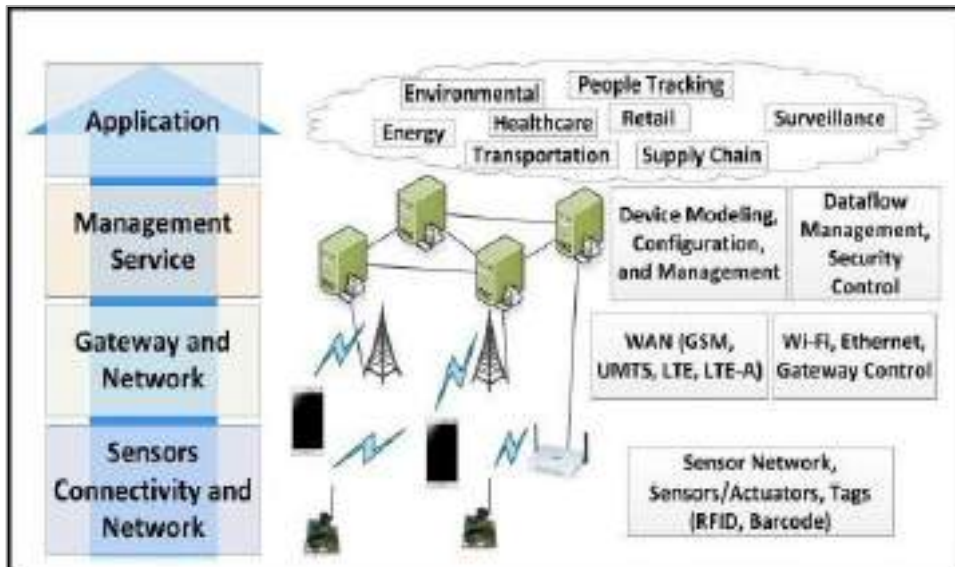


Ilustración 2-3: Arquitectura IoT de 4 capas

Fuente: Arduino

2.2.2 Gestión y análisis de datos

La gestión y análisis de datos en IoT se puede dar de forma centralizada y distribuida para la toma de decisiones desde una plataforma, de tal manera se conoce como la plataforma de Cloud (nube) como centralizadas y las plataformas de tipo Fog Computing como distribuidas.

2.2.2.1 Cloud Computing

Las plataformas centralizadas Cloud Computing son convenientes cuando se posee una múltiple cantidad de dispositivos de sensado distribuidos en múltiples ubicaciones geográficas, o cuando se requiere de un procesamiento o análisis de datos con una cantidad de información muy grande, así como funciones avanzadas que requieran de un alto poder computacional (como inteligencia artificial), alta escalabilidad o conveniencia económica, dado que las plataformas de Cloud son presentadas a sus usuarios como una baja inversión inicial, en la Ilustración 2-4 se indica la forma en cómo funciona Cloud Computing, donde en el Edge se tendrán los sensores y actuadores mismos que podrán ser monitoreados, procesados y controlados desde la Cloud. (ONTI, 2019)

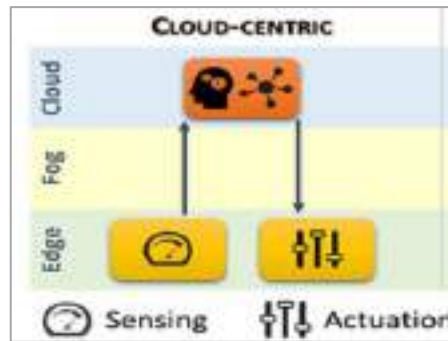


Ilustración 2-4: Cloud Computing

Fuente: (ONTI, 2019)

El Cloud Computing presenta varias ventajas de las principales se pueden destacar las siguientes:

- Reducción de costos de infraestructura, eliminando la compra de hardware, software, instalación y mantenimiento.
- Los recursos se almacenan de manera online economizando espacio.
- Los datos permanecen de manera centralizada evitando que se manejen en distintos programas con los diferentes modos de autenticación y tipos de acceso.
- Se puede gestionar el acceso al espacio de almacenamiento según las necesidades y requerimientos del cliente para poder almacenar y procesar la información.
- Acceso a la información de manera remota desde cualquier lugar que se tenga acceso a internet.
- Ofrece seguridad y actualización automática del servidor, además de contar con asistencia técnica y backups.

Cloud Computing ofrece una amplia variedad de servicios, herramientas y funciones para solventar los requerimientos de los usuarios, dentro de estos servicios se destacan tres principalmente:

- **SaaS (Software como servicio):** Este servicio se enfoca en simplificar la entrada del usuario a la aplicación de software mediante una interfaz de navegador o de programa. Bajo este modelo, la infraestructura de red, el sistema operativo y los recursos operan en segundo plano. (Salesforce, 2023)
- **PaaS (Plataforma como Servicio):** En este servicio los usuarios tienen la oportunidad de encontrar los beneficios de la computación en la nube, al mismo tiempo que conservan su autonomía para crear aplicaciones de software personalizadas. El acceso a la Plataforma como Servicio (PaaS) es similar al enfoque utilizado en Software como Servicio (SaaS). El

proveedor se encarga de la gestión y mantenimiento del sistema operativo, la infraestructura de la red, los servidores y las medidas de seguridad. Además, es posible encontrar abstracciones a nivel de aplicaciones que agilizan el proceso de desarrollo y compatibilidad con múltiples dispositivos. (Salesforce, 2023)

- **IaaS (Infraestructura como Servicio):** Este servicio está un paso adelante en el nivel de abstracción al otorgar a las empresas la capacidad de utilizar los recursos sin procesar del servidor, mientras que la gestión de la plataforma y del software recae en la responsabilidad de la propia organización. Esto proporciona una mayor capacidad sin la necesidad de preocuparse por los requisitos del hardware. (Salesforce, 2023)

En la Ilustración 2-5 se muestra gráficamente una representación en capas en forma de resumen de los principales servicios que proporciona Cloud Computing.



Ilustración 2-5: Modelo de servicios que ofrece Cloud Computing

Fuente: Flores Frankier, 2021

2.2.2.2 Fog Computing

Posibilita la conexión de dispositivos, tanto activos como pasivos a los diferentes nodos de la red Fog. Esto habilita el análisis de datos y la toma de decisiones de manera distribuida e independiente de la Cloud, la cual puede estar presente o ausente en el proceso como se indica en la Ilustración 2-6. La administración de las plataformas estará disponible en cada uno de los puntos Fog, aunque también se puede gestionar desde un único nodo. Una de las ventajas primordiales de hacer uso de Fog Computing es la latencia reducida que permite procesar datos en tiempo real y recibir en los actuadores respuestas inmediatas, además, al ser descentralizada si un nodo sufre alguna falla los demás nodos seguirán funcionando, garantizando la operatividad del sistema. (ONTI, 2019)



Ilustración 2-6: Fog Computing

Fuente: (ONTI, 2019)

En la Tabla 2-2 se presentan las ventajas e inconvenientes de la arquitectura que sigue el Fog Computing en aplicaciones IoT.

Tabla 2-2: Ventajas e inconvenientes de Fog Computing

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> ▪ La computación en la nube ofrece una considerable reducción del tráfico entre dispositivos IoT y la Cloud. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Los costos aumentan al tener que implementar hardware para poder procesar la información de los dispositivos IoT localmente.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ahorro en costos de compra de espacio en la nube y uso de redes externas, debido a que Fog trabaja de manera local. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No existen garantías en el caso de caídas por el sistema, por lo que en Fog se deben implementar controladores y sensores IoT difíciles de mantener en el borde de la red.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se tiene disponibilidad de los dispositivos IoT en un estado offline, es decir, el sistema funciona a pesar de no estar operando sobre una red de internet. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El procesamiento es descentralizado lo que implica un mayor trabajo para realizar un mantenimiento por lo que los controladores y la memoria están distribuidos por toda la red, en comparación con los servicios en la nube que son centralizados.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ El sistema Fog reduce la latencia, lo que es una considerable ventaja para procesar la información y tener resultados inmediatos en aplicaciones de sistemas que deben funcionar y tomar decisiones en tiempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Al tener menores requisitos de seguridad de la red el Fog es más vulnerable a ataques man in the middle.

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se tiene seguridad de manera local, es decir, los datos sensibles de una empresa se pueden mantener de manera segura a través de un cifrado antes de subirlos a la nube. 	
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

2.3 Tecnologías de comunicación de largo alcance LPWAN

Las tecnologías inalámbricas para comunicación de largo alcance dentro del ámbito de IoT constituyen las bases de las Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN). En este contexto, los dispositivos de bajo consumo se enlazan con los gateway, los cuales transmiten los datos hacia los servidores ya sean locales o en la nube, así el dispositivo en la red analiza la información recibida y supervisa el dispositivo final. Como resultado, este protocolo se ha diseñado específicamente para dispositivos que requieren baja potencia, costos operativos reducidos y capacidades de comunicación a larga distancia. Existen diversas tecnologías LPWAN como LoRa, Sigfox, NB-IoT y LTE-M que ofrecen distintos niveles de rendimiento y modelos de negocio para satisfacer las necesidades variadas de diversas aplicaciones. (KUAN, 2022)

En la Tabla 2-3 se realiza un análisis de las principales características técnicas del estándar LPWAN, tomando en cuenta que al contar con un mayor alcance se tendrá un menor ancho de banda, por tanto, no es útil para la mayoría de las aplicaciones comerciales como son la transmisión de voz, audio y video.

Tabla 2-3: Características principales del estándar LPWAN

Frecuencias de operación	EU	USA	China
	867 – 869 MHz	902 – 928 MHz	920 – 925 MHz
Cobertura	Indoor y Outdoor Urbana (5 Km) y Rural (10 Km) Bajo tierra, Bajo agua y a través de las paredes		
Capacidades	Unidireccional, Bidireccional, Half / Full Duplex Escalabilidad Soporte de velocidad de datos, Fiabilidad		
Costo	Bajo costo		
Baja Potencia	Eficiencia energética Prolongada vida de batería, duración de hasta 10 años Latencia		

Características mejoradas	Aplicación acorde a los requisitos del sistema Escenarios de implementación
Licencias	Licenciadas y no licenciadas

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Las tecnologías LPWAN, por lo general, funcionan en las bandas de radio industriales, científicas y médicas (ISM) conocidas también como las bandas de frecuencia libres, es decir, no licenciadas que operan por debajo de 1 GHz de frecuencia. Esta banda posee características de propagación mejoradas y una cobertura más efectiva en áreas con obstáculos, lo que facilita la transmisión a través de estructuras, paredes y vegetación. En la Ilustración 2-7 se muestran los rangos de frecuencia que se utilizan en cada una de las regiones para hacer uso de las tecnologías LPWAN.

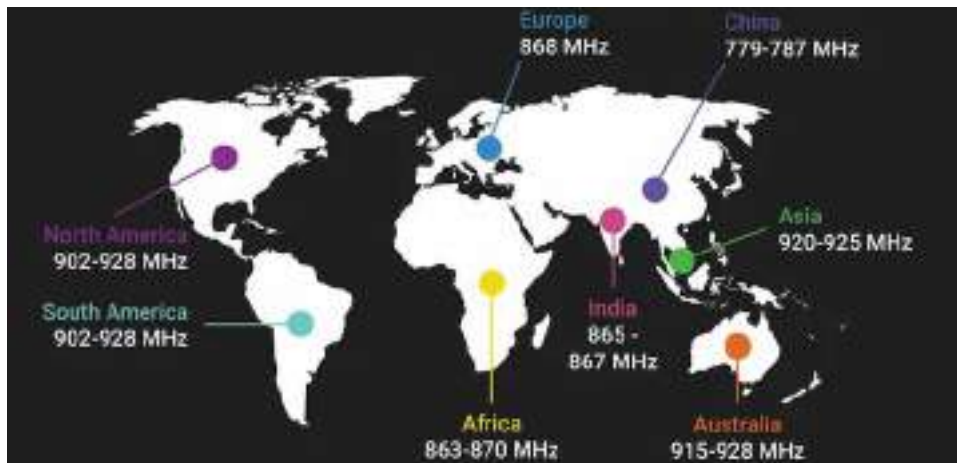


Ilustración 2-7: Bandas de frecuencia para uso de tecnología LPWAN en cada región

Fuente: Moko Lora, 2021

2.3.1 LoRa



Ilustración 2-8: Logo de tecnología LoRa

Fuente: The Things Network, 2019

La tecnología LoRa (Long Range) de la Ilustración 2-8, es una forma de modulación de señales de radiofrecuencia (RF) que permiten la transmisión de pequeños paquetes de datos a largas

distancias utilizando una baja potencia de señal. Esta tecnología fue diseñada y comercializada por Semtech y se basa en la técnica de modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), que aprovecha de todo el ancho de banda disponible para modular la señal mediante cambios de frecuencia, permitiéndole tolerar ruido, caminos múltiples de señal y el efecto Doppler. Una de las principales características de la modulación LoRa es el tiempo que las señales permanecen en el aire Time on Air (ToA) que se controla a través del Spread factor (SF). La idea básica es repetir el mensaje varias veces para garantizar que al menos uno llegue con éxito a su destino tomando en cuenta que a medida que aumenta el Spread Factor, disminuye la velocidad de transmisión de datos. (LPWAN.es, 2023)

El bajo consumo de energía, junto con un diseño y configuración adecuados se puede lograr que un sensor se alimente de una batería tipo botón por varios años de entre 3 a 5 años, teniendo en cuenta que la duración de la batería dependerá de varios factores, como la ventana de tiempo en la que el dispositivo se encuentra activo o en reposo. Es importante aclarar que la tecnología LoRa opera a nivel de la capa física (capa 1 del modelo OSI), es decir, el tipo de modulación, ancho de banda, frecuencia, entre otros, mientras que LoRaWAN es un estándar de control de acceso al medio (MAC) donde se establece la manera en que se realizarán las comunicaciones correspondientes a las capas 2 y 3 del modelo OSI como se muestra en la Ilustración 2-9. (HERNANDEZ, 2019)

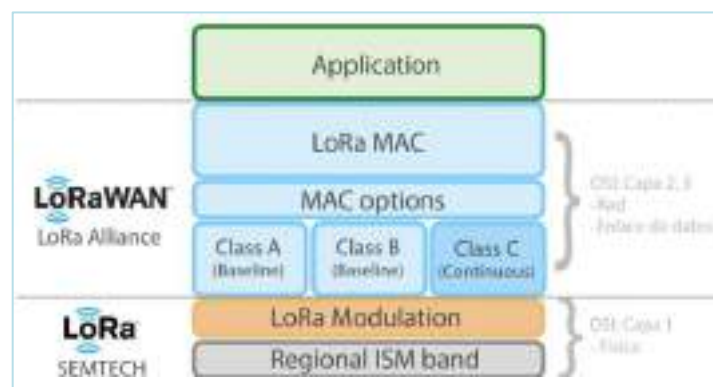


Ilustración 2-9: LoRa / LoRaWAN

Fuente: Decolve Digital, 2022

Entre las principales características de la tecnología LoRa se puede destacar las siguientes (ESNOZ, 2017):

- Largo alcance entre 10 Km a 20 Km entre nodos sensores, conexión punto a punto.
- Tasa de transferencia de datos que van desde los 300 bps hasta los 50000 bps.

- Baja potencia, los nodos sensores consumen un bajo nivel de energía por lo que su batería puede durar entre 5 a 10 años.
- Bajo costo, los gastos en infraestructura hasta montar los nodos de censado son bajos.
- Seguridad, se puede integrar cifrado de datos de extremo a extremo con AES-128 por lo que interceptar la información se torna casi imposible.
- Es altamente escalable permitiendo que billones de sensores se conecten a millones de nodos.
- Está basado en la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS).
- Alta tolerancia ante interferencias, gracias al ajuste del Spread Factor (SF).
- Alta sensibilidad para recibir datos (-168 dB).
- Frecuencias de operación: 868 MHz en Europa, 915 MHz en América, 433 MHz en Asia.

2.3.1.1 Modulación LoRa

LoRa emplea el método de modulación conocido como Chirp Spread Spectrum (CSS), esta técnica de modulación de espectro ensanchado utiliza una secuencia de pulsos llamados “chirridos” para codificar los datos que se van a transmitir. Estos chirridos son pulsos cuya frecuencia varía en el tiempo, y esta variación puede ser ascendente o descendente, conocidos respectivamente como “up-chirp” y “down-chirp”. En una comunicación entre dos dispositivos LoRa, la trama enviada está compuesta por una serie de estos pulsos de chirrido que contienen la información que desean compartir. (FUENTES, y otros, 2022) En la Ilustración 2-10 se presenta la modulación LoRa.

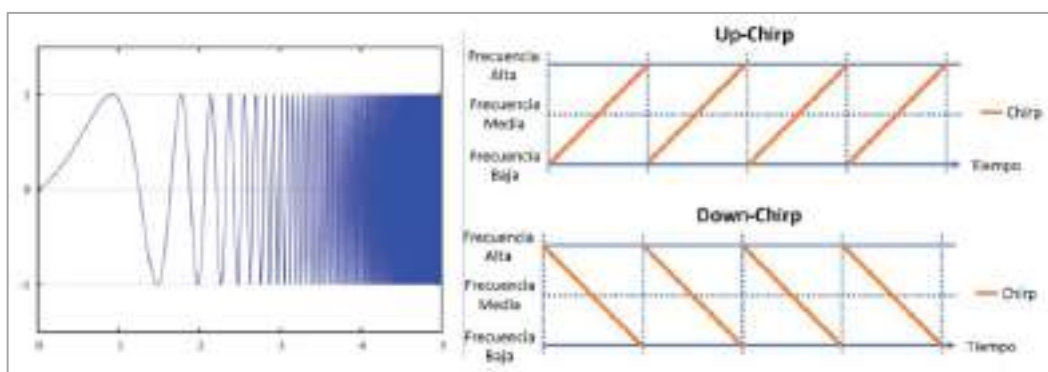


Ilustración 2-10: Modulación LoRa (CSS)

Fuente: Calderón, 2019

Para una correcta comunicación a través de la tecnología LoRa es fundamental la configuración adecuada de ciertos parámetros como el Spread Factor (SF), ancho de banda (BW) y Coding Rate (CR) los cuales se detallan a continuación:

- **Spread Factor (SF):** El Spread factor o factor de propagación, es un parámetro que se puede ajustar para controlar la duración de la señal de chirrido en el aire y la cantidad de bits codificados en dicha señal. Este valor es configurable y puede oscilar de SF7 a SF12, un SF más alto implica una mayor codificación de bits, lo que se traduce en un mayor periodo de tiempo durante el cual los datos se mantienen en el aire y un mayor consumo de energía mejorando el rango de la comunicación, pero reduciendo la velocidad de datos disponible. En la Ilustración 2-11 se indican las características generales de la modulación LoRa (FUENTES, y otros, 2022)

Data Rate [DR]	Spreading Factor [SF]	Channel Frequency	Uplink or Downlink	Bitrate (bits/Sec)	Maximum User Payload Size [Bytes]
0	SF10	125 kHz	Uplink	980	11
1	SF9	125 kHz	Uplink	1,760	53
2	SF8	125 kHz	Uplink	3,125	125
3	SF7	125 kHz	Uplink	5,470	242
4	SF8	500 kHz	Uplink	12,500	242
5 – 7					
8	SF12	500 kHz	Downlink	980	53
9	SF11	500 kHz	Downlink	1,760	129
10	SF10	500 kHz	Downlink	3,125	242
11	SF9	500 kHz	Downlink	5,470	242
12	SF8	500 kHz	Downlink	12,500	242
13	SF8	500 kHz	Downlink	21,900	242

Ilustración 2-11: Características generales de la modulación LoRa

Fuente: LoRa, 2023

En la Ilustración 2-12 se muestran algunos de los formatos convencionales de la modulación LoRa para el factor de propagación

Spreading Factor	Chips/symbol	SNR limit	Time-on-air (10 byte packet)	Bitrate
7	128	-7.5	56 ms	5469 bps
8	256	-10	103 ms	3125 bps
9	512	-12.5	205 ms	1758 bps
10	1024	-15	371 ms	977 bps
11	2048	-17.5	741 ms	537 bps
12	4096	-20	1483 ms	293 bps

Ilustración 2-12: Formato convencional de modulación LoRa

Fuente: LoRa, 2023

En la Ilustración 2-13 se muestran cuatro factores de dispersión del SF7 al SF10 de LoRa que se pueden usar para usar en un enlace ascendente (UL) en un canal para un ancho de banda de 125 KHz.

Spreading Factor (For UL at 125 KHz)	Bit Rate	Range (Depends on Terrain)	Time on Air for an 11-byte payload
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

Ilustración 2-13: Factores de dispersión LoRa

Fuente: LoRa, 2023

- **Ancho de Banda (BW):** La tecnología LoRa ofrece la posibilidad de elegir entre tres anchos de banda diferentes según las necesidades: 125 KHz, 250 KHz y 500 KHz. En todas las comunicaciones LoRa, las señales de chirrido aprovechan el ancho de banda completo para llevar a cabo la variación de la frecuencia a lo largo del tiempo. (FUENTES, y otros, 2022)
- **Coding rate (CR):** La tasa de codificación o “Coding Rate”, tiene un impacto directo en la susceptibilidad de la señal LoRa a interferencias durante su transmisión. Este parámetro tiene valores configurables de 1 a 4 y se ajusta en función de las condiciones del canal de comunicación, si el canal presenta propensión a la pérdida de datos, se sugiere utilizar una tasa de codificación más alta para mejorar la fiabilidad de la transmisión.

2.3.2 Sigfox



Ilustración 2-14: Logo tecnología Sigfox

Fuente: Sigfox, 2021

La tecnología Sigfox de la Ilustración 2-14, es una empresa fundada en 2009 por dos ingenieros enfocados en el estudio de señales, se destaca como pionera en el ámbito de las redes IoT. Su enfoque se centra en la comunicación de máquina a máquina (M2M), ofreciendo conectividad especialmente diseñadas para transporte de datos de baja velocidad, de esta manera SigFox al transmitir la información prioriza la eficiencia energética y la reducción de costos de los dispositivos conectados. En colaboración con las diferentes operadoras móviles ha establecido

una red de largo alcance y baja velocidad que facilita la comunicación entre dispositivos conectados, prescindiendo de la dependencia de teléfonos móviles y la disponibilidad de redes móviles ligado a la cobertura. La conectividad de Sigfox se da gracias a su tecnología de radio de banda ultra estrecha (UNB), misma que mantiene una eficiencia energética y opera sobre las bandas de frecuencia no licenciadas disponibles a nivel global, incluyendo las bandas ISM, sin embargo, el uso de Sigfox incluye el parámetro “duty cycle” que limita la cantidad de tiempo durante el cual se puede utilizar un canal, teniendo una restricción de 140 mensajes diarios por dispositivo. (Sigfox, 2021)

2.3.2.1 Infraestructura, descripción y aplicación de tecnología Sigfox

La infraestructura de Sigfox se compone de antenas y estaciones base ubicadas en diversas localizaciones, facilitando la comunicación con los dispositivos sensores y el servidor central de Sigfox, el cual es responsable del almacenamiento de los datos recopilados como se indica en la Ilustración 2-15, Sigfox trabaja con las operadoras móviles hábiles en cada uno de los países donde prestan sus servicios. (Dset ENERGY, 2023)

Cabe mencionar que en América Latina los encargados en extender la red de Sigfox es el Grupo WDN que satisfacen las necesidades de sus usuarios en soluciones IoT de bajo costo y baja potencia, en Ecuador actualmente estas redes de Sigfox se encuentran en pleno proceso de desarrollo por lo que es difícil acceder a las mismas, además Sigfox ofrece un mapa de cobertura que permite ver donde ya se puede acceder a sus servicios a nivel global.

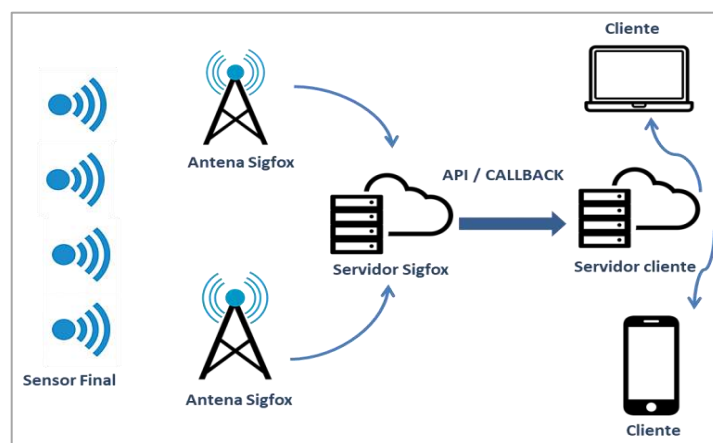


Ilustración 2-15: Infraestructura Sigfox

Fuente: (Dset ENERGY, 2023)

A nivel tecnológico, Sigfox se vale de la banda Ultra Narrow Band (UNB) que está diseñada para operar a velocidades bajas, con tasas de transferencia que oscilan entre 10 bps y 1000 bps con un ancho de banda de menos de 1 KHz lo cual le permite a Sigfox lograr un alcance inalámbrico

considerable de hasta 20 Km en campo abierto y hasta 1.5 Km en áreas urbanas. Entre las principales ventajas que proporciona la tecnología Sigfox se menciona las siguientes: (Dset ENERGY, 2023)

- Bajo costo, las tarifas de suscripción son económicas, con tecnología de fácil integración y protocolo de acceso gratuito.
- Actualmente Sigfox ofrece cobertura en 60 países.
- Bajo consumo, al hacer uso de UNB los dispositivos reducen significativamente el consumo de energía.
- Existen más de 10 millones de dispositivos conectados a la red Sigfox.

A nivel de aplicaciones Sigfox se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones IoT como:

- Eficiencia energética
- Smart cities
- Medición de parámetros ambientales externos.
- Monitorización de funcionamiento de líneas de producción.
- Sector agrícola.
- Detección de incendios, inundaciones.
- Etc.

2.3.3 NB-IoT



Ilustración 2-16: Logo tecnología NB-IoT

Fuente: thethings.io, 2023

Narrow Band IoT (NB-IoT) de la Ilustración 2-16, representa la iniciativa del Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP) para abordar los requerimientos de comunicación en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT), particularmente lo que se conoce como Comunicaciones de Tipo de Máquina Extendidas (eMTC). NB-IoT surge como respuesta al crecimiento de las Redes de Área Extensa de Baja Potencia (LPWAN). NB-IoT representa una tecnología en opera en redes celulares, aprovechando las bandas de comunicaciones celulares existentes, su diseño ofrece flexibilidad en la forma en la que se puede implementar, ya sea como una red autónoma

(standalone) mediante el uso de la banda de GSM, compartiendo la banda de LTE (in band), o incluso utilizando los espacios disponibles entre los canales LTE para optimizar el espectro de comunicaciones, NB-IoT se encuentra intrínsecamente vinculado a la arquitectura LTE y debe coexistir con esta tecnología sin alterar su estructura y configuración de la red, lo cual conlleva un nivel de complejidad significativamente mayor en comparación con sus competidores LPWAN. (Universitat Oberta de Catalunya, 2018)

Entre las principales características de la tecnología NB-IoT podemos destacar las siguientes:

- Velocidades de datos de hasta 250 Kbps (Half Duplex).
- Ancho de banda de 180 KHz, 3GPP licenciada.
- Comunicación basada en mensajes.
- Puede convivir con redes celulares 2G, 3G y 4G, opera en el espectro con frecuencias menores a 1 GHz (700 MHz, 800 MHz y 900 MHz)
- No soporta VoLTE ni movilidad.
- Ideal para dispositivos que se encuentran en reposo la mayor parte del tiempo, comunicando sus datos periódicamente.
- Hace uso la arquitectura basada en acceso múltiple por división de frecuencia de una sola portadora (SC-FDMA) y un esquema de modulación DSSS.
- Consumo de energía muy bajo de 5 Wh con dos niveles de potencia: 20 dBm y 23 dBm, duración de batería hasta 10 años.
- Mayor capacidad para llegar a lugares cubiertos por obstáculos y a interiores.

2.3.3.1 Arquitectura NB-IoT

El centro de la red de NB-IoT se fundamenta en el Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, por sus siglas en inglés), y establece dos mejoras para el Internet de las Cosas Celulares (CIoT, por sus siglas en inglés) que son: CIoT EPS en el plano de control y CIoT EPS para el plano de usuario. Se emplea la misma arquitectura que en las redes LTE para NB-IoT, con ajustes específicos para gestionar las necesidades extensas del Internet de las Cosas como se muestra en la Ilustración 2-17. (SHARAN, y otros, 2017)

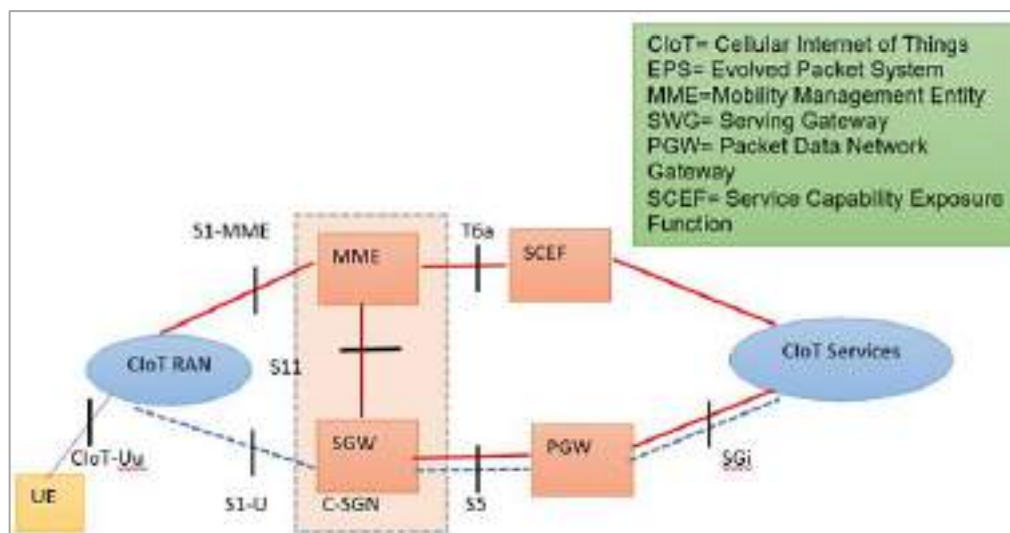


Ilustración 2-17: Arquitectura de red NB-IoT

Fuente: GLOBECOM, 2018

2.3.4 LTE-M



Ilustración 2-18: Logo tecnología LTE-M

Fuente: Telia, 2020

El estándar Long Term Evolution for Machines (LTE-M) de la Ilustración 2-18, constituye una tecnología de red móvil que aprovecha la infraestructura ya establecida de LTE, es decir, 4G. En líneas generales, se vale de la infraestructura existente de 4G y asigna una vía exclusiva para las comunicaciones de IoT. LTE-M se presenta como una tecnología complementaria que se puede integrar fácilmente en los dispositivos actuales que utilizan 2G, 3G y 4G. Más allá de la capacidad actual para transmitir imágenes, la red LTE-M tiene la capacidad de admitir comunicaciones por voz, este enfoque posibilita la implementación de soluciones IoT de manera sencilla y rentable para entidades gubernamentales y empresas. Al mismo tiempo, hereda las ventajas de 4G, como la seguridad y privacidad de la información. (GARCÍA NOVO, 2019)

Entre las principales características de la tecnología LTE-M podemos destacar las siguientes (ZÁRATE, 2017):

- Los sistemas M2M LTE permiten manejar un amplio espectro de dispositivos.
- Prolongada duración de la batería de hasta 10 años (según el caso de uso).

- LTE-M proporciona un sistema de movilidad a un bajo coste de dispositivos.
- Se puede aplicar seguridad para los múltiples casos de uso.
- Posibilidad de gestionar SMS y tráfico de datos en protocolo TCP/IP de manera nativa.
- Enlace de bajada es OFDMA, con una separación de portadoras de 15 KHz, modulación QAM.
- Enlace de subida es SC-FDMA, con una separación de portadoras de 15 KHz, modulación 16-QAM.
- Duplexación en Tiempo (TDD) o frecuencia (FDD)
- Mayor cobertura en interiores.
- Baja velocidad de datos, hasta 384 Kbps.
- Velocidad de bajada / subida de hasta 1 Mbps.
- Ancho de banda de 1.4 MHz, 3GPP licenciado.
- Baja latencia entre 15 – 30 ms.
- Potencia de transmisión máxima de 20 dBm
- Despliegue en la banda de LTE.
- Permite utilizar comunicación Full o Half Dúplex.
- Permite VoLTE y movilidad hasta 300 Km/h.

La tecnología LTE-M tiene dos modos de operación (ZÁRATE, 2017):

- **In-Band:** comparte el espectro radioeléctrico con LTE.
- **Standalone:** Utilizando un espectro radioeléctrico específico y reservado, generalmente se refiere a bandas de frecuencia asignadas para la tecnología GSM.

En la Ilustración 2-19 se puede visualizar el mapa de cobertura a nivel mundial para las tecnologías de comunicación tanto LTE-M como la de NB-IoT, como se puede apreciar existe una gran parte del mundo en la que aún no se despliegan estas tecnologías para su aplicación, además de existir una mayor cobertura de la tecnología NB-IoT que la de LTE-M.

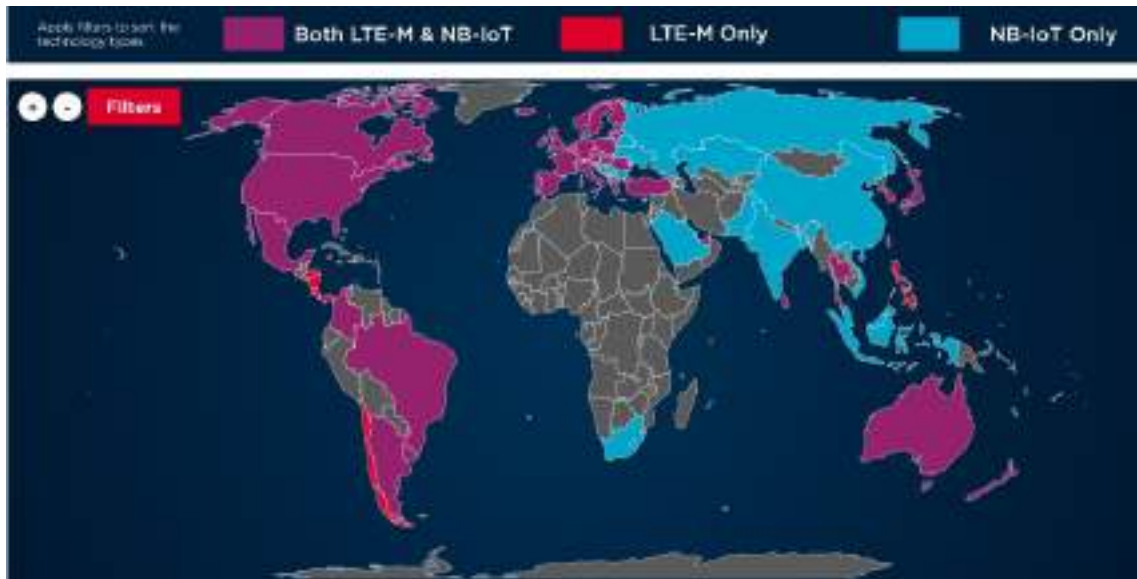


Ilustración 2-19: Mapa de cobertura a nivel mundial para las tecnologías de LTE-M y NB-IoT
Fuente: GSMA, 2023

2.4 Protocolos de comunicación

La selección de los protocolos de comunicación representa uno de los elementos fundamentales en la implementación de un entorno IoT, dado que el Internet de las Cosas involucra la interacción de dispositivos, redes de sensores y sistemas de gestión, los protocolos de comunicación IoT desempeñan un papel crucial al posibilitar y optimizar la comunicación entre estos componentes. En la Ilustración 2-20 se muestra todo el grupo de los protocolos de comunicación sobre el modelo OSI que consta de protocolos de comunicación de capa física, capa de red, capa de transporte y capa de aplicación

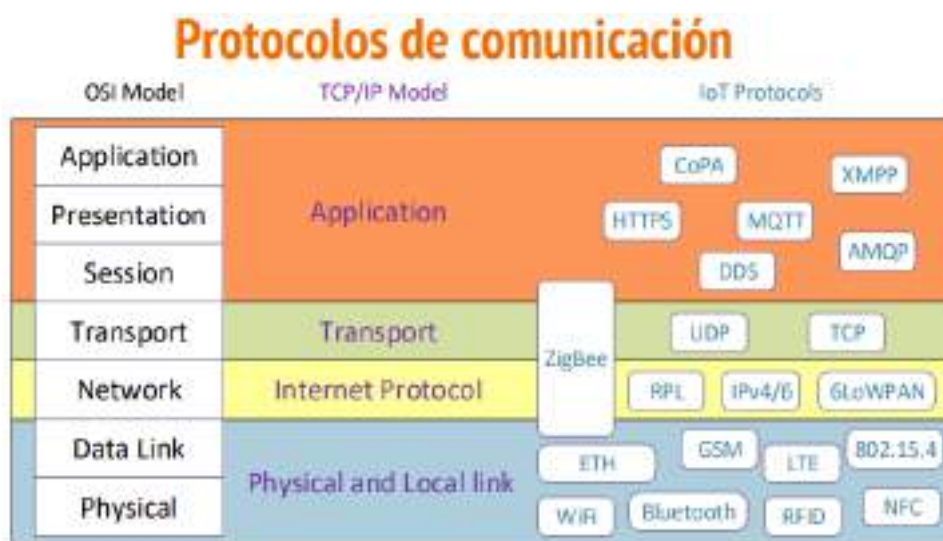


Ilustración 2-20: Protocolos de comunicación, modelo OSI

Fuente: Castro M., 2021

2.4.1 Protocolos de comunicación para la capa de enlace físico y local

Según el modelo OSI en la capa física los paquetes son transformados en pulsos eléctricos, radioeléctricos u ópticos, posteriormente transmitidos en forma de bits, que representan las unidades más pequeñas de información, a través de cables o mediante ondas de radio, por otra parte, en la capa de enlace de datos se administra las comunicaciones entre dispositivos pertenecientes a la misma red.

2.4.1.1 WiFi (IEEE 802.11)

El WiFi constituye una tecnología de conectividad inalámbrica que posibilita el acceso a internet sin la necesidad de conexiones físicas mediante cables. Su alcance es determinado por el router y de la configuración específica, puede abarcar aproximadamente 100 metros de distancia. La conexión se establece a través de ondas de frecuencia permitiendo la transmisión de información de manera eficiente. Asimismo, la presencia de un router con tecnología WiFi posibilita la conexión simultánea de múltiples dispositivos a la red de Internet. (ABAMOBILE, 2023)

WiFi se basa en el estándar IEEE 802.11 que comprende un conjunto de especificaciones para el control de acceso al medio (MAC) y la capa física (PHY), diseñado para la implementación de redes locales inalámbricas en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5 GHz. (SALAZAR, 2016)

En la Tabla 2-4 se detallan las diferentes versiones del estándar IEEE 802.11 (WiFi) con sus diferentes características.

Tabla 2-4: Versiones del estándar IEEE 802.11 (WiFi)

Estándar	Banda de Frecuencia	Distancia de cobertura	Velocidad máxima de transmisión
IEEE 802.11	2.4 / 5 GHz	100 m	1 Mbps
IEEE 802.11a	5 GHz	100 m	48 Mbps
IEEE 802.11b	2.4 GHz	100 m	11 Mbps
IEEE 802.11g	2.4 GHz	100 m	54 Mbps
IEEE 802.11n	2.4 / 5GHz	250 m	600 Mbps
IEEE 802.11ac	5 GHz	250 m	1.3 Gbps
IEEE 802.11af	400 / 800 MHz	1000 m	26.7 – 568.9 Mbps

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

2.4.1.2 LoRaWAN

El protocolo LoRaWAN representa un estándar de red que hace uso de la tecnología LoRa, diseñado para habilitar redes de amplio alcance y bajo consumo de energía. Su estructura incluye nodos y gateways, donde los gateways gestionan la transmisión de datos entre nodos y, a su vez, los nodos son los dispositivos terminales responsables de recibir y enviar datos a los Gateways. (ZOOstock, 2023)

Entre las principales características de LoRaWAN se destacan las siguientes (CAMARENA GAMARRA, 2022):

- Bidireccional, lo que implica que tanto los gateways como los dispositivos terminales tienen la capacidad de transmitir y recibir información. Se denomina enlace ascendente (UL) a la comunicación desde el dispositivo terminal hacia el gateway, mientras que el enlace descendente (DL) refiere a la comunicación en dirección opuesta.
- Incorpora 8 canales de comunicación simultánea, con la posibilidad de aumentar hasta 16 o 64 canales según la tecnología empleada por el gateway.
- Se establecen restricciones en el uso de los canales durante el ciclo de trabajo (Duty Cycle) en la región Europa.
- Dispositivos clasificados en tres categorías A, B y C.
- No tiene la capacidad de gestionar una carga útil de mensajes muy alta.
- Existen restricciones significativas en el enlace DL debido a que actualmente el 90% o más de las comunicaciones se realizan mediante enlaces UL.
- Utiliza encriptación AES 128 para garantizar la seguridad de la comunicación de punto a punto.
- Ofrece una capacidad de red mejorada gracias a su sistema de comunicaciones bidireccional más eficiente, caracterizado por su capacidad de “escucha”
- Uso del espectro radioeléctrico no licenciado, sujeto a especificaciones para cada región.
- Tamaño de carga útil limitado de 51 a 241 bytes, la velocidad de datos oscila entre 0.3 Kbps a 27 Kbps con un tamaño de carga útil de 222.

2.4.1.3 LTE

El protocolo de comunicación LTE definido como el Evolved Packet System (EPS), se destaca por su robustez en diferentes aspectos, su avance significativo radica en su enfoque para el manejo de paquetes, específicamente en la capa de internet del modelo TCP/IP, donde opera con el

protocolo IP de manera integral. Este sistema fue conceptualizado por la organización 3GPP en respuesta a las crecientes demandas en las comunicaciones celulares.

LTE representa una reconfiguración del estándar 3G diseñada para abordar la necesidad de transmisión de datos con baja latencia. Las redes LTE desempeñan un papel fundamental en las soluciones del Internet de las Cosas (IoT), facilitando la conexión y comunicación de maquinaria y equipos para el intercambio de datos. A pesar de la existencia previa de IoT antes de la implementación de la conectividad LTE, las mejoras en velocidad y rendimiento de LTE han permitido que los sistemas de IoT gestionen sistemas de mayor envergadura y complejidad con una precisión mejorada. (REMMERT, 2021)

Especificaciones de LTE

- Ancho de Banda: 1.25 MHz – 20 MHz
- Modos de transmisión: FDD, TDD y Half Duplex
- Latencia: 10 – 15 ms
- Acceso de Radio:
 - ✓ Downlink: OFDMA
 - ✓ Uplink: SC-FDMA
- Técnicas MIMO:
 - ✓ Downlink: 2x2, 4x2, 4x4
 - ✓ Uplink: 1x2, 1x4
- Velocidades Pico a 20 MHz:
 - ✓ Downlink: 173 Mbps (2x2), 326 Mbps (4x4) a 20 MHz
 - ✓ Uplink: 75 Mbps (1x2) a 10 MHz
- Modulación Adaptativa: QPSK, 16QAM y 64 QAM

2.4.2 Protocolos de comunicación para la capa de red y transporte

Según el modelo OSI la capa de red se encarga de dirigir y transmitir datos entre distintas redes, siendo los protocolos clave en esta función el Protocolo de Internet (IP) y el Protocolo de Control de Mensajes de Internet (ICMP).

El protocolo IP es un conjunto de reglas que facilita la ruta y direccionamiento de paquetes de datos a través de las redes, asegurando su entrega al destino correcto. En el proceso, los datos se fragmentan en paquetes más pequeños, cada uno con información IP que guía a los enrutadores

hacia su destino. Cada dispositivo o dominio conectado a Internet posee una dirección IP única, permitiendo que los paquetes alcancen su destino mediante la dirección IP asociada. (CLOUDFLARE, 2023)

2.4.2.1 IPv4

IPV4, presentado en 1978, estandarizó la comunicación entre computadoras a través de internet, es un protocolo sin conexión, permitiendo el envío de datos sin establecer una conexión previa, y requiere cantidades mínimas de memoria. Constituye un formato estándar representado por una cadena de 32 bits, una dirección IPv4 se conforma por cuatro números, cada uno en el rango de 0 a 255, separados por puntos. Aunque inicialmente proporcionó más de 4 mil millones de direcciones únicas, el aumento de dispositivos en línea ha llevado a que IPv4 alcance su límite en 40 años. (FREDA, 2021)

2.4.2.2 IPv6

Uno de los cambios más significativos en la transición de IPv4 a IPv6 es la longitud de las direcciones de red. Las direcciones IPv6 constan de 128 bits, equivalentes a 32 dígitos hexadecimales, marcando la mejora sustancial respecto a los 32 bits de las direcciones IPv4. Además, las direcciones IPv6 pueden dividirse en dos componentes lógicos: uno prefijo de 64 bits y un identificador de interfaz de 64 bits. (FREDA, 2021)

Todas las direcciones IPv6 tienen una longitud de 128 bits y se representan en 8 secciones de 16 bits cada una separados por dos puntos, utilizando notación hexadecimal que varía de 0 a FFFF. Las selecciones se separan por dos puntos, y se pueden omitir los ceros principales en cada sección. Si dos o más secciones consecutivas consisten completamente en ceros, se pueden abreviar a dos puntos. (JUNIPER, 2023)

2.4.2.3 UDP (*User Datagram Protocol*)

El protocolo UDP es un protocolo que facilita la transmisión sin conexión de datagramas en redes IP, para acceder a los servicios requeridos en los destinos, se apoya en los puertos, destacados como uno de los componentes principales en la cabecera UDP. A través de este protocolo una aplicación tiene la capacidad de transmitir información de manera eficiente, eliminando la necesidad de establecer conexión previa con el receptor o aguardar una confirmación, no obstante, este método no asegura la entrega intacta ni el mantenimiento del orden de los paquetes.

Adicionalmente, carece de protección contra posibles alteraciones o acceso no autorizado. (IONOS, 2020)

Entre las principales características del protocolo UDP se pueden mencionar las siguientes (IONOS, 2020):

- Opera sin conexión, lo que significa que facilita el envío de datagramas a través de la red sin requerir una conexión previamente establecida entre el emisor y el receptor.
- Hace uso de puertos reservados que están en un rango de 0 a 1023 para los servicios fijos.
- Permite una conexión instantánea y sin retardos, esto gracias a que no se requiere tener una configuración de conexión. Esto implicaría cuando exista la pérdida de un paquete afectaría a la calidad de la transmisión.
- No ofrece ninguna garantía de seguridad ni integridad de los datos que se están transmitiendo, esto se debe a que no cuenta con un sistema mutuo de acuse en la transmisión.
- Este protocolo es útil para aplicaciones como: Aplicaciones ligeras, aplicaciones basadas en best effort delivery, aplicaciones con mecanismos propios para una transmisión más fiable, aplicaciones multicast y aplicaciones en tiempo real.

2.4.2.4 TCP (*Transmission Control Protocol*)

El Protocolo de Control de Transmisión (TCP) destaca como uno de los protocolos esenciales en la infraestructura de Internet, permitiendo la comunicación fiable entre aplicaciones independientemente de las capas inferiores del modelo TCP/IP. En este contexto, los routers, ubicados en la capa de red del modelo TCP/IP, simplemente se encargan de enviar los segmentos TCP sin la preocupación de la integridad de llegada de los datos. TCP ofrece soporte a diversos protocolos de la capa de aplicación, como HTTP, HTTPS, POP3, SMTP y sus variantes seguras mediante Transport Layer Security (TLS). Además, TCP se emplea en protocolos críticos como FTP, FTPES y SFTP para la transferencia segura de archivos de un origen a un destino. (DE LUZ, 2023)

En TCP se maneja un tamaño máximo de bytes (MSS) que puede enviarse en un solo segmento que normalmente tiene una longitud variable de al menos 20 Bytes o 160 bits, además, posee de un mecanismo complejo para el control de errores para que todos los datos lleguen de manera correcta, los diferentes métodos de corrección de errores son los siguientes (DE LUZ, 2023):

- Checksum

- Numeración de todos los segmentos para un correcto control.
- Confirmaciones ACK selectivas, también se puede acumular los segmentos para que a través de un solo ACK se puedan confirmar varios.
- Temporizadores: si la transmisión demora mucho tiempo, TCP de forma automática vuelve a transmitir el segmento.
- Los segmentos duplicados se eliminan, suele ocurrir en la retransmisión de segmentos.
- Si TCP detecta un error volverá a iniciar la transmisión sin involucrar a la capa de aplicación.
- Los datos llegan en orden, es decir, en el mismo orden que fueron enviados serán recibidos.
- Permite realizar control de flujo, es decir, TCP se adapta dinámicamente aprovechando siempre al máximo el ancho de banda.
- Permite control de congestión lo que involucra que no exista pérdida de paquetes por causa de que los routers se encuentren congestionados.

2.4.3 Protocolos de comunicación para la capa de aplicación

Los protocolos de comunicación IoT que están definidos en la capa de aplicación, se utilizan para codificar la información que se envía a través de una determinada red, existen dos metodologías para los protocolos de comunicación para aplicaciones IoT que son: cliente – servidor y publicación – suscripción.

- **Modelo de comunicación Cliente-Servidor**

Este modelo de comunicación que se indica en la Ilustración 2-21, es una de las más tradicionales ampliamente utilizada en tecnología de redes, definiendo la interacción entre un cliente y un servidor. Actividades habituales como el envío de solicitudes HTTP a servidores web o la transferencia de archivos mediante FTP ejemplifican casos de usos típicos. Para el modelo Cliente-Servidor, un servidor atiende a varios clientes, gestionando múltiples solicitudes de diferentes usuarios, el servidor desempeña su función de manera continua y receptiva. En contraste, el cliente solicita los servicios del servidor e inicia las operaciones correspondientes, por tanto, el cliente debe conocer de antemano el servidor para conectarse a este. (IONOS, 2023)

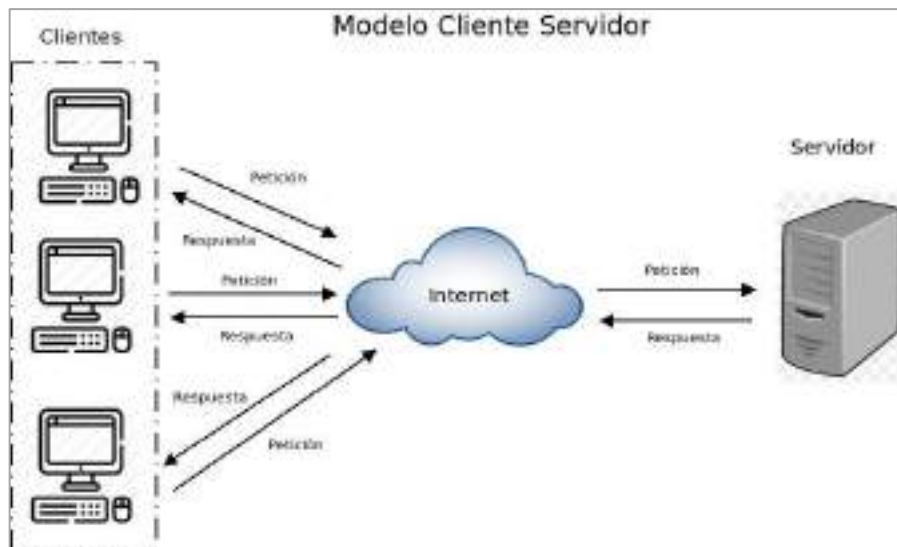


Ilustración 2-21: Modelo Cliente – Servidor

Fuente: Schiaffarino A., 2019

- **Modelo de comunicación Publicación-Suscripción**

El enfoque del modelo de comunicación Publicación-Suscripción como se muestra en la Ilustración 2-22, posibilita una arquitectura orientada a eventos, fundamental en diversas aplicaciones contemporáneas, permite el uso de eventos para desencadenar y facilitar la comunicación entre servicios independientes. Un evento representa un cambio de estado o una actualización, como agregar un artículo al carrito de compras. La mensajería de publicación – suscripción proporciona beneficios sustanciales a los desarrolladores que diseñan aplicaciones basadas en eventos en tiempo real. (AWS, 2023)

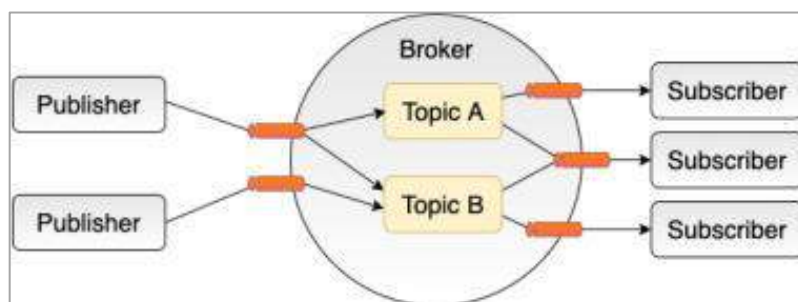


Ilustración 2-22: Modelo Publicación – Suscripción

Fuente: ELSEVIER, 2022

En este modelo, el proveedor de información (publicador) no requiere conocimiento sobre quiénes son los usuarios de la información que ofrece, y el receptor de la información (suscriptor) no necesita conocer la identidad del proveedor de la información que recibe como consecuencia

de su suscripción. Se tiene servidores intermedios, conocidos como brokers donde se genera la suscripción, por tanto, solo los brokers conocen la identidad de los suscriptores, estos brokers no almacenan datos, únicamente toman la información de los publicadores para pasarle a los suscriptores. Además, este modelo maneja la arquitectura de software Data Distribution Service (DDS) que maneja los espacios lógicos de datos globales intercambiando mensajes de manera eficiente en tiempo real entre aplicaciones distribuidas.

2.4.3.1 CoAP (Constrained Application Protocol)

El protocolo de comunicación CoAP define una arquitectura cliente – servidor y se basa en el modelo de publicación – suscripción, similar a HTTP, con la diferencia que HTTP utiliza el protocolo TCP en la capa de transporte y CoAP hace uso de UDP para el intercambio de mensajes. CoAP al igual que HTTP se fundamenta en la arquitectura REST como se muestra en la Ilustración 2-23, diseñada para sistemas distribuidos, dentro de esta estructura coexisten clientes y servidores, siendo los clientes los que envían las solicitudes a los servidores, y estos últimos por lo general, responden proporcionando una representación del recurso solicitado. (GIMENO GIMENEZ, 2013)

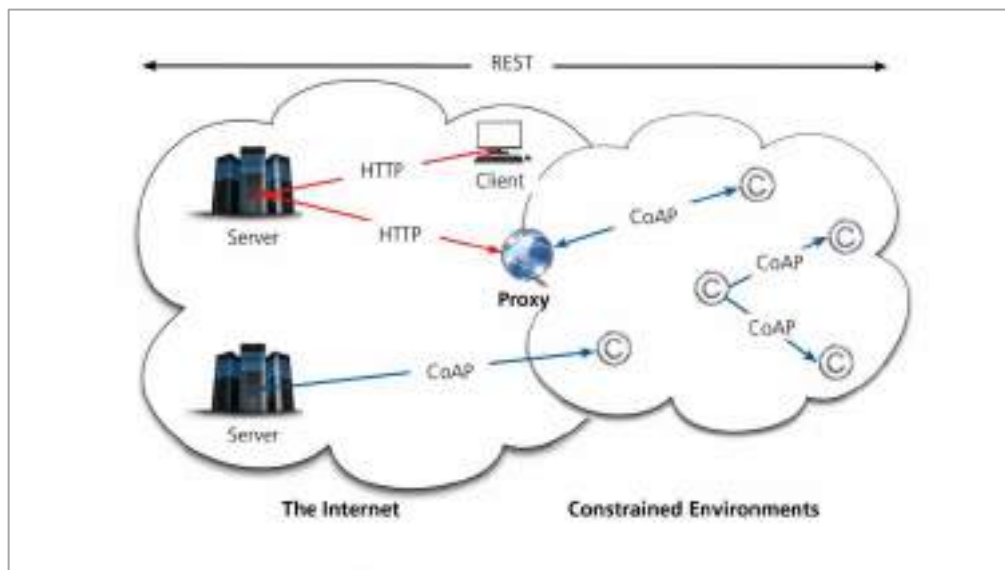


Ilustración 2-23: Arquitectura CoAP

Fuente: (BASSI, 2021)

Es importante destacar que CoAP no se limita únicamente a ser una adaptación del protocolo HTTP a las condiciones de las redes de sensores inalámbricos (WSN). Va más allá al ofrecer una serie de características fundamentales para las aplicaciones máquina a máquina (M2M), como el descubrimiento de recursos alojados en distintos servidores de la red, el respaldo de

comunicaciones multicast y el intercambio asíncrono de mensajes, entre las principales características de CoAP se encuentran (GIMENO GIMENEZ, 2013):

- Protocolo web diseñado para cumplir con los requisitos de las aplicaciones máquina a máquina (M2M).
- Establece conexiones UDP con la opción de confiabilidad, brindando soporte para transmisiones tanto unicast como multicast.
- Implementa la transmisión asíncrona de mensajes.
- Posee un bajo overhead y se caracteriza por su facilidad de mapeo a HTTP.
- Identificación de recursos a través de Interfaz de Recursos Uniformes (URI) y Content – Type.
- Se puede integrar REST, permitiendo flexibilidad.
- Suscripciones mediante publicación – suscripción.
- Intercambio de datos entre el cliente y el servidor sin la necesidad de actualizar todos los datos.
- Se usa seguridad DTLS (Datagram Transport Layer Security), garantizando integridad y confiabilidad.

Métodos CoAP

Para facilitar el intercambio de mensajes, CoAP se divide en dos subcapas distintas. En primer lugar, está la capa “Message”, encargada de establecer la interfaz con UDP y de manejar la recepción y envío de mensajes de manera asíncrona. En segundo lugar, la capa “Request/Response” se encarga de gestionar la interacción entre las solicitudes y sus respectivas respuestas. En la Ilustración 2-24 se muestra una comparativa de las capas que se utilizan en CoAP y HTTP para una mayor comprensión. (BASSI, 2021)

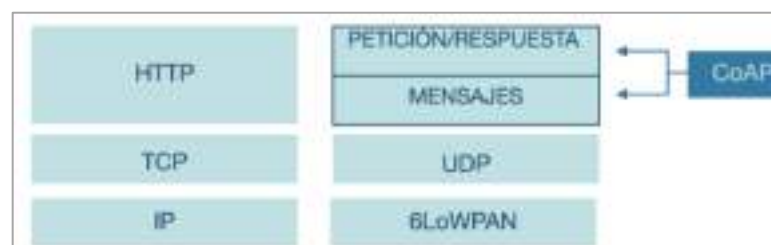


Ilustración 2-24: Comparativa de las capas utilizadas en CoAP y HTTP

Fuente: (BASSI, 2021)

Para realizar las peticiones haciendo uso del protocolo de comunicación CoAP se tiene a disposición cuatro métodos como GET (leer información de un recurso), POST (crear un recurso en el servidor), PUT (actualizar un recurso existente), DELETE (elimina un recurso) que pueden ser aplicados sobre un recurso.

2.4.3.2 AMQP (Advanced Message Queuing Protocol)

El protocolo AMQP es un protocolo de la capa de aplicación que establece pautas para la creación, encolamiento y entrega precisa de mensajes. Su arquitectura incluye un broker de mensajería con exchanges (funciona como un intermediario para manejar los mensajes y distribuirlos de manera correcta basándose en reglas), donde se conectan los productores de mensajes, y colas que se vinculan a los exchanges mediante criterios específicos. Los consumidores se conectan a las colas para extraer los mensajes generados por los publicadores como se muestra en la Ilustración 2-25. (BASSI, 2021)

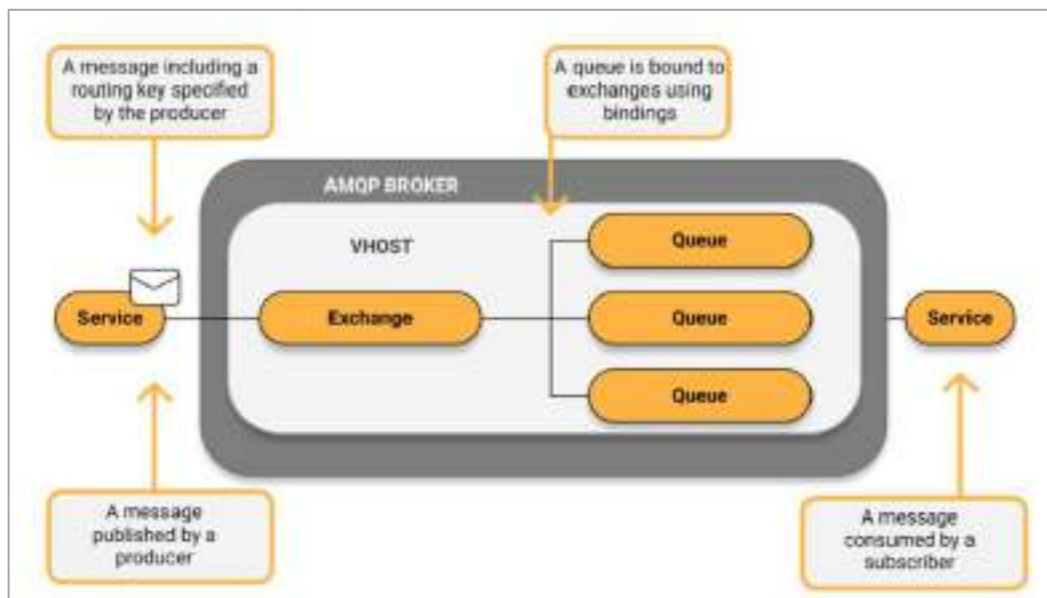


Ilustración 2-25: Diagrama de arquitectura de AMQP

Fuente: (BASSI, 2021)

Este protocolo puede cumplir la función tanto de servidor de mensajería como de los clientes conectados al broker. Proporciona interoperabilidad entre implementaciones de diferentes proveedores, permitiendo la creación de aplicaciones multiplataforma mediante agentes, bibliotecas y frameworks heterogéneos, todos independientes del proveedor. El formato de AMQP sirve como unidad de trabajo para el intercambio de información, ofreciendo funcionalidades como la entrega fiable de mensajes, representación de datos en diversos formatos, flexibilidad en la definición de datos, preparación para la escalabilidad y capacidad para establecer diversas topologías en un mismo sistema. (BASSI, 2021)

Las propiedades que ofrece este protocolo son adecuadas para aplicaciones IoT, ya que es posible implementarlos en dispositivos ubicados en el borde o edge, en la nube, infraestructuras locales y ejecutarlo mediante contenedores de software.

Entidades AMQP

Las entidades empleadas por AMQP para la transferencia de mensajes entre aplicaciones se definen dentro de un canal, asegurando la creación lógica de elementos esenciales para la comunicación, como un exchange, una cola (Queue) para recibir mensajes y la vinculación entre dichas entidades. (BASSI, 2021) AMQP define las siguientes entidades:

- **Broker:** Se encarga de distribuir los mensajes a los clientes usando el protocolo AMQP.
- **Usuario:** Es la entidad que se puede conectar a un broker.
- **Conexión:** se la realiza de manera física haciendo uso del protocolo de transporte como TCP/IP o SCTP que lo realiza el usuario.
- **Canal:** Es una conexión lógica.

En la Ilustración 2-26 se muestra el diagrama de comunicación de las entidades detalladas anteriormente.

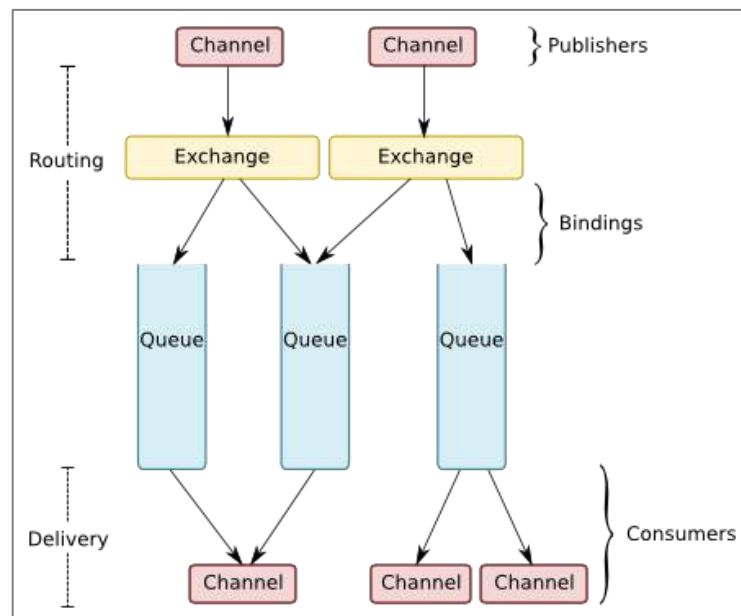


Ilustración 2-26: Diagrama entidades AMQP

Fuente: (BASSI, 2021)

Colas AMQP

Las colas en AMQP se distinguen por su nombre único que puede ser seleccionado por el cliente o puede ser asignado de manera automática por el broker. Una cola representa una porción de memoria vinculada a almacenamiento, que puede ser volátil o no volátil, la presencia no volátil garantiza la continuidad de la cola incluso después de reiniciar el broker. El sistema intrínseco del protocolo AMQP facilita el envío de mensajes a las colas y asegura su procesamiento mediante un mecanismo de ACK, este mecanismo posibilita la confirmación de recepción y procesamiento adecuado del mensaje, en caso de que el mensaje no llegue correctamente el broker vuelve a ponerlo en cola al mensaje. (BASSI, 2021)

2.4.3.3 MQTT (MQ Telemetry Transport)

El protocolo de comunicación MQTT es ampliamente utilizado IoT, concebido por IBM en 1999 para establecer conexiones rentables y confiables entre dispositivos de monitoreo, como sensores y actuadores en las industrias de petróleo y gas, así como servidores empresariales remotos a través de enlaces satelitales. MQTT utiliza una topología de estrella donde los mensajes se transmiten a través del modelo publicación / suscripción, en esta estructura los clientes remotos se conectan al nodo central llamado broker como se muestra en la Ilustración 2-27. (BASSI, 2021)

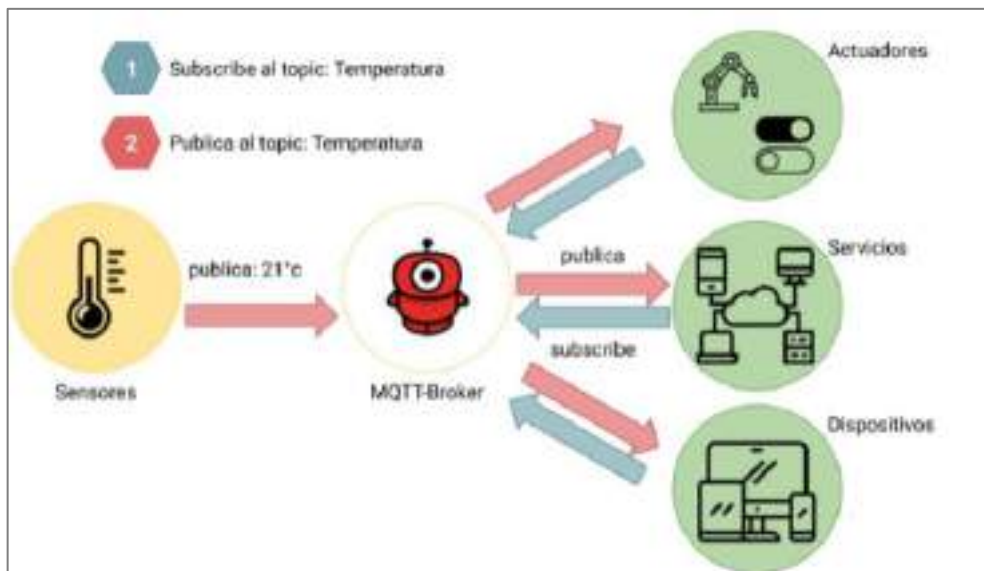


Ilustración 2-27: Funcionamiento protocolo MQTT

Fuente: Murky Robot, 2023

MQTT fue diseñado con el propósito de minimizar el consumo de recursos en dispositivos (CPU, RAM, ROM), asegurar confiabilidad y ofrecer diferentes niveles de calidad de servicio (QoS). Es un protocolo que opera con un bajo ancho de banda manteniendo la continua comunicación entre

el broker y sus clientes, tomando en cuenta que mantiene principalmente el enlace entre dispositivos asociados a sensores y actuadores, y elementos de software como servidores web, bases de datos y herramientas de análisis. (BASSI, 2021)

Entre las principales características del protocolo MQTT se pueden destacar las siguientes:

- Es un protocolo de comunicación que opera con el modelo de publicación – suscripción.
- Es ligero y eficiente, los encabezados del protocolo MQTT son muy pequeños lo que permite optimizar el ancho de banda de la red y consume una cantidad mínima de recursos.
- Maneja comunicación bidireccional permitiendo que los mensajes se envíen desde el dispositivo a la nube y viceversa.
- Permite escalabilidad permitiendo conectarse con millones de dispositivos IoT.
- Ofrece seguridad a través del cifrado de mensajes mediante TLS y autenticación del usuario haciendo uso de modernos protocolos como OAuth.
- Confiabilidad en la entrega de mensajes, lo cual es importante en aplicaciones IoT dependiendo su uso, se manejan tres niveles de calidad de servicio (QoS)
- Utiliza mecanismo de routing de uno a uno (unicast), uno a muchos (multicast), muchos a muchos (broadcast).
- Es fiable al estar constituido por TCP.
- Ideal para aplicaciones Máquina a Máquina (M2M).

QoS (Calidad de Servicio)

MQTT ofrece tres niveles distintos de calidad de servicio para el envío de mensajes según lo requiera el usuario para una ampliación determinada como se muestra en la Ilustración 2-28, determinando que mientras es mayor el valor de QoS el rendimiento se verá reducido.

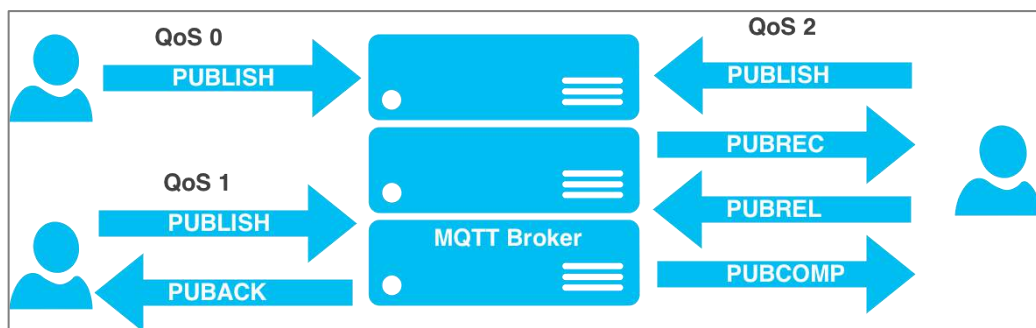


Ilustración 2-28: Niveles de calidad de servicio (QoS) para MQTT

Fuente: (BASSI, 2021)

- **At most once (QoS 0):** el mensaje se envía una sola vez, si el sistema llegase a fallar existe la probabilidad de que cierto mensaje no llegue correctamente. No se hacen retransmisiones.
- **At least one (QoS 1):** El mensaje es enviado hasta que el receptor confirme su recepción, esto implica el reenvío de mensajes hasta que llegue correctamente, pero hay la posibilidad de producir mensajes duplicados.
- **Exactly once (QoS 2):** Asegura que el mensaje sea entregado al suscriptor exactamente una vez, lo cual implica una sobrecarga en la comunicación, pero llega a ser la mejor opción cuando no se aceptan mensajes duplicados.

Mensajes MQTT

En el contexto de MQTT, cada mensaje se compone de una cabecera fija, una cabecera variable (opcional), una carga útil (payload) y un nivel de calidad de servicio QoS. A diferencia de los protocolos convencionales como XML o JSON, MQTT también admite Binary Large Object (BLOBS) con un límite de tamaño de hasta 256 MB. En la Ilustración 2-29 se muestra la trama del mensaje para el protocolo MQTT. (BASSI, 2021)

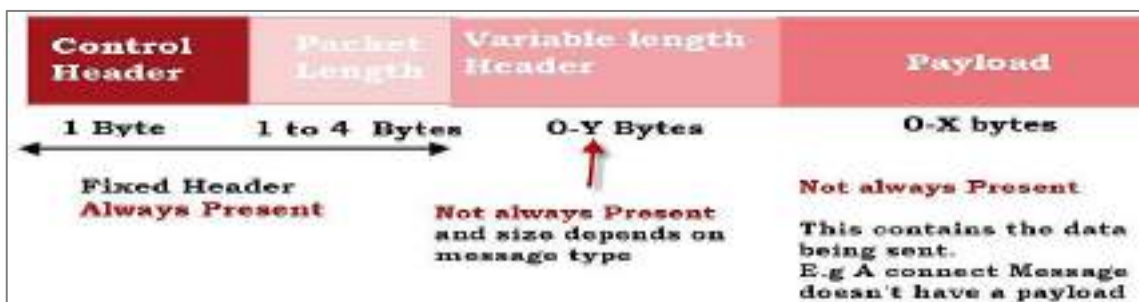


Ilustración 2-29: Trama para mensaje del protocolo MQTT

Fuente: (BASSI, 2021)

MQTT cuenta con 14 mensajes diferentes, pero en la mayoría de los casos se hace uso de los mensajes que se menciona a continuación (BASSI, 2021):

- **Connect:** Es usado para iniciar la comunicación con el broker, se le proporciona una identidad al cliente, se puede implementar una conexión cifrada haciendo uso de SSL/TLS que proporcionan un certificado de autenticación.
- **Ping:** En MQTT se pueden usar los paquetes PINGREQ/PINGRESP para comprobar si la conexión se sigue manteniendo activa a través del envío de paquetes (Keep Alive).

- **Suscribirse:** Se hace uso de los paquetes SUBSCRIBE/SUBACK para informar al broker de que tópico está solicitando cada cliente. Del mismo modo el cliente también puede cancelar su suscripción haciendo uso de los paquetes UNSUBSCRIBE/UNSUBACK.
- **Publicar:** Hace uso del paquete PUBLISH y envía un bloque con los datos que contiene el mensaje para ser enviado al broker.
- **Desconectar:** Envía el paquete DISCONNECT al broker informándole que tanto sea el suscriptor o publicador finalizan la conexión, pese a ello el cliente se puede volver a conectar al broker con la misma sesión.

LWT (Última Voluntad y Testamento)

La función de Last Will And Testament o Última Voluntad y Testamento (LWT) en MQTT desempeña un papel fundamental en asegurar una comunicación eficaz y preservar la integridad del sistema en situaciones de desconexión imprevista por parte del cliente. Al emplear LWT junto con mensajes retenidos, los programadores tienen la capacidad de almacenar y compartir el estado del cliente en temas específicos, suministrando información valiosa a otros clientes suscritos. El broker al detectar una desconexión transmite el último mensaje de voluntad a todos sus clientes suscritos a un tema en específico, ofreciendo una respuesta efectiva ante desconexiones imprevistas. (HIVEMQ, 2023)

2.4.3.4 Websocket

El protocolo de comunicación Websocket se fundamenta en TCP y proporciona directrices para el eficiente y fiable intercambio de datos entre sus redes. Su amplia utilización en diversos clientes se debe a su confiabilidad, TCP, como protocolo subyacente, simplifica la conexión entre dos puntos finales de comunicación denominados “sockets”, posibilitando el intercambio bidireccional de datos. En el contexto de Websocket, se logra un intercambio simultáneo de datos en ambas direcciones, mejorando la velocidad de acceso a la información, se posibilita una comunicación directa entre una aplicación web y un servidor Websocket, lo que simplifica que la información solicitada se muestre en tiempo real, ofreciendo una experiencia más inmediata y dinámica. (IONOS, 2020)

El protocolo de Websocket es similar al de HTTP a diferencia que HTTP maneja un modelo de solicitud – respuesta, en cambio Websocket mantiene un modelo de comunicación bidireccional, es decir que cuando se establece la conexión entre el cliente y el servidor el canal de comunicación permanece abierto todo el tiempo, recibiendo la información actual en tiempo real sin la necesidad

de volver a realizar una solicitud de actualización como sucede en HTTP. En la Ilustración 2-30 se puede apreciar esta diferencia entre ambos protocolos.

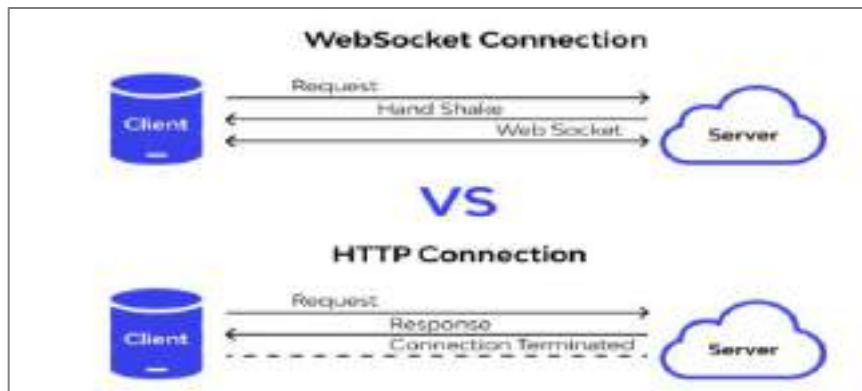


Ilustración 2-30: Protocolo WebSocket vs HTTP

Fuente: Geekflare, 2023

El protocolo WebSocket ha introducido la posibilidad de acceder a contenido web de manera dinámica en tiempo real, lo que simplifica el proceso de requerir que el cliente establezca una conexión con el servidor, validada a través de un apretón de manos conocido como “WebSocket Protocol Handshake”. Durante este proceso el cliente transmite al servidor los datos de identificación necesarios para facilitar el intercambio de información. Una vez completado el apretón de manos el canal de comunicación permanece abierto, permitiendo visualizar la información de manera proactiva, sin que el usuario tenga que solicitarlo. (IONOS, 2020)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta el proceso para el diseño e implementación del prototipo IoT para medir las características físicas del agua en los tanques de agua ubicados en los sectores Huillis y Guanando. Asimismo, se realiza el análisis correspondiente para la selección de las tecnologías de comunicación a ser utilizadas en cada una de las capas de comunicación además de los sensores y microcontroladores adecuados para el prototipo. Dando a conocer el funcionamiento del prototipo IoT a nivel de hardware y software en cada una de sus capas.

3.1 Estudio del lugar de implementación

El monitoreo de las características físicas del agua para consumo humano se llevará a cabo en los tanques que se encuentran ubicados en los sectores de Huillis y Guanando, mismo que pertenecen a la Junta de Agua de Consumo Humano Huillis – La Providencia. El tanque de captación se encuentra ubicado en la localidad de Huillis en las siguientes coordenadas latitud -1.481516° y longitud -78.543429° a una altitud aproximada de 2848 msnm, mismo que se abastece de una fuente de agua subterránea. El tanque de distribución para el sector de Guanando se encuentra en las siguientes coordenadas latitud -1.544945° y longitud -78.545663° a una altitud aproximada de 2412 msnm como se indica en la Ilustración 3-1.

En la Tabla 3-1 se especifican las medidas de cada uno de los tanques ubicados en los sectores de Huillis y Guanando.

Tabla 3-1: Medidas de los tanques de agua ubicados en los sectores de Huillis y Guanando

Lugar	Ancho (W)	Largo (L)	Altura (H)	Nivel Max. Agua (N)
Guanando	4 m	8 m	3 m	2,20 m
Huillis	1,85 m	1,85 m	1,80 m	1,30 m

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

De las medidas tomadas en cada uno de los tanques se obtiene el volumen de agua para el tanque ubicado en el sector de Guanando con la ecuación 3-1, donde se toma en cuenta que el espesor de las paredes que recubren el tanque es de aproximadamente 21 cm y para el tanque ubicado en el sector de Huillis con la ecuación 3-2, donde se toma en cuenta que el espesor de las paredes del tanque es de aproximadamente 12 cm, por tanto, se debe considerar que las medidas tomadas son de los extremos exteriores de las paredes de los tanques para ambos casos.

$$V_G = (W - 0.42) \times (L - 0.42) \times N \quad [\text{m}] \quad (3-1)$$

$$V_H = (W - 0.24) \times (L - 0.24) \times N \quad [\text{m}] \quad (3-2)$$

Dónde:

V_G : Capacidad máxima del volumen de agua para el tanque de Huillis.

V_H : Capacidad máxima del volumen de agua para el tanque de Huillis.

W: Ancho del tanque.

L: Largo del tanque.

N: Nivel máximo de alto para el agua.

Aplicando los valores de la Tabla 3-1 en las ecuaciones 3-1 y 3-2 con las respectivas consideraciones se obtiene la capacidad máxima del volumen de agua para el tanque de Guanando y Huillis. A partir del volumen de capacidad de cada tanque se puede obtener la capacidad en Litros hasta su nivel máximo considerando que por cada metro cúbico de capacidad se pueden almacenar 1000 Litros de agua, por tanto, para el tanque ubicado en el sector de Huillis se tiene una capacidad total de 3370 Litros de agua, y para el tanque ubicado en el sector de Guanando se tiene una capacidad total de 59700 Litros de agua.

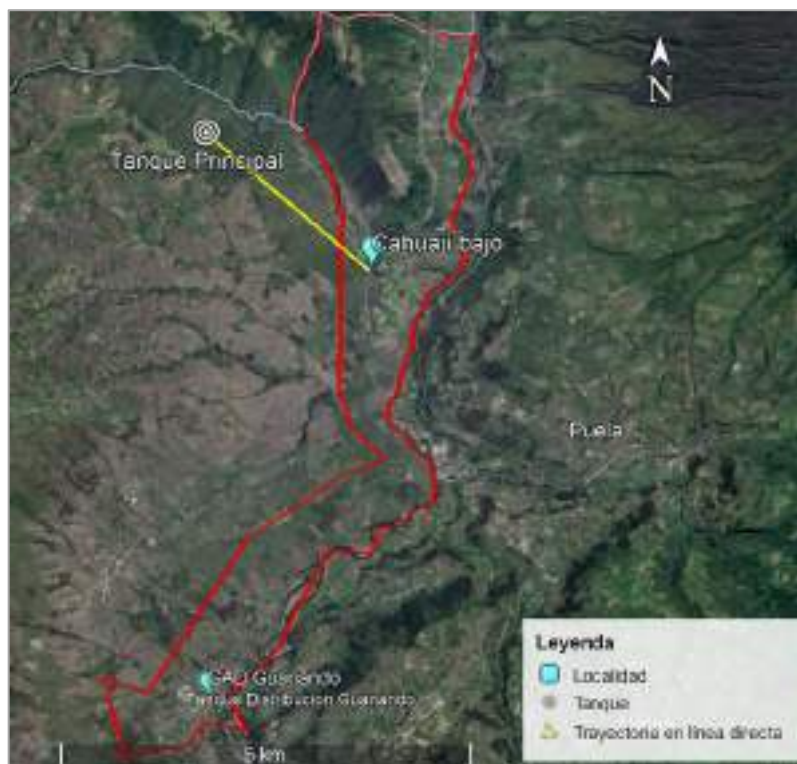


Ilustración 3-1: Ubicación de los tanques en los sectores de Huillis y Guanando

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.1.1 Estudio de la geografía desde el tanque de Guanando hasta el GAD de Guanando

Para llevar a cabo el estudio de la geografía se realiza de manera presencial en el sitio y haciendo uso del software de Google Earth. En primera instancia se realiza el estudio de forma presencial en el lugar, donde se evidencia que desde la ubicación del tanque de distribución de Guanando hasta el GAD de Guanando en la mayoría de su trayectoria existe línea de vista directa excepto por una parte de la trayectoria que se encuentra la iglesia de la parroquia, misma que cubre en su totalidad la edificación del GAD de Guanando, lugar donde se encontrará ubicado el nodo receptor como se indica en la Ilustración 3-2.



Ilustración 3-2: Trayectoria de transmisión desde tanque de Guanando hasta GAD Guanando

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En segunda instancia se hace uso del software de Google Earth para comprobar la línea de vista que existe en la geografía del terreno desde el punto de transmisión (tanque de Guanando) hasta el punto de recepción (GAD de Guanando), además de obtener la distancia que existe entre estos dos puntos. Como resultado se tiene una distancia entre el punto de transmisión hasta el punto de recepción de aproximadamente 291 m en línea recta, geográficamente según el perfil de elevación que se puede visualizar en la parte inferior de la Ilustración 3-3 no existe ningún obstáculo en la trayectoria, sin embargo como se mencionó anteriormente existe la edificación de la iglesia parroquial que impide que en la comunicación haya línea de vista directa, por lo que la tecnología de comunicación debe tener la capacidad de atravesar dicho obstáculo para una correcta transferencia de los datos.



Ilustración 3-3: Análisis de trayectoria de comunicación desde tanque de Guanando hasta GAD Guanando en Google Earth

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.1.2 Estudio de la geografía desde el tanque de Huillis hasta cabecera de Cahujá Bajo

En primera instancia se realiza el estudio de forma presencial en el lugar, donde se evidencia que desde la ubicación del tanque principal de Huillis hasta la cabecera parroquial de Cahujá Bajo no existe línea de vista directa debido a la vegetación y elevadas montañas presentes en todo el trayecto, además de haber una distancia considerable desde el punto de transmisión hasta el punto de recepción como se puede apreciar en la Ilustración 3-4.



Ilustración 3-4: Trayectoria transmisión desde tanque de Huillis hasta cabecera de Cahujá Bajo

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En segunda instancia se hace uso del software de Google Earth para comprobar la línea de vista que existe en la geografía del terreno desde el punto de transmisión (tanque de Huillis) hasta el punto de recepción (cabecera parroquial de Cahuají Bajo). Como resultado se tiene una distancia entre el punto de transmisión hasta el punto de recepción de aproximadamente 2.7 Km en línea recta, geográficamente según el perfil de elevación que se puede visualizar que a 1 Km de distancia desde el nodo receptor existe la elevación de una montaña de 2921 msnm que impide tener una línea de vista directa para la comunicación del enlace, en la parte inferior de la Ilustración 3-5 se puede apreciar la trayectoria de elevación que existe en línea recta desde el transmisor hacia el receptor, tomando como referencia desde el nivel del punto de recepción hasta dicho obstáculo existe una elevación de la montaña de aproximadamente 520 m, lo cual representa un punto crítico a tomar en cuenta para la comunicación al no contar con línea de vista directa.



Ilustración 3-5: Análisis de trayectoria de comunicación desde tanque principal de Huillis hasta cabecera parroquial de Cahuají Bajo en Google Earth

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.2 Análisis de los requerimientos para el sistema de monitoreo IoT

Los requerimientos para el diseño del prototipo IoT para monitorear las características físicas del agua de consumo humano en los tanques ubicados en los sectores de Huillis y Guanando deben cumplir las siguientes condiciones desde la capa de percepción hasta la capa de aplicación.

- Selección de sensores que permitan una correcta lectura de las características físicas del agua que son pH, turbidez y TDS, además a estos se les incluye dos sensores adicionales que son el de temperatura y de distancia.
- Con los datos estudiados como entorno del lugar de implementación, geografía del terreno y distancia entre transmisor y receptor para la comunicación se debe realizar la selección de la tecnología de comunicación, ésta deberá permitir una comunicación a largo alcance y sobrepasar obstáculos con un mínimo consumo de energía.
- Protocolo de comunicación que sea funcional con la tecnología de comunicación adecuado para largas distancias.
- Envío de la información a través de la capa de red para poder llegar hasta el servidor con el uso de los correctos protocolos de comunicación IoT.
- Procesamiento y almacenamiento de la información ya sea usando servicios cloud computing o fog computing.
- Análisis de la información para toma de decisiones con respecto a los umbrales establecidos en la norma INEN 1108 para su control.
- Monitoreo de los datos en tiempo real o en determinadas horas del día según lo requiera.
- Historial de los datos censados de manera diaria, semanal y mensual.
- Acceso remoto desde cualquier lugar para el manejo de los datos que están siendo monitoreados.
- Autenticación para el usuario, al tratarse de una institución de gestión y manejo del agua debe tener acceso restringido a los datos que se están recuperando diariamente.

3.3 Análisis comparativo de tecnologías de comunicación LPWAN

En la Tabla 3-2 se realiza una comparativa entre las tecnologías de comunicación LPWAN que se detallaron en el capítulo 2 como son LoRa, Sigfox, NB-IoT y LTE-M para la capa de enlace físico, el análisis se lo realiza a través del método sinérgico o de Brown y Gibson que permite calificar acorde a las características de las diferentes tecnologías.

Tabla 3-2: Comparativa entre tecnologías de comunicación LPWAN para la capa de enlace físico

Características	LoRa	Sigfox	NB-IoT	LTE-M
Espectro	No licenciada ISM	No licenciada ISM	Licenciada (LTE)	Licenciada (LTE)
Distancia en línea de vista	< 20 Km	< 13 Km	< 18 Km	< 15 Km

Ancho de Banda	(125/250/500) KHz	1 KHz	180 KHz	1.4 MHz
Velocidad de datos	50 kbps	100 bps	DL: 160-250 kbps UL: 160-200 kbps	1 Mbps
Potencia transmisión	22 dBm	14 dBm	23 dBm	20 dBm
Seguridad	Encriptación AES-128	Firma mensaje con clave privada	Soporta mecanismos 3GPP S3	Autenticación usando MME

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

El espectro en las tecnologías LPWAN se refiere al modo de operación en términos de uso y acceso al espectro electromagnético, es decir, si operan sobre las bandas licenciadas o no licenciadas. Las bandas licenciadas requieren de un pago y autorización para poder ser utilizadas, mientras que las no licenciadas están abiertas para uso público.

La distancia en línea de vista es la medida en kilómetros, es utilizada para definir la distancia máxima que tiene cada tecnología para poder transmitir la información desde el transmisor hacia el receptor.

El ancho de banda es la capacidad máxima para la transmisión de datos entre el transmisor y receptor, está dada en KHz y MHz para los casos en análisis.

La velocidad de datos se refiere a la cantidad de datos que se pueden transmitir por segundo a través de la conexión inalámbrica y están dados en bps, Kbps y Mbps para los casos en análisis.

La potencia de transmisión es la cantidad de energía que se utiliza para enviar desde un transmisor señales hacia el receptor y este viene dado en unidades de decibelios - milivatios (dBm).

La seguridad se enfoca al nivel de robustez en la red de IoT para proteger la información durante su transmisión, cada tecnología maneja diferentes seguridades y se las puede clasificar de la siguiente manera: Firma de mensajes con clave privada (Altamente seguro), Encriptación AES-128 (Muy segura), mecanismos 3GPP S3 (Dependiente de la implementación y configuración) y autenticación usando MME (razonablemente segura).

En base a los parámetros de evaluación de cada una de las tecnologías se tiene una valoración de 1 a 4 estableciendo niveles de importancia como se indica en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Niveles de calificación

1	2	3	4
Nada Importante	Poco Importante	Importante	Muy importante

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Tabla 3-4 se muestra el análisis de cada una de las tecnologías usando los niveles de calificación asignados en la Tabla 3-3, la ponderación está acorde a las necesidades del prototipo IoT a implementar.

Tabla 3-4: Calificación de factores para tecnologías LPWAN

ID	Características	LoRa (A)	Sigfox (B)	NB-IoT (C)	LTE-M (D)
F1	Espectro	3	2	2	2
F2	Distancia en línea de vista	4	3	2	2
F3	Ancho de Banda	4	2	1	1
F4	Velocidad de datos	4	3	2	2
F5	Potencia transmisión	3	2	2	2
F6	Seguridad	3	2	1	1

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Luego se describe el grado de significancia de cada una de las características planteadas para el análisis:

- La distancia en línea de vista es el factor más importante entre todos.
- La potencia de transmisión es más importante que el ancho de banda.
- El ancho de banda es igual que la velocidad de datos.
- La velocidad de datos es más importante que el espectro.
- La seguridad es más importante que la velocidad de datos.
- El espectro es el factor con menor grado de importancia.

En la Tabla 3-5 se determina el grado de importancia para cada uno de los factores con valores binarios (0 - 1) de acuerdo con las condiciones establecidas anteriormente. El valor relativo o peso se determina con la Ecuación 3-3.

$$Peso_i = \frac{Total_i}{Suma} \quad (3-3)$$

Tabla 3-5: Grado de importancia de los factores para tecnologías LPWAN

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	Total	Peso
F1	-	0	0	0	0	0	0	0,0
F2	1	-	1	1	1	1	5	0,5
F3	0	0	-	1	0	0	1	0,1
F4	1	0	1	-	0	0	2	0,2
F5	0	0	1	0	-	0	1	0,1
F6	0	0	0	1	0	-	1	0,1
Suma							10	1

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Tabla 3-6 se obtiene el valor relativo o calificación cuantitativa para cada uno de los factores en base a cada una de las tecnologías analizadas para redes LPWAN. Los valores asignados en la Tabla 3-4 son utilizados dentro de la calificación cuantitativa. La calificación se obtiene a partir de la Ecuación 3-4.

$$Calif_i = \frac{Total_i}{Suma} \quad (3-4)$$

Tabla 3-6: Calificación cuantitativa de los factores para redes LPWAN

Factores	F1		F2		F3		F4		F5		F6	
	Tot	Calif	Tot	Calif	Tot	Calif	Tot	Calif	Tot	Calif	Tot	Calif
A	3	0,33	4	0,36	4	0,5	4	0,33	3	0,33	3	0,43
B	2	0,22	3	0,27	2	0,25	3	0,22	2	0,22	2	0,29
C	2	0,22	2	0,18	1	0,13	2	0,22	2	0,22	1	0,14
D	2	0,22	2	0,18	1	0,13	2	0,22	2	0,22	1	0,14
SUMA	9		11		8		11		9		7	

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Finalmente, en la Tabla 3-7 se determina que tecnología de comunicación LPWAN es la que recibe un valor total más alto, para su realización se traslada la columna del PESO de la Tabla 3-5 y las calificaciones obtenidas de la Tabla 3-6, para realizar un producto entre ambos valores de dichas tablas.

Tabla 3-7: Relación de valores cuantitativos con el peso de factores para tecnologías LPWAN

Ideas	PESO	A		B		C		D	
		Calif	Total	Calif	Total	Calif	Total	Calif	Total
F1	0,0	0,33	0	0,22	0	0,22	0	0,22	0
F2	0,5	0,36	0,18	0,27	0,135	0,18	0,09	0,18	0,09
F3	0,1	0,5	0,05	0,25	0,025	0,13	0,013	0,13	0,013
F4	0,2	0,33	0,066	0,22	0,044	0,22	0,044	0,22	0,044
F5	0,1	0,33	0,033	0,22	0,022	0,22	0,022	0,22	0,022
F6	0,1	0,43	0,043	0,29	0,029	0,14	0,014	0,14	0,014
			0,372		0,255		0,183		0,183

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

De los resultados obtenidos en la Tabla 3-7 se concluye que la tecnología de comunicación LPWAN que se ajusta a las necesidades para el prototipo de monitoreo IoT es la A que corresponde a LoRa, con un resultado favorable de un total de 0.372.

La tecnología LoRa se adapta a las necesidades presentes para ambos sectores de la implementación, es decir, nos permite un largo alcance y permite pasar los obstáculos durante la comunicación gracias a su modulación que se basa en CSS, además de tener la facilidad de usar el espectro no licenciado, por tanto, la tecnología LoRa se adapta a todas las necesidades planteadas.

3.4 Selección de protocolos de comunicación IoT

Para que la comunicación en todo el sistema IoT funcione correctamente se basa en los diferentes protocolos de comunicación que se utilizan en cada una de las capas como son capa de enlace local, capa de red y transporte y capa de aplicación. Para la capa de red se hace el uso del protocolo de comunicación LoRa como ya se realizó el análisis en el inciso 3.3.

3.4.1 Protocolo de comunicación para la capa de enlace local

El protocolo que se ajusta a las necesidades del prototipo IoT es la de WiFi (IEEE 802.11), además de ser una de las tecnologías más utilizadas para la comunicación a nivel de capa de enlace físico y local, este protocolo posee un amplio ancho de banda que aporta al mejor flujo de datos desde el nodo máster hacia la red. En la Tabla 3-8 se detallan las características técnicas de WiFi

Tabla 3-8: Características técnicas del protocolo de comunicación WiFi

Descripción	Características
Frecuencias de operación	2.4 / 5 GHz
Estándares	802.11 a/b/g/n/ac/ax
Ancho de Banda	2.4 GHz (20 MHz) 5 GHz (20/40/80/160 MHz)
Seguridad	WEP, WPA y WPA2/WPA3
Distancia promedio en línea vista	38 m
Modulación	FHSS, DSSS, OFDM

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.4.2 Protocolo de comunicación para la capa de red y transporte

Para la capa de red se elige el protocolo de comunicación IPv4 y por su facilidad de manejo para el desarrollo del prototipo IoT. Para la capa de transporte el protocolo que se ajusta a nuestras necesidades es el de TCP debido a su alta fiabilidad que permite la retransmisión de paquetes, que se traduce en no perder la información y ésta llegue al receptor tal cual lo envía el transmisor. En la Tabla 3-9 se detallan las características técnicas de IPV4 y TCP.

Tabla 3-9: Características técnicas de los protocolos de comunicación IPv4 y TCP

Capa de Red	
Protocolo	IPv4
Tamaño dirección	32 bits
Formato de dirección	192.168.0.1
NAT (Network Address Translation)	Si utiliza, permite que varios dispositivos de una red local compartan una dirección IP pública
Configuración automática de direcciones	Manual o mediante Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)
Seguridad	IPsec (Internet Protocol Security)
Capa de Transporte	
Protocolo	TCP
Uso	Orientado a la conexión, garantiza la entrega secuencial y confiable de datos
Fiabilidad	Entrega confiable, retransmisión de paquetes
Control	Implementa control de flujo y congestión
Detección de errores	Checksum (suma de verificación)

Unidad de Transmisión Máxima (MTU)	576 bytes
------------------------------------	-----------

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.4.3 Protocolo de comunicación para la capa de aplicación

El protocolo de comunicación que se ajusta a las necesidades del prototipo de monitoreo IoT es la de MQTT al manejar un modelo de comunicación de publicación – suscripción, además de transportar los datos con el protocolo TCP que permite alta fidelidad en el envío de información, también permite implementar calidad de servicio (QoS) en tres niveles distintos, ajustando un nivel de calidad acorde a las necesidades del sistema, añadido a esto MQTT posee la función de última voluntad y testamento (LWT) que asegura la comunicación eficaz y preserva la integridad del sistema en situaciones de desconexión imprevista por parte del cliente. En la Tabla 3-10 se detallan las características técnicas del protocolo de comunicación MQTT.

Tabla 3-10: Características técnicas del protocolo de comunicación MQTT

Descripción	Características
Modelo de comunicación	Publicación / Suscripción
Capa Transporte	TCP (MQTT-S: UDP)
Seguridad	TLS / SSL
Tipo	Basado en eventos
Interoperabilidad	Si (comunicación en entornos heterogéneos)
Tolerancia a fallos	El broker es el único punto de fallo
QoS	Tres niveles (QoS 0, QoS 1, QoS 2)
Direccionamiento	Solo tópicos
Tamaño máximo del mensaje	Se lo define en el broker
Lenguajes usados	Java, C, C++, C#, JavaScript, Python, Ruby, Go, PHP

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.5 Selección de software y hardware para la implementación del sistema IoT

Para llevar a cabo el diseño e implementación del prototipo IoT para monitorear las características físicas del agua de consumo humano es necesario hacer una selección del software hardware a utilizar en cada proceso en base a la arquitectura IoT de 3 capas.

3.5.1 Software y hardware para la capa de percepción

A nivel de la capa de percepción para desarrollar la implementación del sistema de monitoreo IoT con respecto a hardware se selecciona los diferentes sensores y tarjetas de desarrollo que se ajustan a las necesidades del sistema y para el software se hace uso de Arduino IDE.

3.5.1.1 Arduino Nano v3

El Arduino Nano v3, Ilustración 3-6, es una tarjeta de desarrollo pequeña en relación con las demás versiones de Arduino, fundamentada en el microcontrolador ATmega328. Su funcionamiento está sustentado mediante un cable USB Mini-B en lugar de uno convencional.



Ilustración 3-6: Arduino Nano v3

Fuente: AVElectronics, 2023

En la Tabla 3-11 se detallan las características técnicas del Arduino Nano v3.

Tabla 3-11: Características técnicas de Arduino Nano v3

Descripción	Características
Voltaje funcionamiento	5 V
Voltaje de entrada recomendado	7 – 12 V
Memoria flash	32 KB, de los cuales 2KB son usados por el gestor de arranque
Pines E/S Digitales	14 (6 proveen de salida PWM)
Entradas analógicas	8 corriente máx en cada PIN de E/S:mA
Frecuencia de reloj	16 MHz
Precio	12 USD

Fuente: AVElectronics, 2023

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.5.1.2 Sensor de potencial de hidrógeno (pH)

El sensor de potencial de hidrógeno (pH), Ilustración 3-7, mide el nivel de pH dentro del agua en un rango de medición de 0 a 14 pH, este dispositivo evalúa el nivel de acidez o alcalinidad del líquido y proporciona una señal analógica que corresponde directamente a la medición de pH. Incorpora un potenciómetro que facilita la calibración del sensor para una correcta lectura.



Ilustración 3-7: Sensor de pH (PH-4502C)

Fuente: USINAINFO, 2023

En la Tabla 3-12 se detallan las características técnicas del sensor de potencial de hidrógeno pH

Tabla 3-12: Característica técnicas del sensor de pH (PH-4502C)

Descripción	Características
Modelo	PH-4502C con electrodo E201-BCN
Voltaje funcionamiento	5 V DC
Consumo de corriente	5 – 10 mA
Salida	Analógica
Temperatura de operación	0 a 60 °C
Rango de medición	0 – 14 pH
Precisión de datos	± 0,1 pH (25 °C)
Tiempo de respuesta	≤ 1 min
Precio	50 USD

Fuente: USINAINFO, 2023

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.5.1.3 Sensor de turbidez

El sensor de turbidez, Ilustración 3-8, emplea luz como medio de detección para identificar las distintas partículas suspendidas presentes en el agua mediante la medición de tasas de dispersión y transmitancia, estos sensores son diseñados para medir la calidad del agua en diferentes áreas. El sensor posee salidas tanto analógicas como digitales.

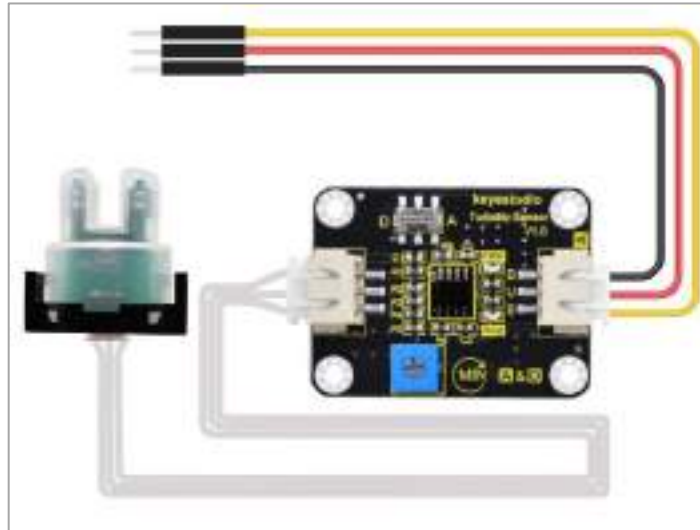


Ilustración 3-8: Sensor de Turbidez (KS0414)

Fuente: KEYESTUDIO, 2023

En la Tabla 3-13 se detallan las características técnicas del sensor de Turbidez (KS0414).

Tabla 3-13: Características técnicas del sensor de turbidez (KS0414)

Descripción	Características
Modelo	KS0414
Voltaje funcionamiento	5 V DC
Consumo de corriente	11 - 40 mA
Salida	Digitales /Analógicas
Temperatura de operación	5 °C a 90 °C
Rango de medición	0 – 4550 NTU
Precisión de datos	± 0.5 % FS
Tiempo de respuesta	< 500 ms
Precio	46 USD

Fuente: KEYESTUDIO, 2023

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.5.1.4 Sensor de sólidos disueltos totales (TDS)

El sensor de TDS, Ilustración 3-9, es utilizado para medir la concentración de sólidos disueltos, es decir, sustancias orgánicas e inorgánicas en el agua, su electrodo tiene la capacidad de medir materiales conductores, como sólidos suspendidos, metales pesados e iones conductores en el agua. (Keyestudio, 2021)

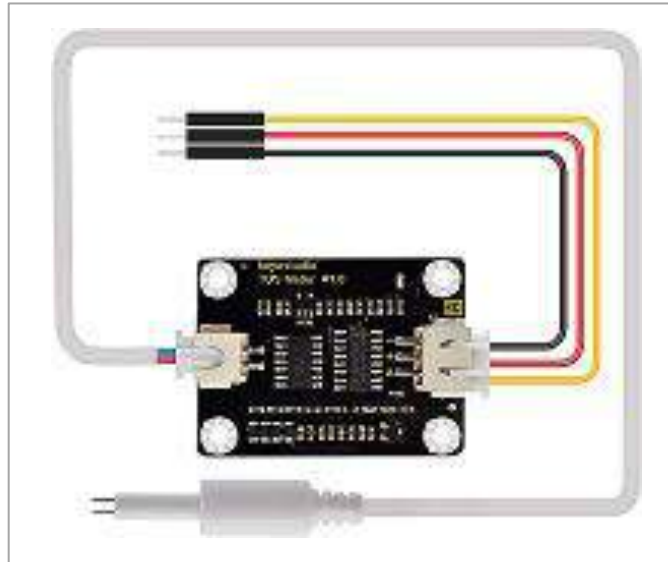


Ilustración 3-9: Sensor de TDS (KS0429)

Fuente: (Keyestudio, 2021)

En la Tabla 3-14 se detallan las características técnicas del sensor de Turbidez (KS0414).

Tabla 3-14: Características técnicas del sensor de turbidez KS0414

Descripción	Características
Modelo	KS0429
Voltaje entrada	CC 3,3 – 5,5 V
Voltaje de salida	0 – 2,3 V
Consumo de corriente	3 – 6 mA
Temperatura de operación	0 a 50 °C
Rango de medición	0 – 1000 ppm
Precisión de datos	± 10 % FS (25°C)
Tiempo de respuesta	≤ 1 min
Precio	35 USD

Fuente: (Keyestudio, 2021)

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.5.1.5 Sensor de temperatura

El sensor de temperatura de tipo sonda DS18B20, Ilustración 3-10, es impermeable utilizado para medir la temperatura dentro del agua o en condiciones de humedad. Este sensor es utilizado para funcionar a la par con el sensor de sólidos disueltos totales KS0429 para compensar las variaciones en la conductividad eléctrica que son generados por los cambios de temperatura del agua.



Ilustración 3-10: Sensor de temperatura DS18B20

Fuente: MaxElectrónica, 2023

En la Tabla 3-15 se detallan las características técnicas del sensor de temperatura DS18B20.

Tabla 3-15: Características técnicas del sensor de temperatura DS18B20

Descripción	Características
Modelo	DS18B20
Voltaje funcionamiento	5 V DC
Consumo de corriente	4 mA
Salida	Digital
Temperatura de operación	-55 °C a 125 °C
Rango de medición	-55 °C – 125 °C
Precisión de datos	± 0.5 °C para (-10 °C – 85 °C)
Tiempo de respuesta	< 750 ms
Precio	9 USD

Fuente: MaxElectrónica, 2023

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.5.1.6 Sensor de distancia

El sensor de distancia ultrasónico HC-SR04, Ilustración 3-11, cuenta con una buena precisión permitiendo determinar la distancia de un objeto en un rango de 2 a 450 cm, su funcionamiento se basa en un emisor piezoeléctrico que emite 8 pulsos de ultrasonido a 40 KHz, estas ondas viajan por el aire y rebotan al encontrar un objeto y dicho rebote es detectado por el receptor piezoeléctrico. (Naylamp Mechatronics, 2023)



Ilustración 3-11: Sensor de distancia HC-SR04

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2023)

En la Tabla 3-16 se detallan las características técnicas del sensor de distancia HC-SR04.

Tabla 3-16: Características técnicas del sensor de distancia HC-SR04

Descripción	Características
Modelo	HC-SR04
Voltaje funcionamiento	5 V DC
Consumo de corriente	15 mA
Frecuencia de ultrasonido	40 KHz
Temperatura de operación	-20 a 70 °C
Rango de medición	2 – 450 cm
Precisión de datos	± 3 mm
Tiempo de respuesta	20 ms
Precio	4 USD

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2023)

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.5.1.7 Arduino IDE

El software de Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), Ilustración 3-12, es de libre uso, es una plataforma de desarrollo que permite a cualquier usuario crear aplicaciones basadas en algoritmos sobre el lenguaje C++ para las placas Arduino, posibilitando así la asignación de diversas funcionalidades a estas placas, además el software permite compilar el código y la verificación de errores.

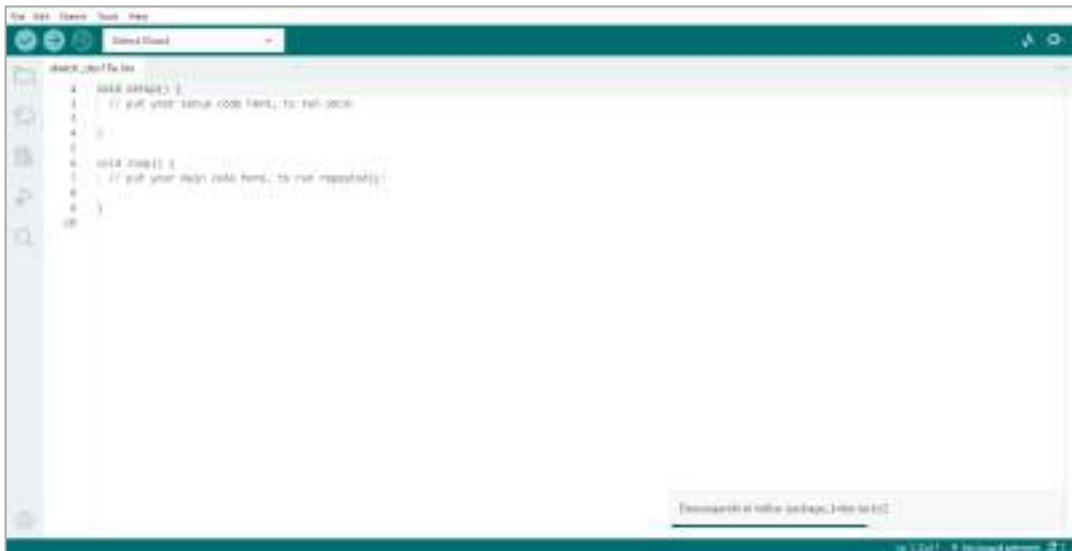


Ilustración 3-12: Software Arduino IDE

Fuente: Arduino, 2023

Para llevar a cabo el desarrollo del sistema de monitoreo IoT dentro del código de programación de Arduino IDE se hace uso de diferentes librerías tanto para el nodo esclavo como para el nodo maestro, mismas que se detallan a continuación:

Librerías para nodos esclavos (Arduino Nano):

- **#include <SoftwareSerial.h>:** Permite tener una comunicación tipo serie en diferentes pines digitales del microcontrolador Arduino.
- **#include <EEPROM.h>:** Permite leer y escribir los bytes de los valores guardados a pesar de que se apague el microcontrolador, funciona como un pequeño disco duro.
- **#include "GravityTDS.h":** Esta librería permite importar la configuración para el sensor de TDS en conjunto con su respectiva calibración asignada por el fabricante DFROBOT.
- **#include <OneWire.h>:** Permite acceder al sensor de temperatura de un cable.
- **#include <DallasTemperature.h>:** Esta librería permite la compatibilidad al circuito integrado del sensor de temperatura DS18B20.

- **#include <SPI.h>**: Facilita la comunicación SPI (Interfaz Periférica Serial) en Arduino, es decir, permite conectar los sensores, módulos de pantalla, convertidores digitales a digital, entre otros.
- **#include <Wire.h>**: Permite la comunicación con dispositivos que utilizan el protocolo de comunicación I2C (Circuito Inter-Integrado) para intercambiar datos con el microcontrolador.
- **#include <Separador.h>**: Permite separar de manera individual la información que está en formato de cadena de caracteres.
- **#include "MapFloat.h"**: Usada para mapear valores de tipo Float, esta librería se hace uso en los valores de turbidez para poder mapearlos de 0 a 300 NTU.

Librerías para nodos maestros (ESP32):

- **#include <WiFi.h>**: Permite establecer la conexión mediante WiFi a una red local estableciendo un escudo de conexión brindado por Arduino.
- **#include <HTTPClient.h>**: Permite realizar peticiones de tipo HTTP como GET, POST y PUT hacia un servidor en la internet.
- **#include <ArduinoJson.h>**: Ayuda a trabajar la programación en formato Json permitiendo la serialización, deserialización, asignación fija, entre otros. Nos ayuda específicamente para publicar los datos censados a manera de serie para poder luego recuperarlos y separarlos en Node-RED.
- **#include <PubSubClient.h>**: Esta es una biblioteca para el manejo de mensajería MQTT, permite la publicación y suscripción al broker MQTT.
- **#include <WiFiClient.h>**: Esta librería crea una especie de cliente para poder conectarse a una dirección IP específica.
- **#include <WiFiManager.h>**: Permite configurar la red de conexión WiFi a través de un portal de configuración web, lo hace más eficiente con respecto a conectividad.

3.5.2 Software y hardware para la capa de red

Para desarrollar la implementación del sistema de monitoreo IoT a nivel de la capa de red con respecto a hardware se selecciona los sensores que cumplan con los requerimientos del sistema, tomando en cuenta que para la capa de red la tecnología de comunicación más adecuada para largas distancias y bajo consumo de energía es LoRa como se lo determinó en el apartado 3.3.

3.5.2.1 Módulos LoRa

Los módulos LoRa permiten establecer comunicaciones a largas distancias utilizando la tecnología de espectro ensanchado inalámbrico con un bajo consumo de energía, alta sensibilidad y es muy fuerte ante interferencias gracias a su modulación CSS. Para la implementación del sistema de monitoreo IoT se hace uso de dos modelos diferentes de módulos LoRa, el modelo RYLR998, Ilustración 3-13, posee una menor distancia de cobertura, por tanto, se lo utiliza en la implementación del tanque ubicado en el sector de Guanando que tiene una distancia desde el transmisor hasta el receptor de 291 m como se realizó el estudio en el apartado 3.1.1, por otro lado se tiene el modelo RYLR993, Ilustración 3-14, que posee una mayor distancia de cobertura, por tanto, se lo utiliza en la implementación del tanque ubicado en el sector de Huillis que tiene una distancia desde el transmisor hacia el receptor de 2.85 Km como se realizó el estudio en el apartado 3.1.2. Cabe mencionar que ambos módulos son desarrollados por REYAX LoRa lo que permite tener compatibilidad entre ambos módulos lo que es esencial para la implementación.

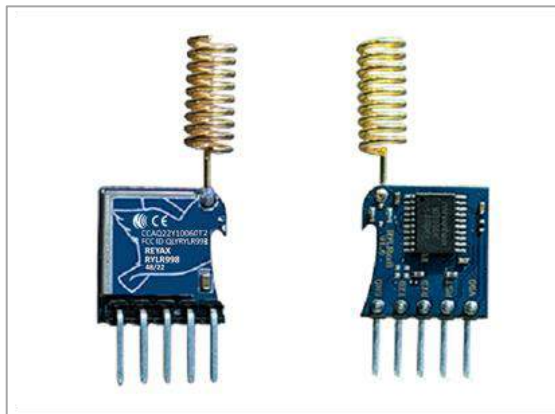


Ilustración 3-13: Módulo LoRa REYAX RYLR998

Fuente: REYAX, 2023

En la Tabla 3-17 se detallan las características técnicas del módulo transceptor de antena LoRa REYAX RYLR998.

Tabla 3-17: Características técnicas de módulo LoRa RYLR998

Descripción	Características
Frecuencia de operación	868 / 915 MHz
Voltaje funcionamiento	3.5 V DC
Distancia máxima en línea de vista	10 km
Rango de potencia de salida	-20 a 22 dBm
Sensibilidad RF	-129 dBm min

Velocidad de Baudios	300 / 900 / 115200 bps
Consumo energía	Transmisión: 140 mA Recepción: 17.5 mA Suspensión: 15 uA
Temperatura de operación	-40 °C a 85 °C
Precio	40 USD

Fuente: REYAX, 2023

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

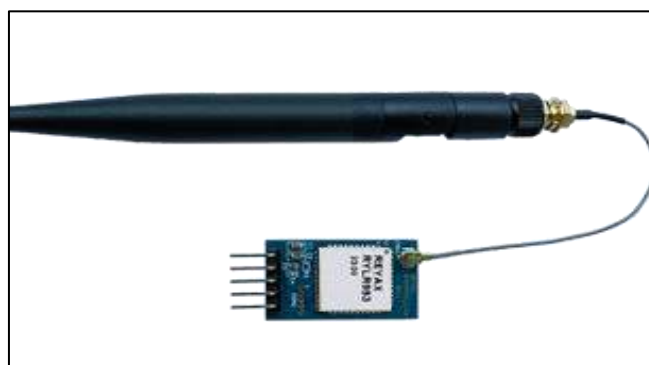


Ilustración 3-14: Módulo LoRa REYAX RYLR993

Fuente: REYAX, 2023

En la Tabla 3-18 se detallan las características técnicas del módulo transceptor de antena LoRa REYAX RYLR993.

Tabla 3-18: Características técnicas de módulo LoRa RYLR993

Descripción	Características
Frecuencia de operación	868 / 915 MHz
Voltaje funcionamiento	3.5 V DC
Distancia máxima en línea de vista	20 km
Rango de potencia de salida	-4 a 22 dBm
Sensibilidad RF	-148 dBm min
Velocidad de Baudios	9600 bps
Consumo energía	Transmisión: 140 mA Clase A: 5 uA Clase B y C: 5 mA
Temperatura de operación	-40 °C a 85 °C
Precio	60 USD

Fuente: REYAX, 2023

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023



Ilustración 3-16: Servidor de MQTT HiveMQ

Fuente: Tolocka, E., 2023

3.5.3 *Software y hardware para la capa de aplicación*

Para desarrollar la implementación del sistema de monitoreo IoT a nivel de la capa de aplicación se toma en cuenta que a nivel de esta capa se analiza, procesa y almacena la información receptada por los sensores, además en esta capa se crea la dashboard que será presentada para el usuario final, todo este proceso se lo realiza utilizando un sistema de Fog Computing.

3.5.3.1 *CPU Intel Core i3 4GB RAM*

El CPU cumple la función de un servidor local sobre el cual se va a receptor, procesar y almacenar la información que ha pasado por la capa de percepción y capa de red, aquí finalmente haciendo uso de programas adecuados se procesa dicha información de manera distribuida.

3.5.3.2 *Node-RED*

Node-RED, Ilustración 3-17, es una herramienta de programación visual que representa de manera gráfica las relaciones y funciones, esta plataforma está dedicada al Internet de las Cosas facilitando la programación sin la necesidad de escribir un código, ya que opera como un editor de flujo basado en el navegador permitiendo añadir o eliminar nodos y conectarlos entre sí para establecer la comunicación entre ellos según las necesidades. (VALENCIA, 2016) Además, se cuenta con una gran comunidad que ya define nodos para realizar funciones específicas lo que contribuye a la robustez y la continua evolución de la herramienta.

- **node-red-contrib-excel:** Convierte el mensaje (msg.payload) a formato Excel para escribirlo sobre un archivo de manera local, es usado para generar los reportes en formato Excel.
- **node-red-contrib-telegrambot:** La librería contiene un nodo receptor y uno transmisor que se asemejan a Telegram Bot para el envío o recepción de mensajes, en este proyecto se lo usa para enviar las notificaciones de alerta cuando los niveles de TDS, pH y turbidez están fuera del rango establecido por la norma INEN 1108.
- **node-red-contrib-ngrok:** Sirve para a través de un contenedor exponer y administrar los servicios de Ngrok a través de un túnel, es usado para obtener una dirección pública y acceder al dashboard desde cualquier lugar con acceso a internet.

3.5.3.3 Ngrok

Ngrok permite la conexión a redes externas de manera segura sin tener que realizar cambios en la configuración de la red permitiendo la conectividad IoT, Ngrok permitirá al usuario final conectarse a la dashboard de manera remota desde cualquier parte del mundo a través de un enlace, es decir, crea un túnel para hacer público el dashboard mediante el protocolo HTTP.

3.6 Diagramas del diseño de conexión

3.6.1 Esquema de conexión de alimentación del nodo maestro

Para la alimentación de energía para el nodo maestro se hace uso de un convertidor de voltaje DC-DC Step-Down MP1584, Ilustración 3-18, permite reducir el voltaje de una manera eficiente entregando un voltaje de salida más bajo al de la entrada soportando variaciones de voltaje en la entrada o de carga, el modelo MP1584 específicamente es un regulador de tipo conmutado que permite obtener un voltaje menor al de la fuente de entrada, es decir, de una fuente de batería de 12 V se puede obtener 5 V, 3.3 V, etc.



Ilustración 3-18: Convertidor de voltaje DC-DC Step-Down MP1584

Fuente: Proto Supplies, 2023

El diseño para la entrada de alimentación está dado para una fuente de 5 V y 12 V, para la entrada de 12 V se hace uso del convertidor de voltaje DC-DC MP1584 para obtener una salida nuevamente de 5 V que es el voltaje nominal con el que funciona la placa de desarrollo ESP32, además se dispone de un LED1 que es un indicador de funcionamiento de este circuito. En la Ilustración 3-19 se puede apreciar el esquema del bloque de alimentación del nodo maestro.

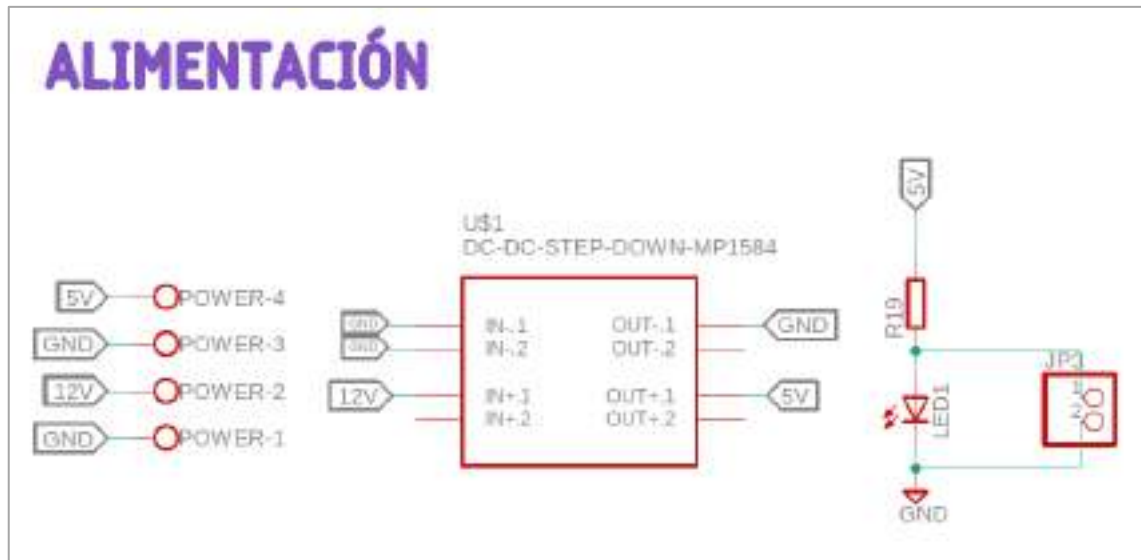


Ilustración 3-19: Esquema del bloque de alimentación del nodo maestro

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.6.2 Esquema de conexión de ESP32 con indicadores y módulo LoRa del nodo maestro

En el microcontrolador ESP32, Ilustración 3-20, van conectados en primera instancia la alimentación de 5 V, luego se tiene los indicadores que son: un zumbador (Buzzer) que utiliza el pin GIOP13, una pantalla LED que utiliza los pines GIOP22 y GIOP21. Para la transmisión de datos inalámbricamente se tiene la conexión del módulo LoRa en los pines GIOP17 y GIOP16, además se deja habilitados dos pines extra GIOP14 y GIOP12 con borneras para posibles usos posteriormente.

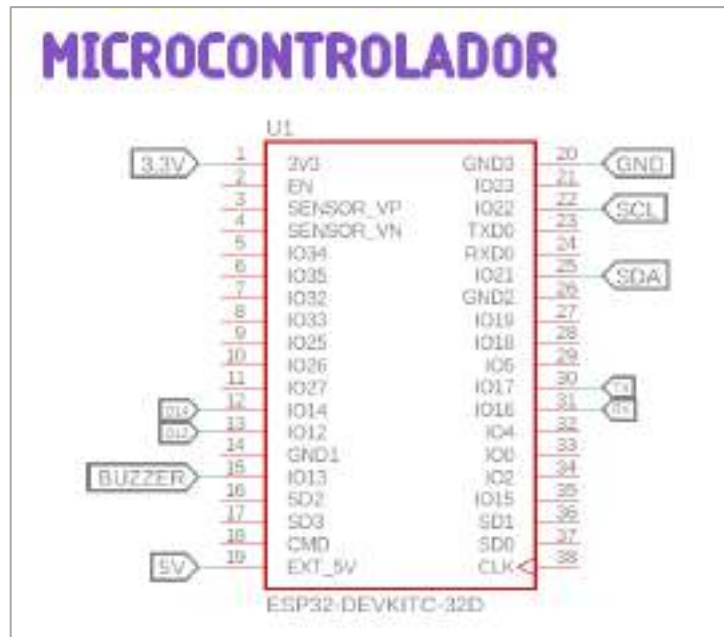


Ilustración 3-20: Esquema del bloque de microcontrolador ESP32

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.6.2.1 Esquema de conexión de indicadores en ESP32 del nodo maestro

Los indicadores, Ilustración 3-21, están compuestos por un Buzzer activo de 5 V, la conexión viene dada desde el pin G1OP13 del ESP32 que está conectado a la base de un transistor 2N3904, el emisor se conecta a GND y el colector se conecta al ánodo de un diodo rectificador 1N4004 y el cátodo pasa a conectarse al polo negativo del Buzzer y el polo positivo del Buzzer se lo conecta a 5 V, permitiendo reconocer mediante zumbidos de alerta cuando se recibe datos durante la transmisión del sistema. Una pantalla LED que utiliza los pines G1OP22 y G1OP21 de la ESP32 con una alimentación de 5 V y GND esta mostrará cuando se establezca conexión y exista transmisión de datos. Además, se encuentra la bornera JP2 que están conectadas a los pines G1OP14 y G1OP12 de la ESP32 para posibles usos posteriores.

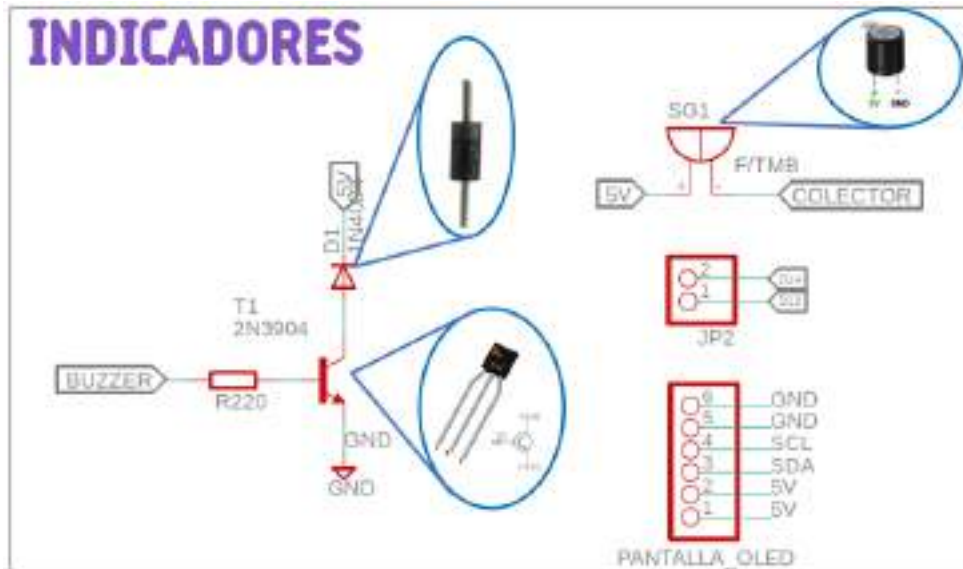


Ilustración 3-21: Esquema de conexión de indicadores en ESP32 nodo maestro

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.6.2.2 Esquema de conexión de módulo LoRa en ESP32 del nodo maestro

Para la transmisión de datos inalámbricamente se tiene la conexión del módulo LoRa ya sea para el modelo RYLR998 o RYLR993 irán conectados el transmisor (TX) en el pin GIOP17 y el receptor (RX) en el pin GIOP16 de la ESP32, para facilitar la conexión del módulo en la placa se coloca una bornera JP1 que tendrá conexión a una alimentación de 3.3V, RST, RX, TX y GND como se indica en la Ilustración 3-22.

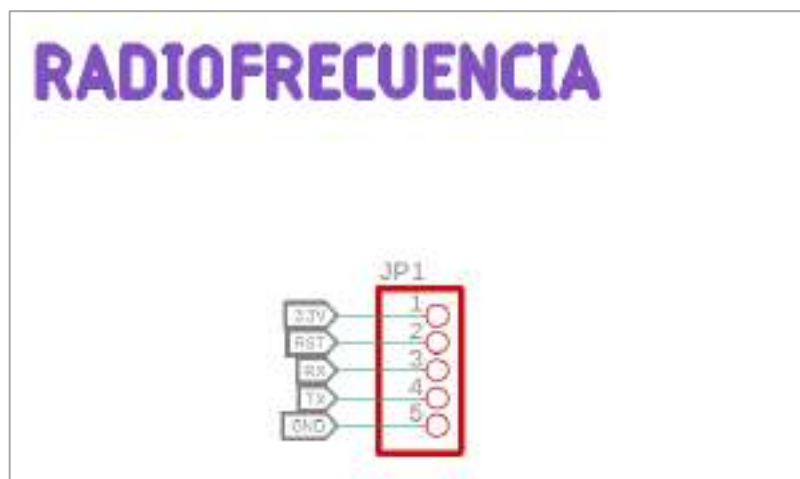


Ilustración 3-22: Esquema de conexión de módulo LoRa en ESP32

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.6.3 Esquema de conexión de alimentación del nodo esclavo

Para la alimentación de energía del nodo esclavo, Ilustración 3-23, se hace uso de un convertidor de voltaje DC-DC Step-Down MP1584 de la misma manera que se hace en el nodo maestro.

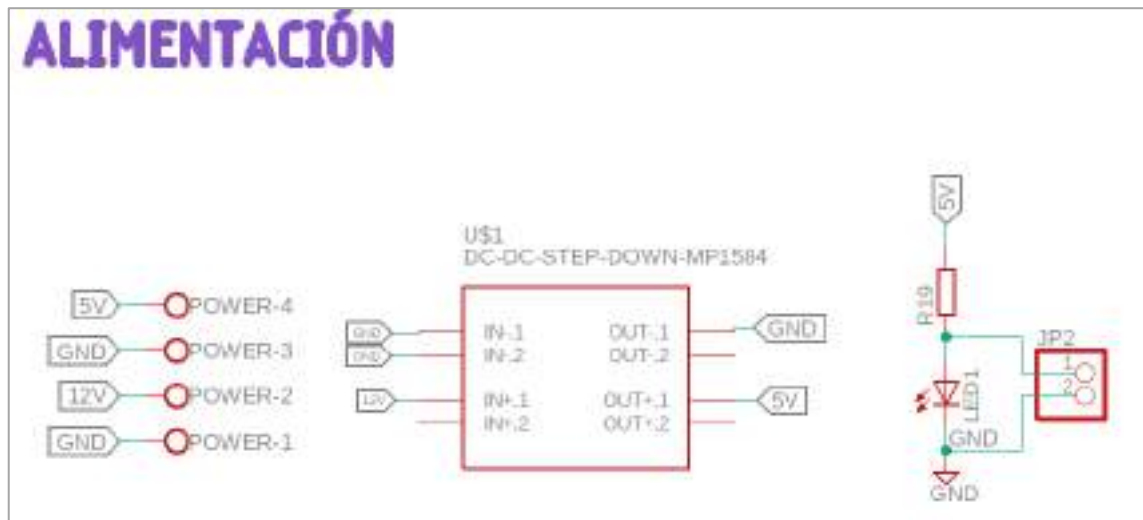


Ilustración 3-23: Esquema del bloque de alimentación del nodo esclavo

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.6.4 Esquema de conexión del microcontrolador Arduino Nano con indicadores, sensores y módulo LoRa del nodo esclavo

Los sensores de TDS, turbidez y PH se conectan al módulo ADS1115, Ilustración 3-24, es un conversor de analógico a digital con una resolución de 16 bits que permite tasas de muestreo de 8 a 860 muestras/segundo, además se puede usar cuatro canales simultáneamente.



Ilustración 3-24: Módulo conversor Analógico Digital ADS1115

Fuente: Multilogica, 2023

Los sensores que se encuentran conectados al módulo conversor ADS1115 enviarán los datos censados a través de este módulo, por tanto, el módulo ADS1115 se encuentra conectado al microcontrolador Arduino nano haciendo uso de los pines A4 y A5 para establecer la conexión

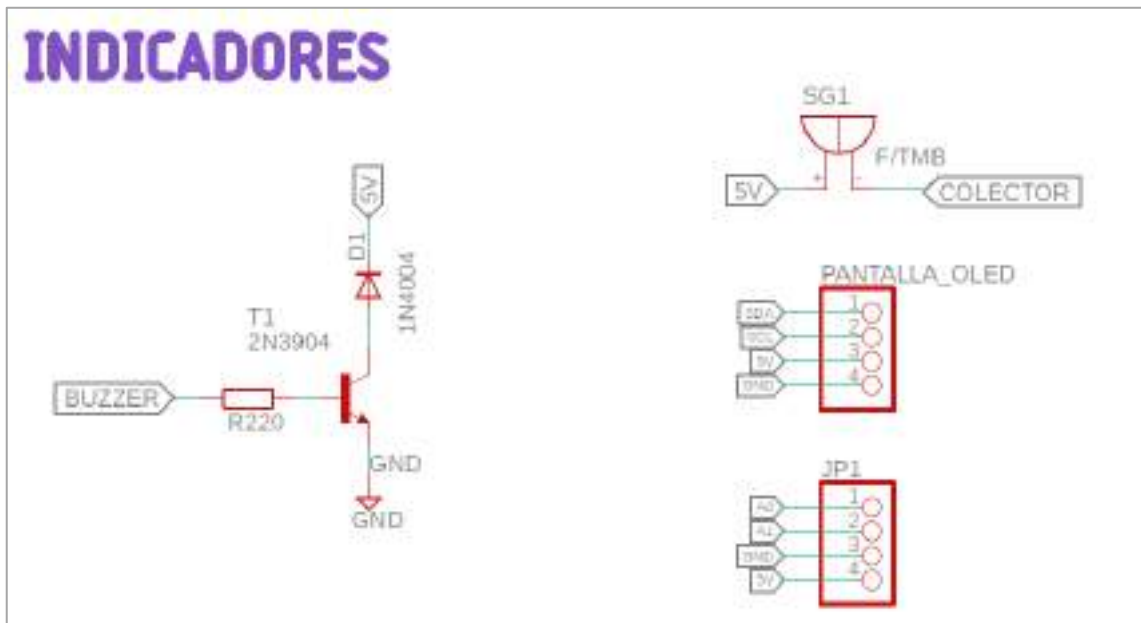


Ilustración 3-26: Esquema de conexión de indicadores en Arduino nano para nodo esclavo

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.6.4.2 Esquema de conexión de sensores en Arduino nano para nodo esclavo

Como se indicó en el apartado 3.6.4 los sensores de temperatura y nivel de agua se encuentran conectados directamente al microcontrolador Arduino nano en los pines D5, D8 y D7 respectivamente. Para los sensores de pH, turbidez y TDS se conectan al módulo conversor analógico ADS1115 de la siguiente manera: sensor de pH se conecta al pin A2, sensor de turbidez se conecta al pin A1 y el sensor de TDS se conecta al pin A0. Adicionalmente se coloca una bornera que se conecta al pin A3 para posibles usos posteriormente, todos los sensores además están conectados a la fuente de alimentación de 5V y GND como se indica en la Ilustración 3-27.

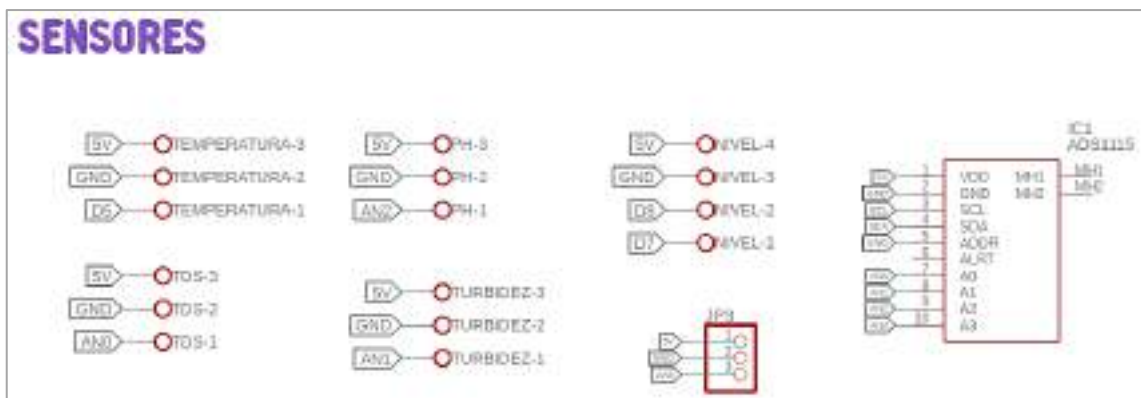


Ilustración 3-27: Esquema de conexión de sensores en Arduino nano para nodo esclavo

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.6.4.3 Esquema de conexión de módulo LoRa en Arduino nano para nodo esclavo

Para la transmisión de datos inalámbricamente se tiene la conexión del módulo LoRa ya sea para el modelo RYLR998 o RYLR993 irán conectados el transmisor (TX) en el pin D3 y el receptor (RX) en el pin D2 del Arduino nano, para facilitar la conexión del módulo en la placa se coloca una bornera que tendrá conexión a una alimentación de 3.3V, RX, TX y GND como se indica en la Ilustración 3-28.



Ilustración 3-28: Esquema de conexión de módulo LoRa en Arduino nano

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.6.5 Esquema de placa PCB y modelado 3D para nodo maestro

Para realizar el diseño de las placas en PCB se hace uso del software Eagle PCB que es una herramienta de diseño CAD (Diseño Asistido por Computador) utilizado para el diseño de placas electrónicas, el software es de fácil uso, permite insertar una amplia gama de componentes eléctricos, módulos, sensores, etc. Además, permite realizar un enrutamiento de las pistas de manera adaptativa y realizar vistas del modelo en 3D para circuitos impresos.

En la Ilustración 3-29 se muestra el diseño de la placa PCB para el nodo maestro con todos los componentes anteriormente detallados con sus respectivas conexiones para su correcto funcionamiento.

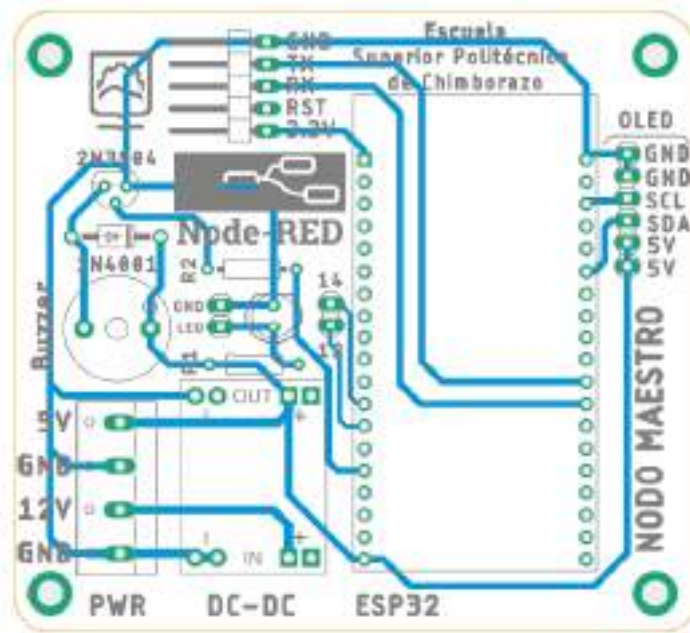


Ilustración 3-29: Esquema de placa PCB para nodo maestro

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 3-30 se muestra el diseño de la placa PCB en 3D para su impresión del nodo maestro con todos sus componentes.

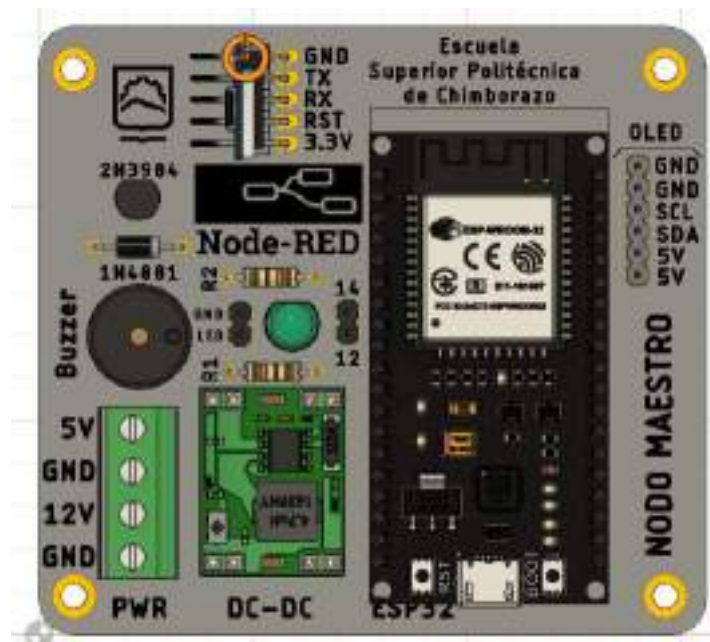


Ilustración 3-30: Diseño de placa PCB en 3D del nodo maestro

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.6.6 Esquema de placa PCB y modelado 3D para nodo esclavo

En la Ilustración 3-31 se muestra el diseño de la placa PCB para el nodo esclavo con todos los componentes anteriormente detallados con sus respectivas conexiones para su correcto funcionamiento.

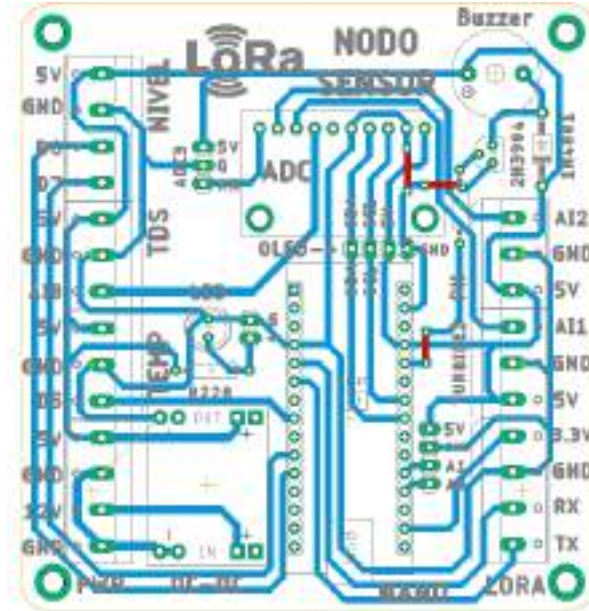


Ilustración 3-31: Esquema de placa PCB para nodo esclavo

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 3-32 se muestra el diseño de la placa PCB en 3D para su impresión del nodo esclavo con todos sus componentes.

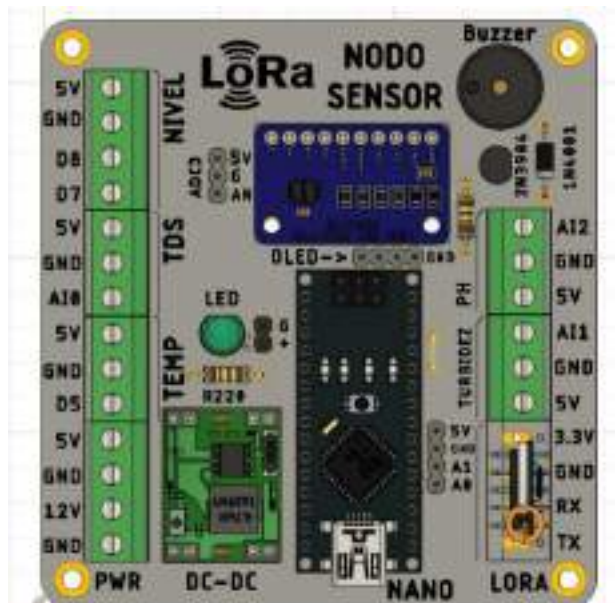


Ilustración 3-32: Diseño de placa PCB en 3D del nodo esclavo

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

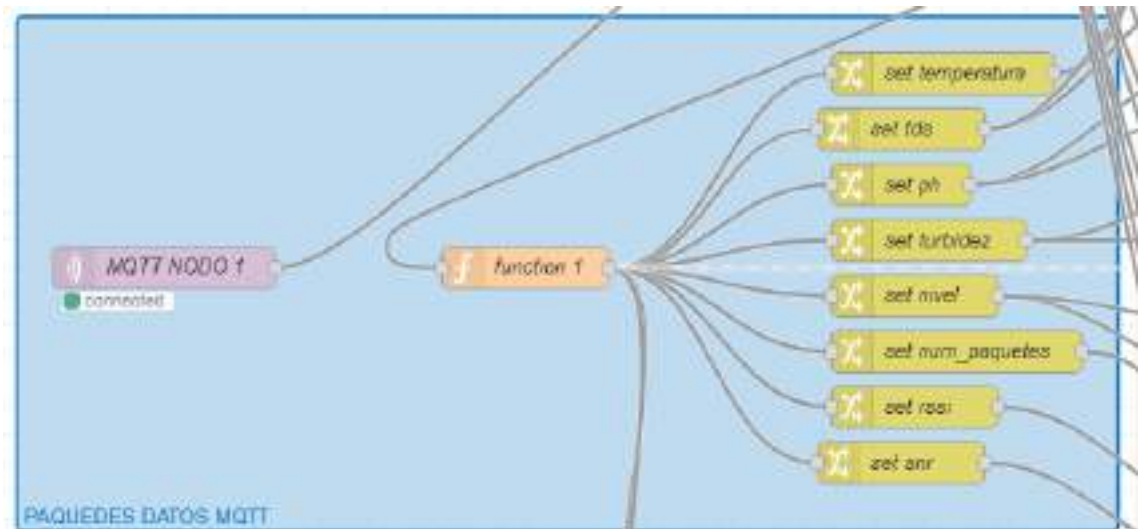


Ilustración 3-35: Bloque de programación para recibir paquetes de datos MQTT

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 3-36 se muestra la estructura para la configuración de las ubicaciones de los nodos en el mapa que se mostrarán en la dashboard.



Ilustración 3-36: Bloque de programación para nodos en mapa

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 3-37 se muestra la estructura para la configuración de la base de datos, en resumen, en este bloque se encuentra un botón para activar “Guardar en base de Datos” con la finalidad de que no estén guardándose innecesariamente datos sino cuando se requiera únicamente, hay una función que permite el pase de los datos ya separados por las variables hacia la base de datos, además, se tiene el nodo que activa el widget de la tabla dinámica que se mostrará en el dashboard los valores registrados en la base de datos.

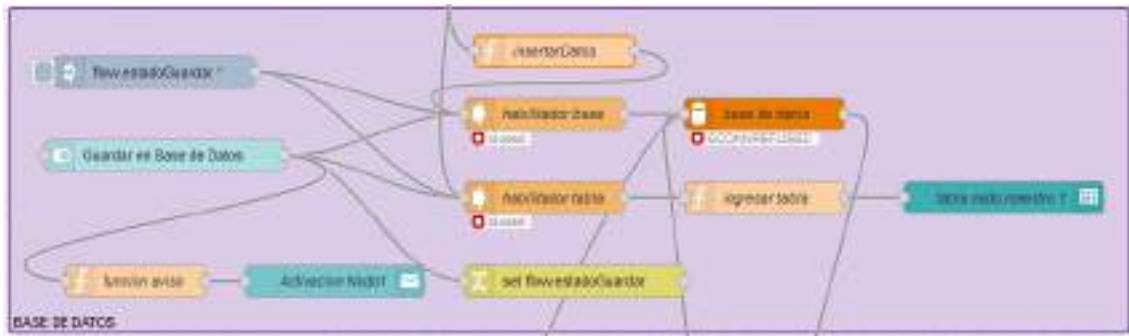


Ilustración 3-37: Bloque de programación para manejo de base de datos

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 3-38 se muestra la estructura para la configuración de las gráficas y widgets que se van a mostrar en la dashboard para el monitoreo de cada una de las variables.



Ilustración 3-38: Bloque de programación para las gráficas y widgets

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 3-39 se muestra la estructura para la configuración de la generación de reportes, en resumen, dentro del bloque se encuentra un grupo de nodos en el que permite realizar las consultas mediante un calendario a partir de una fecha en específico, así como consultas de manera diaria, semanal, mensual y anual, otro grupo de nodos permite accionar el botón de “CONSULTAR DATOS”, “DESCARGAR” y “BORRAR TODO”, siguiendo la secuencia para poder descargar de manera correcta un reporte primero se debe elegir la fecha o rango, luego accionar el botón de consultar datos y finalmente ya se puede descargar el reporte en un formato Excel. Finalmente, otro grupo de nodos permiten a través de la consulta de datos visualizar los resultados de manera grafica en el mismo dashboard tanto para temperatura, TDS, pH, turbidez y nivel.

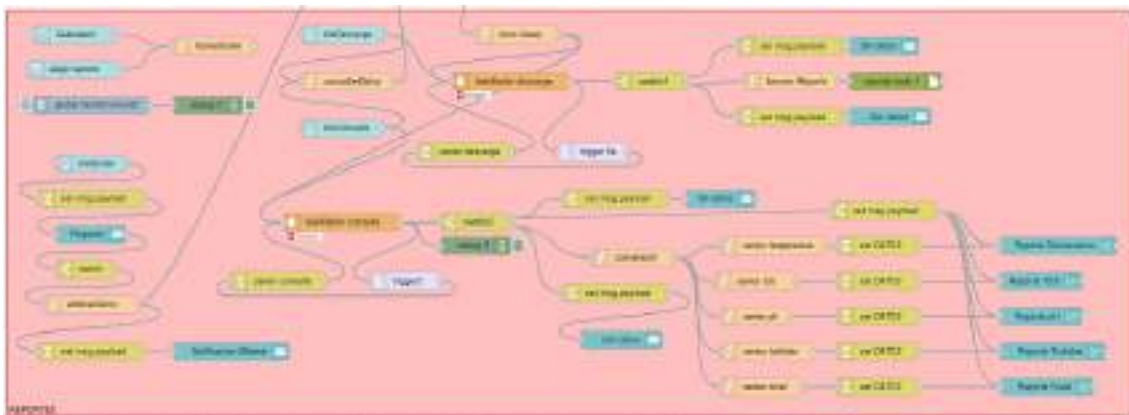


Ilustración 3-39: Bloque de programación para la generación de reportes

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 3-40 se muestra la estructura para la configuración de la generación de alertas a través de Telegram, dentro de este bloque se debe configurar los nodos de Telegram con la ayuda de una función (instrucción) para poder establecer los rangos permitidos para cada una de las variables y programar para que al momento que estos salgan de dichos rangos envíe la notificación de alerta mediante la app de mensajería de Telegram que puede ser usada en un dispositivo móvil.

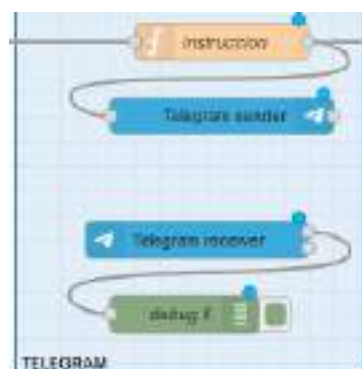


Ilustración 3-40: Bloque de programación para notificación de alertas en Telegram

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Seguidamente se tiene el Flow de Login dónde está seccionado en dos bloques, el primer bloque es netamente del Login, Ilustración 3-41, en el cual se programa a los nodos para asignar un usuario y una contraseña a los usuarios, permitiendo el acceso al sistema de monitoreo solo a personas autorizadas garantizando la confidencialidad de la información que se está recuperando de los sensores diariamente.

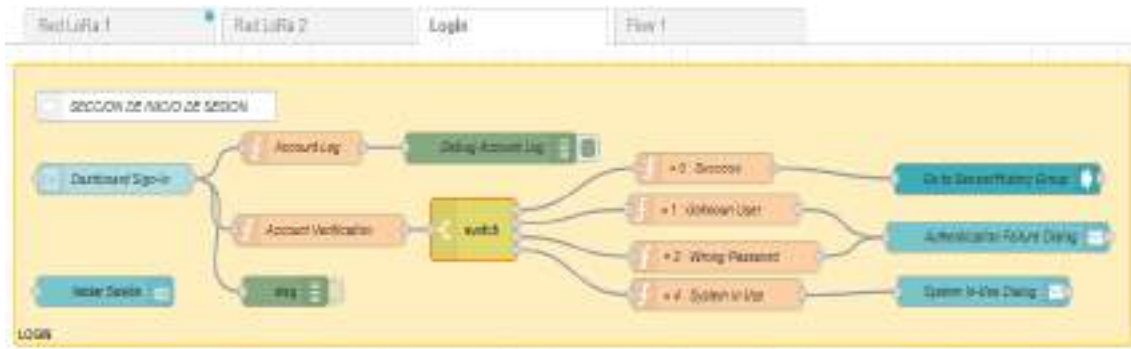


Ilustración 3-41: Bloque de programación para el Login

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Finalmente, en el Flow de Login se tiene el segundo bloque de programación que corresponde al tiempo de sesión, Ilustración 3-42, aquí los nodos se programan con un detector de tiempo de inicio de sesión y se calcula el tiempo para finalizar automáticamente la misma, se puede establecer cualquier tiempo que se estime prudente para finalizar la sesión de los usuarios que accedan al sistema de monitoreo. Finalizada la sesión se puede volver a ingresar logeandose nuevamente con el usuario y contraseña.

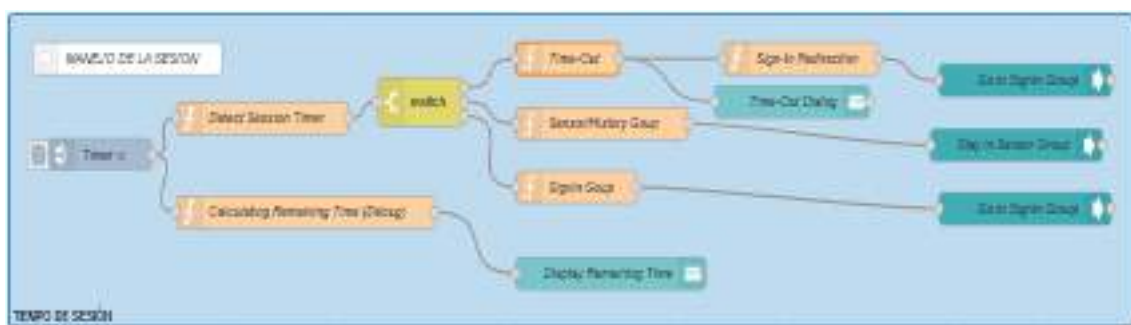


Ilustración 3-42: Bloque de programación para el Login – Tiempo de sesión

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.8 Diagramas de flujo para el sistema de monitoreo IoT

3.8.1 Diagrama de flujo para nodo esclavo

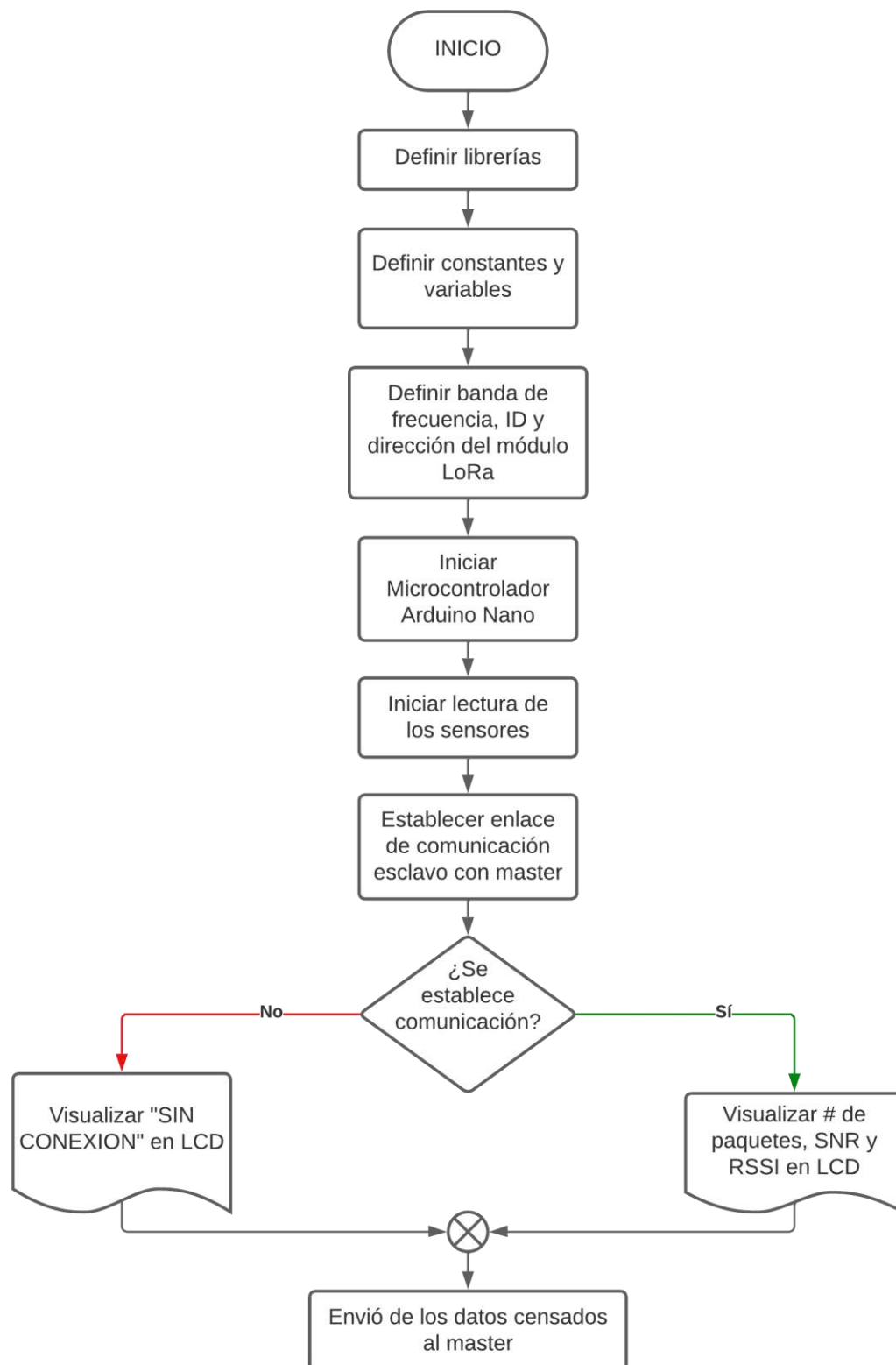


Ilustración 3-43: Diagrama de flujo de funcionamiento del nodo censador o nodo esclavo

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.8.2 Diagrama de flujo para nodo master, broker MQTT y servidor Node-RED

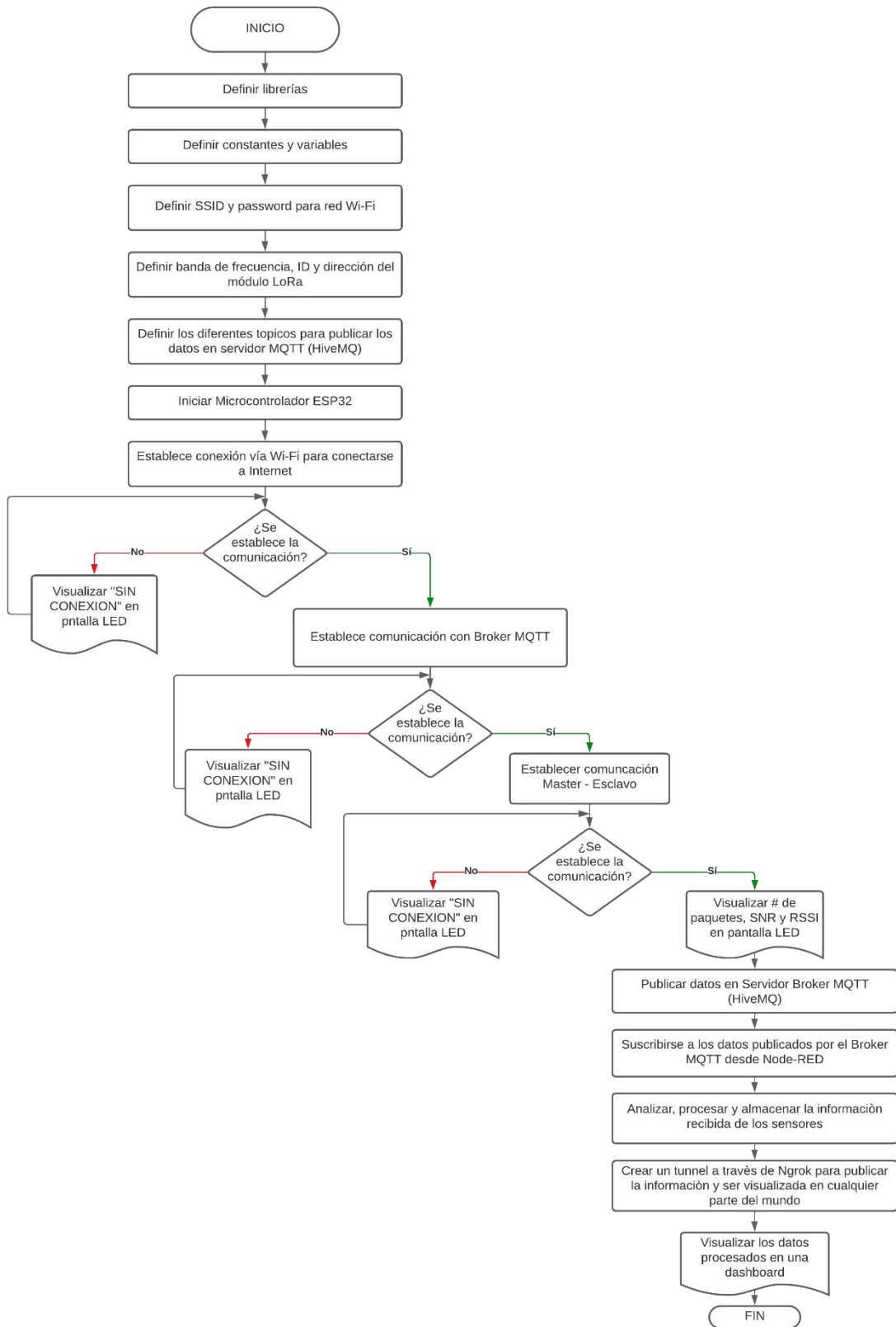


Ilustración 3-44: Diagrama de flujo de funcionamiento de nodo master, broker MQTT y procesamiento de la información en servidor Node-RED

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.9 Construcción del prototipo IoT

La elaboración del prototipo para el sistema de monitoreo IoT de las propiedades físicas del agua se realiza en tres partes diferentes: la primera es el nodo maestro o master, segundo el nodo esclavo y tercero el sistema para ubicación de los sensores. Se toma en cuenta las condiciones tanto físicas como climáticas para un adecuado diseño del prototipo y que cumpla con las características de protección para la ubicación de los circuitos con el fin de que no sufran daños, garantizando un correcto funcionamiento permanente del sistema.

3.9.1 Construcción del nodo maestro

La primera parte del prototipo es el nodo maestro, para el montaje del circuito se hace uso de una caja con protección IP65, esta caja tiene protección contra el polvo y contra chorros de agua garantizando la protección del circuito a montar como se indica en la Ilustración 3-45. Dentro del sistema también se ubica la fuente de poder de 12V 2A con un switch de paso para facilitar la conexión del sistema a una toma directa a 110V



Ilustración 3-45: Construcción del nodo maestro

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.9.2 Construcción del nodo esclavo

Para la elaboración del nodo esclavo 1, Ilustración 3-46, se toma principalmente en consideración que va a estar expuesto a la intemperie todo el tiempo, por tanto, se debe garantizar que soporte condiciones como sol, lluvia y polvo para conservar de manera íntegra los circuitos que van a estar contenidos dentro de la caja, por ello se opta por usar y adaptar el sistema a una caja NAP y para garantizar que los circuitos no se sobrecalienten se procede a pintar la caja de blanco con el fin de que el nivel de absorción de calor generado por el sol sea mínimo. Además, para un mejor manejo y adaptabilidad del sistema de los sensores se ubican conectores XLR GX16 de cuatro pines manteniendo una conexión fija y segura entre el nodo esclavo y los sensores. El sistema cuenta también con conexión de energía eléctrica de 110V.



Ilustración 3-46: Construcción nodo esclavo 1

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

El nodo esclavo 2, Ilustración 3-47, es elaborado de la misma manera, pero a diferencia del nodo esclavo 1 no cuenta con conexión de energía eléctrica a 110V sino con adaptación para alimentación de energía a través de panel solar a 12V debido a que este sistema estará ubicado en un lugar remoto de la montaña donde se encuentra la fuente de agua de abastecimiento, por tanto, se le adiciona un controlador de carga solar, además que este nodo lleva la antena LoRa RYLR993, por tanto, su distribución en la caja es un tanto diferente.

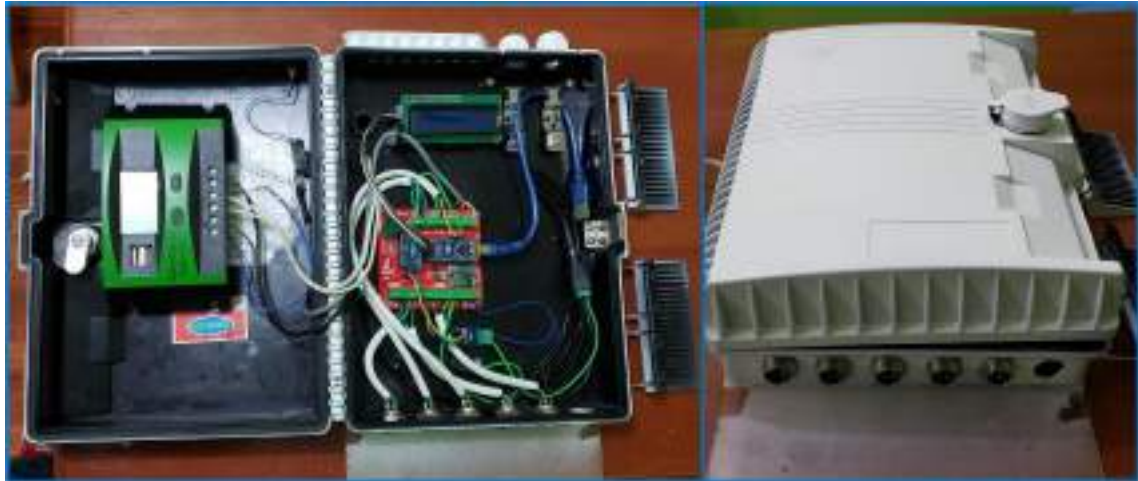


Ilustración 3-47: Construcción nodo esclavo 2

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

3.9.3 Construcción de sistema para ubicación de sensores

Los sensores cuentan con placas electrónicas, la prolongación de los cables desde las placas hacia los sensores tiene un máximo de 80 cm de largo, motivo por el cual es necesario crear un sistema con una caja hermética que cuente con flotadores para poder ubicar de manera correcta los sensores dentro del agua garantizando la integridad de estos circuitos. Para el sensor de turbidez se procede a integrarlo a manera de un solo cuerpo con la caja debido a que este no es sumergible en su totalidad a diferencia de los demás sensores, por lo cual es ubicado debajo de la caja para que tome de manera correcta las lecturas dentro del agua como se muestra en la Ilustración 3-48. Además, el sistema cuenta con una especie de toma de aire para evitar la condensación dentro de la caja y con la longitud necesaria de cable para que pueda ascender y descender el sistema según el nivel del agua en el tanque para cada caso.



Ilustración 3-48: Construcción de sistema para ubicación de sensores

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta la implementación del sistema IoT para monitorear y determinar las características físicas del agua para consumo humano en los tanques de agua que se encuentran en las localidades de Guanando y Huillis, la calibración de los sensores de pH, TDS y Turbidez, también con el sistema ya implementado se realiza un análisis del prototipo correspondiente a la cobertura, latencia de comunicación, tasa de transmisión y consumo de energía, además se realiza un análisis de las mediciones obtenidas en el transcurso de una semana con diferentes tiempos de muestreo.

4.1 Implementación del sistema de monitoreo IoT

La implementación del sistema de monitoreo IoT se lo realiza de manera descentralizada, es decir, en cada una de las localidades se ubica un nodo maestro y su respectivo nodo esclavo de tal manera que la información se la recupera y unifica en un solo sistema haciendo uso de Node-RED a nivel de la capa de aplicación. El nodo maestro 1 y nodo esclavo 1 que a partir de ahora se llamará sistema 1 son implementados en la localidad de Guanando y el nodo maestro 2 y nodo esclavo 2 que a partir de ahora se llamará sistema 2 son implementados en la localidad de Huillis, cabe mencionar que para el sistema 1 se hace uso del módulo de comunicación LoRa RYLR998 y para el sistema 2 se hace uso del módulo de comunicación LoRa RYLR9935 esto a causa de la cobertura que brinda cada modelo.

4.1.1 *Implementación del sistema 1 (Guanando)*

Primeramente, se instala el nodo esclavo en el tanque de distribución de Guanando mismo que es ubicado y sujetado en un tubo que se encuentra en una esquina de la entrada del tanque como se indica en la Ilustración 4-1, se lo realiza de esta manera con el fin de preservar de la mejor manera la integridad de la caja además de bloquear el acceso a cualquier persona particular.



Ilustración 4-1: Implementación del nodo esclavo 1

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Una vez colocado el nodo esclavo ya se puede incorporar la caja flotante que contiene los sensores, estos son unidos a través de los conectores XLR GX16 que para el caso están sujetos a los cables blindados de aproximadamente 3m para que el sistema flotante pueda ascender y descender acorde al nivel de agua que contenga el tanque. Además, se incluye dentro del tanque un tubo de ½” a manera de guía para que el sistema flotador mantenga su curso sobre ella como se indica en la Ilustración 4-2.



Ilustración 4-2: Incorporación de sistema flotante que contiene los sensores para nodo esclavo 1

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Colocado todo el sistema del nodo esclavo 1 se procede a la implementación del nodo maestro en la edificación del GAD de Guanando, Ilustración 4-3, este nodo se lo ubica en la terraza de la edificación probando el nivel de señal RSSI (Indicador de Fuerza de la Señal Recibida) y SNR (Relación de Señal a Ruido) en diferentes lugares para una correcta ubicación del nodo maestro.



Ilustración 4-3: Implementación de nodo maestro 1

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.1.2 Implementación del sistema 2 (Huillis)

Primeramente, se instala el nodo esclavo en el tanque de abastecimiento de Huillis, para el funcionamiento de este sistema se hace uso de energía solar, por tanto, se instala un tubo de soporte para ubicar tanto el panel solar, caja de nodo esclavo 2 y la caja que contiene la batería, el tubo es ubicado a razón de la proporción de longitud de cable disponible y de la recepción de la señal para lo cual se hace uso del RSSI y SNR para su correcta ubicación como se indica en la Ilustración 4-4.



Ilustración 4-4: Implementación de nodo esclavo 2

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Ya implementada la caja del nodo esclavo 2 se conecta el sistema flotante que contiene los sensores a través de los conectores XLR GX16 como se muestra en la Ilustración 4-5.



Ilustración 4-5: Incorporación de sistema flotante que contiene los sensores para nodo esclavo 2

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Colocado todo el sistema del nodo esclavo 2 se implementa el nodo maestro 2 en la localidad de Cahujá Bajo, para la ubicación del master 2 se toma en cuenta inicialmente el acceso a internet y en segunda instancia los niveles de RSSI y SNR para su correcta ubicación como se indica en la Ilustración 4-5.



Ilustración 4-6: Implementación nodo maestro 2

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.2 Resultado de datos en Node-RED

Los datos tomados por los sensores son enviados por tramas desde el nodo esclavo hacia el nodo master, luego el nodo master publica la información al broker MQTT HiveMQ, posteriormente desde nuestro servidor de Node-RED nos suscribimos a los tópicos correspondientes para recibir la información proporcionada por el broker HiveMQ.

Al abrir el Dashboard debemos iniciar una sesión a través de un usuario y contraseña, Ilustración 4-7, esto con la finalidad de que se tenga ingreso al sistema únicamente personas autorizadas debido a que con el enlace generado por ngrok podría ingresar cualquier persona siendo inadecuado para la configuración y manejo de los datos.



Ilustración 4-7: Inicio de sesión sistema Dashboard Node-RED

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-8 se muestra la primera sección del dashboard donde se pueden cambiar los parámetros de configuración para el enlace como el tiempo de muestreo, Spreading Factor, Bandwidth y Coding Rate, de las tres últimas configuraciones son netamente de la comunicación LoRa. Además, se puede visualizar la ubicación de ambos nodos en el mapa, y el estado del enlace donde se indica si se establece el enlace entre el nodo esclavo y el nodo maestro y finalmente se muestra en la parte baja el número de paquetes que se están recibiendo durante la comunicación esclavo -maestro, así como el RSSI y SNR. Las opciones para cada una de las configuraciones se detallan a continuación:

- Muestreo: (2, 5, 10, 15 y 30) segundos, (1, 5, 15, 30) minutos y (1, 3, 5, 8, 12) horas.
- Spreading Factor: 5, 6, 7, 8, 9 (default), 10 y 11
- Bandwidth: (125, 250 y 500 kHz)
- Coding Rate: 1, 2, 3 y 4



Ilustración 4-8: Configuración de enlace Dashboard Node-RED

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-9 y 4-10 se muestra la segunda sección del dashboard donde se puede visualizar los datos obtenidos por los sensores a través de medidores en un rango establecido, para temperatura de -10 °C a 40 °C, TDS de 0 a 1000 ppm, pH de 0 a 14, turbidez de 0 a 300 NTU y para el nivel de agua del tanque se determina acorde la altura de cada uno de los tanques ya que son diferentes. Además, al lado derecho de cada parámetro medido se visualiza la gráfica de seguimiento de los valores a manera de registro.



Ilustración 4-9: Visualización de datos de sensores en Dashboard Node-RED

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023



Ilustración 4-10: Visualización de datos de sensores en Dashboard Node-RED

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-11 se muestra la tercera sección del dashboard donde se puede visualizar los datos que se van registrando de acuerdo con el tiempo que se haya establecido el muestreo en la primera sección, cabe mencionar que en esta sección solo se muestran los datos que se están guardando en la base de datos, para ello en la primera sección se debe activar la opción de Guardar en Base de Datos.

ID	pH	Turbididad	Dissueltos	Fecha
206.17	6.99	0	21.00	21/10/24 11:52:00
213.47	7.21	0	18.00	21/10/24 11:55:00
206.20	7.23	0	18.00	21/10/24 11:51:00
207.01	7.41	0	18.00	21/10/24 11:53:00
206.17	6.95	0	18.00	21/10/24 11:52:00
206.17	6.90	0	18.00	21/10/24 11:52:00
215.17	6.93	0	18.00	21/10/24 11:52:00

Ilustración 4-11: Visualización de registro de datos en Dashboard Node-RED

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En las Ilustración 4-12 y 4-13 se muestra la cuarta y última sección del dashboard donde se pueden generar reportes, estos reportes se los puede generar de dos maneras, la primera es haciendo uso del calendario para escoger una fecha específica para la consulta o la segunda manera es por rango de fecha que comprende los rangos Hoy, Ayer, Esta Semana y Este Mes. Una vez seleccionada cualquiera de las dos maneras de consulta se puede iniciar la consulta en la barra azul “CONSULTAR DATOS”, además, se puede descargar un Excel de los datos generados por el reporte para un mejor manejo y control de los datos censados, también se tiene un botón de “BORRAR TODO” al seleccionarlo tendremos la opción de borrar todos los datos que se han guardado en la base de datos.

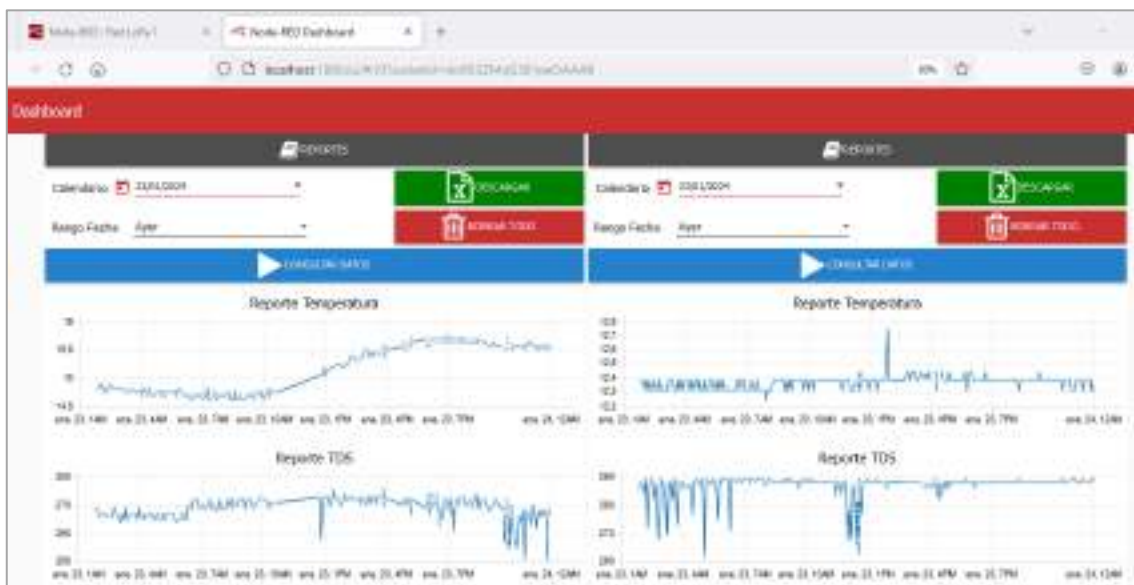


Ilustración 4-12: Visualización de reportes en Dashboard Node-RED

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

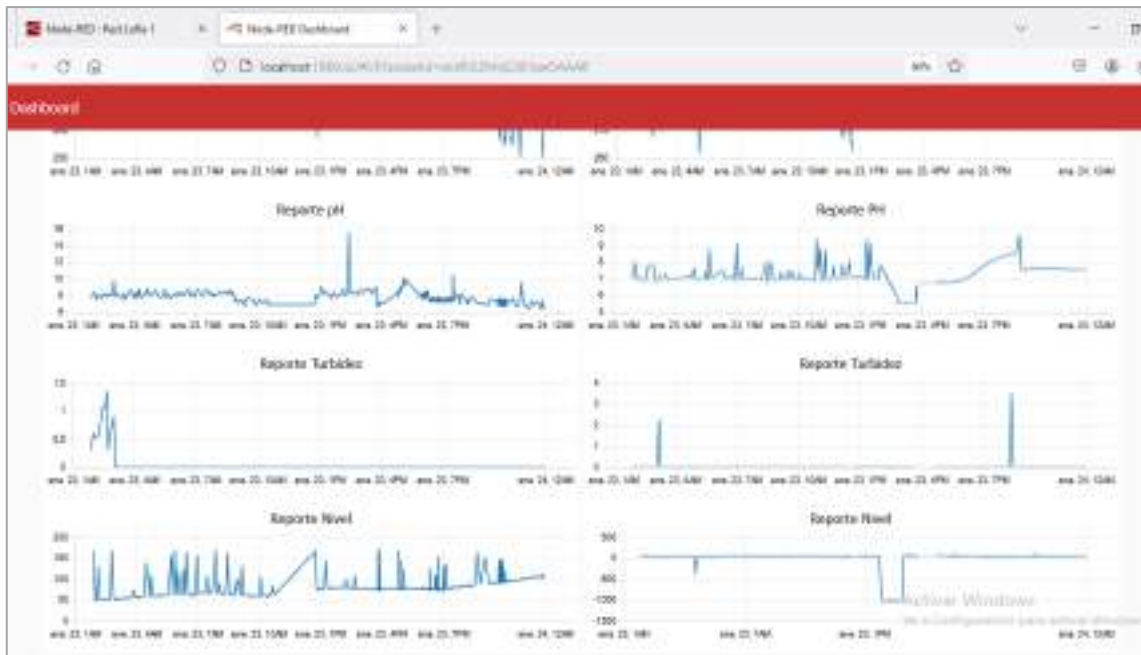


Ilustración 4-13: Visualización de reportes en Dashboard Node-RED

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.3 Resultado de túnel en Ngrok

El túnel que se crea haciendo uso de Ngrok se lo utiliza para hacer público el dashboard de Node-RED haciendo uso del protocolo HTTPS, dentro de la programación de Node-RED se ubica un nodo de Ngrok, mismo que se conecta a la plataforma de Ngrok y genera un URL aleatorio, Ilustración 4-14, que servirá para ingresar desde cualquier parte del mundo a la dashboard a través de internet.



Ilustración 4-14: Enlace URL generado por Nodo de ngrok en Node-RED

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Una vez obtenido el enlace ya se puede acceder con el mismo desde cualquier lugar del mundo con acceso a internet, al ingresar al enlace URL nos saldrá un mensaje de confirmación de visita al sitio, se debe colocar “Visit Site” para poder ingresar como se indica en la Ilustración 4-15.

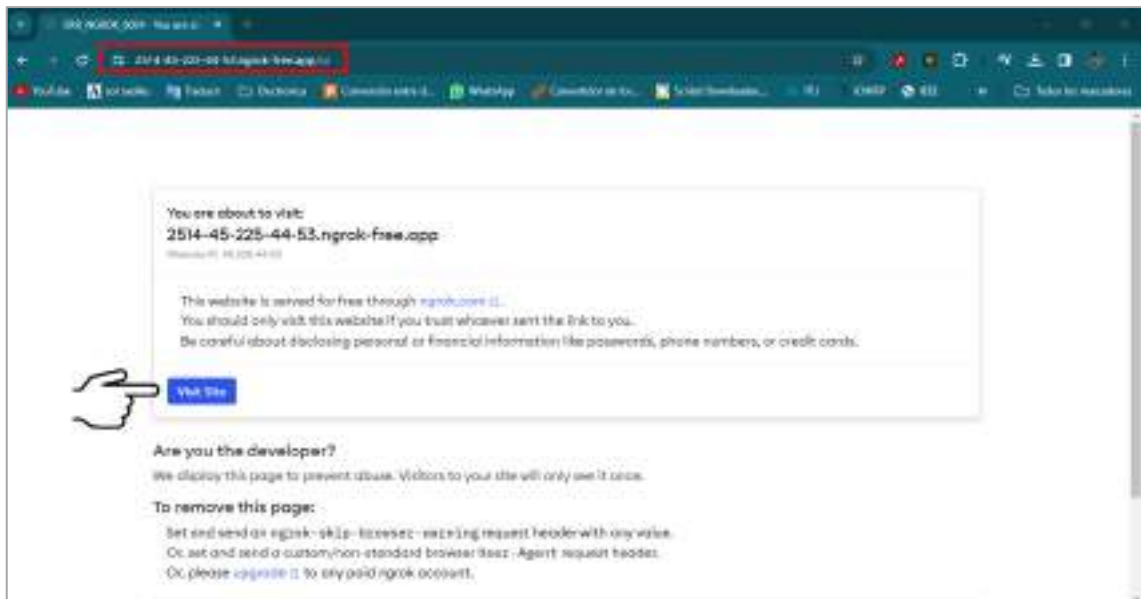


Ilustración 4-15: Ingreso a enlace URL de Ngrok

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Luego de haber dado a “Visit Site” ya nos redirige el enlace hacia el Dashboard del sistema donde nos pide un usuario y contraseña, Ilustración 4-16, para poder ingresar a controlar y visualizar los datos monitoreados por los sistemas implementados en los tanques de Guanando y Huillis.



Ilustración 4-16: Inicio de sesión del sistema a través del enlace de Ngrok

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-17 se muestra el ingreso a la Dashboard del sistema de monitoreo haciendo uso del enlace URL generado por Ngrok.

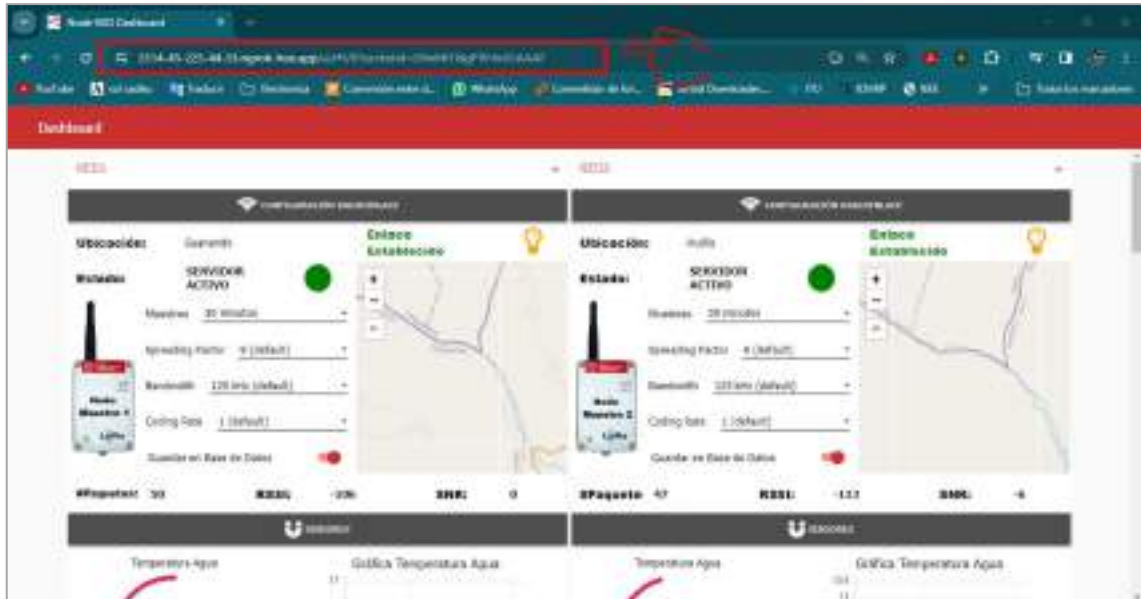


Ilustración 4-17: Ingreso al Dashboard del sistema de monitoreo a través del enlace de Ngrok
Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.4 Resultado de notificaciones vía Telegram

Las notificaciones son una parte complementaria del sistema de monitoreo IoT para el control de las características físicas del agua de consumo humano, las notificaciones se general a través de un registro del bot de Telegram bajo las siguientes condiciones:

- Cuando el pH no está dentro del rango dispuesto por la norma INEN 1108 que es de 6,5 a 8,5.
- Cuando el TDS sobrepasa valores de 900 ppm.
- Cuando la turbidez sobrepasa valores de 5 NTU según lo establecido en la norma INEN 1108.

En la Ilustración 4-18 se muestra los nodos de programación en Node-RED para la ejecución del filtrado de información de los sensores y envió de notificaciones vía Telegram, así como la visualización de las notificaciones en la App de Telegram en un teléfono Android. Se crea un Bot de Telegram a través del BotFather y este nos permite ingresar un username para nuestro Bot y nos proporciona un token el cual permite el acceso a través del protocolo HTTP API, el username y token proporcionado por el BotFather se ingresan en las configuraciones del nodo de Telegram para poder enviar las notificaciones cuando cumpla las condiciones propuestas.

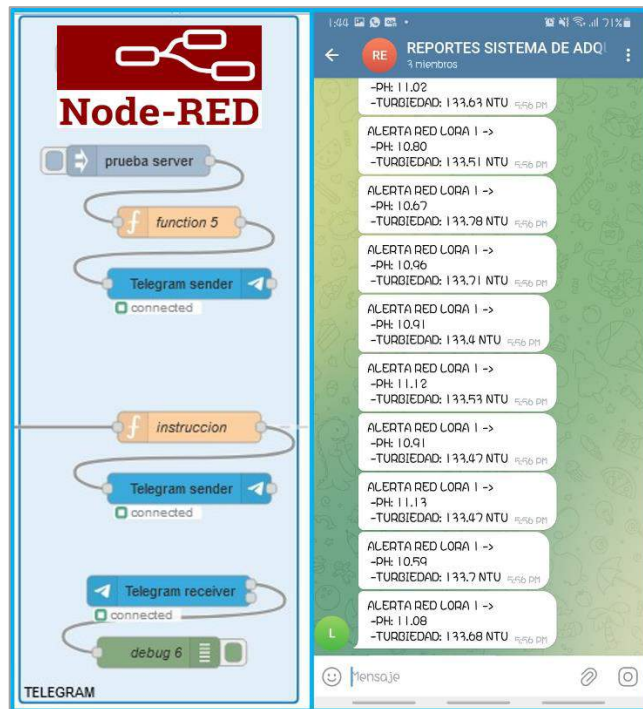


Ilustración 4-18: Notificaciones del sistema de monitoreo IoT vía Telegram
 Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.5 Resultados de generación de reportes

En la sección de “REPORTES” además de presentar las gráficas de los reportes en el dashboard también se puede descargar un Excel con los datos consultados, dentro de cual se encuentran dos hojas de datos, en la primera se encuentran todos los “DATOS”, Ilustración 4-19, registrados como: temperatura, TDS, pH, turbidez, nivel, corriente, voltaje, potencia, paquetes, rssi, snr, ping y la fecha, en la segunda hoja se encuentra los “RESULTADOS”, Ilustración 4-20, donde se promedian los valores de todas las mediciones como: Temperatura, TDS, pH, Turbidez, Nivel, Corriente, Voltaje y Potencia.

	temperatura	TDS	pH	turbidez	nivel	corriente	voltaje	potencia	paquetes	rssi	snr	ping	fecha
1	14.81	269	7.72	0.31	169	0.23	5.62	1.26	50	-88	-9.008256	Tue Jan 23 2024 02:51:53	
2	14.89	268	8.23	0.6	48	0.24	5.83	1.21	49	-101	-8.008487	Tue Jan 23 2024 02:52:03	
3	14.85	266	8.39	0.55	49	0.24	5.83	1.21	49	-105	-7.008262	Tue Jan 23 2024 02:52:09	
4	14.78	267	7.83	0.62	181	0.28	6.04	1.28	50	-102	-7.008008	Tue Jan 23 2024 02:52:09	
5	14.75	267	8.86	0.56	51	0.23	5.83	1.26	49	-101	-4.008258	Tue Jan 23 2024 02:52:09	
6	14.75	267	7.81	0.69	51	0.23	5.83	1.26	49	-88	-9.008047	Tue Jan 23 2024 02:52:09	
7	14.88	266	7.7	0.82	81	0.28	6.04	1.26	49	-88	-8.008256	Tue Jan 23 2024 02:52:09	
8	14.88	266	8.29	1.09	52	0.23	5.83	1.26	49	-101	-5.008103	Tue Jan 23 2024 02:52:09	
9	14.81	265	8.84	1.07	52	0.23	5.83	1.26	49	-100	-5.008258	Tue Jan 23 2024 02:52:09	
10	14.81	266	8.29	1.36	55	0.25	5.83	1.26	49	-100	-7.008049	Tue Jan 23 2024 02:52:09	
11	14.81	269	7.82	0.82	52	0.23	5.62	1.26	49	-89	-8.008256	Tue Jan 23 2024 02:52:09	

Ilustración 4-19: Reporte de “DATOS” del monitoreo del sistema generado en Excel
 Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	promedio de la temperatura	promedio de TDS	promedio de PH	promedio de nivel	promedio de corriente	promedio de voltaje	promedio de potencia				
2	35.3742125	269.736243	7.60515924	0.01995484	84.5844402	0.22582543	5.03003795	1.13912713			
3											
4											
5											
6											
7											
8											

Ilustración 4-20: Reporte de “RESULTADOS” del monitoreo del sistema generado en Excel

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En los reportes existen datos adicionales a la Temperatura, TDS, Turbidez, pH, Nivel y fecha como lo son la corriente, voltaje, potencia, paquetes, rssi, snr y ping, estos datos adicionales sirven específicamente para el análisis de funcionamiento del sistema en relación con los datos que se está recibiendo según el tiempo de muestreo.

4.6 Pruebas de funcionamiento de los sistemas

Se realizan pruebas de funcionamiento de ambos sistemas antes de ser instalados en cada una de sus ubicaciones correspondientes, las pruebas realizadas son de funcionamiento y calibración de sensores según lo requiera, pruebas de cobertura, latencia, análisis de tasa de transmisión y consumo de energía

4.6.1 Funcionamiento de los sensores

4.6.1.1 Calibración de sensor de pH (PH-4502C con electrodo E201-BCN)

Para la calibración del sensor de pH primeramente se alimenta el sensor con los 5V y se hace un cortocircuito en el conector hembra BCN de la tarjeta acondicionadora como se indica en la Ilustración 4-21, luego con la ayuda de un multímetro se mide el voltaje en los pines de G y Po, el voltaje al que se debe calibrar es de 2.5 V, para ello se regula el potenciómetro azul que está cerca al conector que es del offset de pH.



Ilustración 4-21: Calibración de voltaje de la tarjeta acondicionadora de pH

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Una vez ajustado el voltaje de salida de la tarjeta acondicionadora de pH ya se pueden ajustar los valores de calibración mediante Arduino IDE en la siguiente línea de código (pHValue = -5.85 * voltage + calibration_value;) El valor que se ajusta es en este caso el de -5.85, este valor se lo puede aumentar o disminuir para calibrar la lectura de la sonda de pH. Para la calibración correspondiente se hace uso de sobres disolventes de pH con tres valores diferentes: 4.00, 7.00 y 10.01, Ilustración 4-22, mismos que deben ser disueltos en agua destilada para que mantenga sus propiedades



Ilustración 4-22: Soluciones disolventes de pH

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-23 se muestra la calibración del sensor de pH para el valor de 4.00 a 21.4 °C.

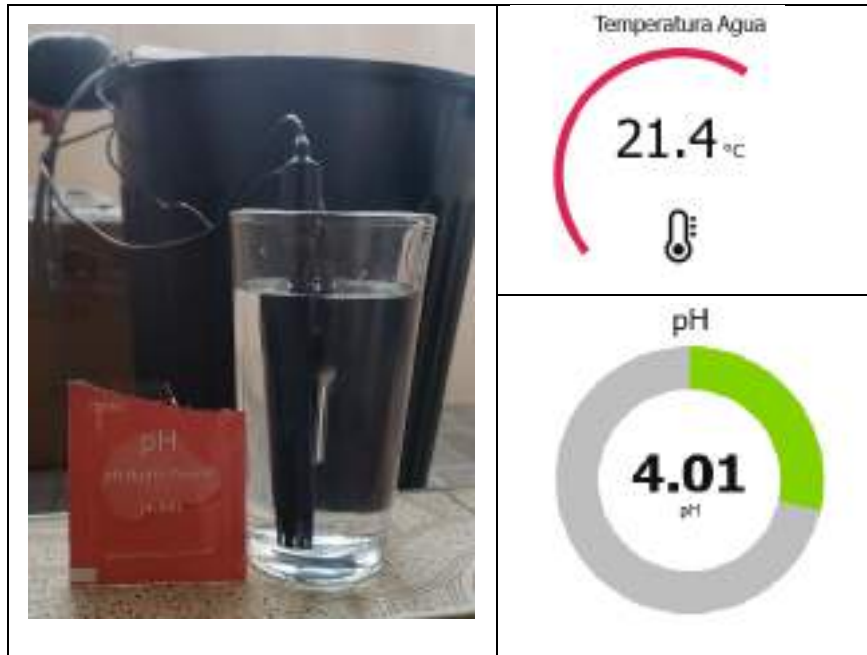


Ilustración 4-23: Calibración de pH 4

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-24 se muestra la calibración del sensor de pH para el valor de 7.00 a 20.9 °C.



Ilustración 4-24: Calibración de pH 7

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-25 se muestra la calibración del sensor de pH para el valor de 10.01 a 22.1 °C.

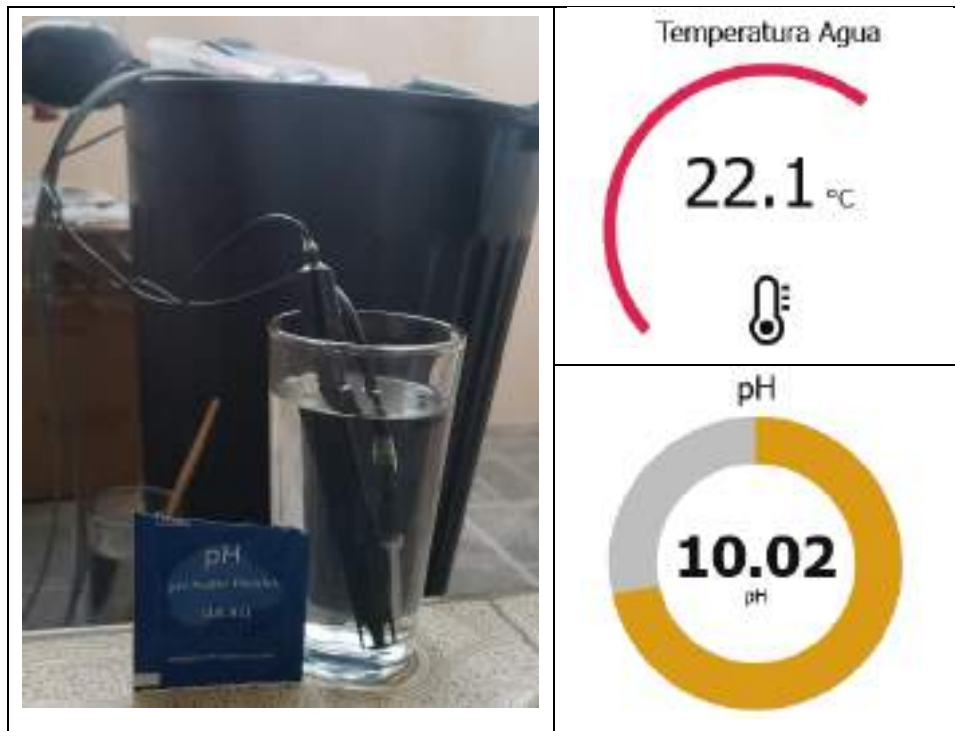


Ilustración 4-25: Calibración de pH 10.01

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.6.1.2 Calibración de sensor de TDS (KS0429)

Para que el sensor de TDS funcione correctamente se hace uso de la librería “#include "GravityTDS.h"” en Arduino IDE, la calibración de este sensor se hace con la ayuda de la temperatura a manera de compensación para el sensor de TDS, por tanto, se hace uso del sensor de temperatura (DS18B20) en conjunto para las mediciones correspondientes. Para la compensación de la temperatura al sensor de TDS se hace uso del comando “gravityTds.setTemperature(temperature)”, luego con el comando “gravityTds.update()” se muestra y calcula la lectura del sensor de TDS.

4.6.1.3 Calibración de sensor de Turbidez (KS0414)

En la Ilustración 4-26 se muestra la curva característica de relación entre la turbidez y la tensión media, que es proporcionada por el fabricante del sensor DFROBOT, de lo cual se interpreta que, el sensor tomará lectura de que el agua es pura, es decir, obtendremos un valor de NTU < 0,5 cuando se emite un voltaje de $4,1 \text{ V} \pm 0,3 \text{ V}$ siempre y cuando la temperatura esté entre los 10 °C a 50 °C

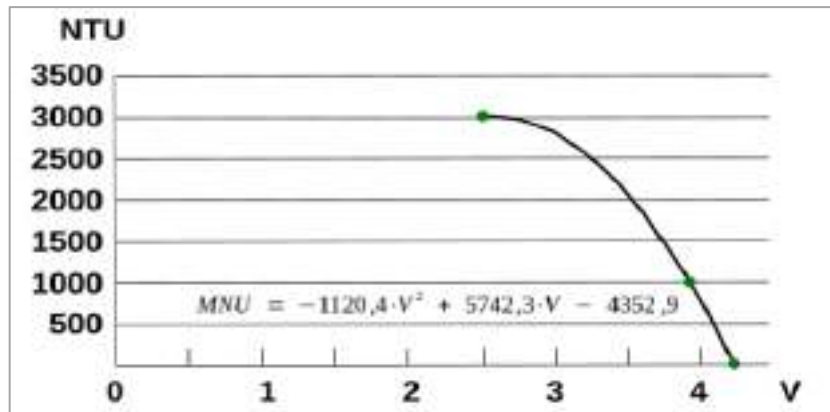


Ilustración 4-26: Curva característica de relación entre la turbidez y la tensión media

Fuente: Coca F., 2022

Para calibrar el sensor debemos conectar a la fuente de 5 V a la tarjeta de adaptación del sensor, y medir con la ayuda de un multímetro el voltaje de salida en los pines de tierra y señal, y ajustando el potenciómetro cuadrado de color azul, Ilustración 4-27, se ajusta hasta obtener los 4,1 V de salida quedando finalmente calibrado.



Ilustración 4-27: Calibración de tarjeta de adaptación para sensor de turbidez

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Calibrado el sensor se realiza un mapeo de valores para que estén en un rango de 0 NTU a 300 NTU dentro del código de programación del Arduino IDE “NTU_val = mapFloat(voltaje, 0, 4.1, 300.0, 0);” traducido el código nos indica que cuando el voltaje se encuentre en 4,1 V el valor de NTU será 0 y cuando el voltaje dé lecturas menores a los 4,1 V el valor de la turbidez irá aumentando hasta los 300 NTU según corresponda.

En la Ilustración 4-28 se muestra el resultado del sensor de turbidez para agua pura, el cual da una lectura del sensor de 0 NTU.

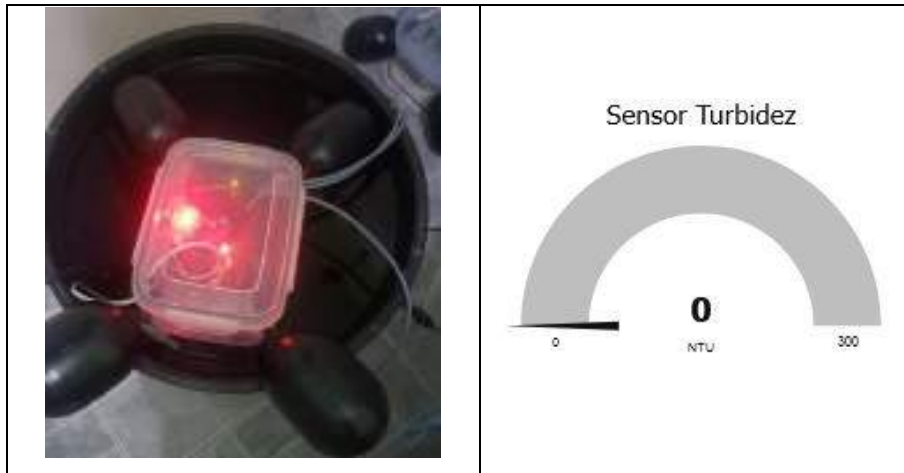


Ilustración 4-28: Prueba de sensor de turbidez en agua pura

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-29 se muestra el resultado del sensor de turbidez para agua con poca turbidez, el cual da una lectura del sensor de 25,75 NTU.

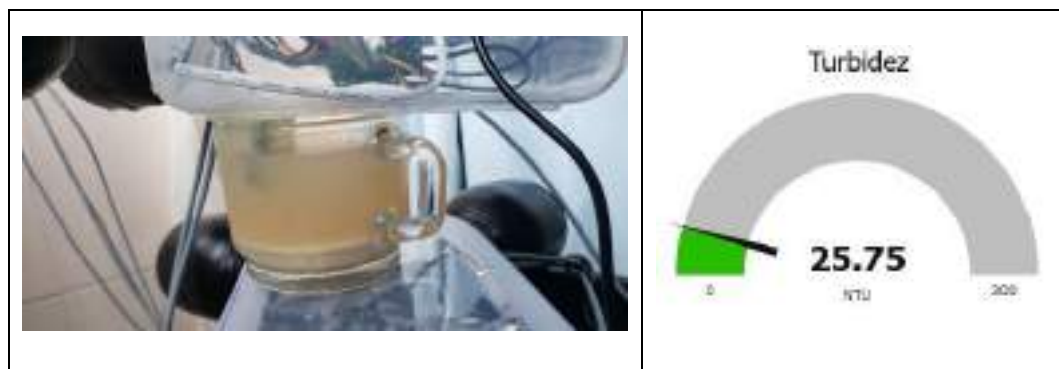


Ilustración 4-29: Prueba de sensor en agua con poca turbidez

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-30 se muestra el resultado del sensor de turbidez para agua con alta turbidez, el cual da una lectura del sensor de 238,07 NTU.

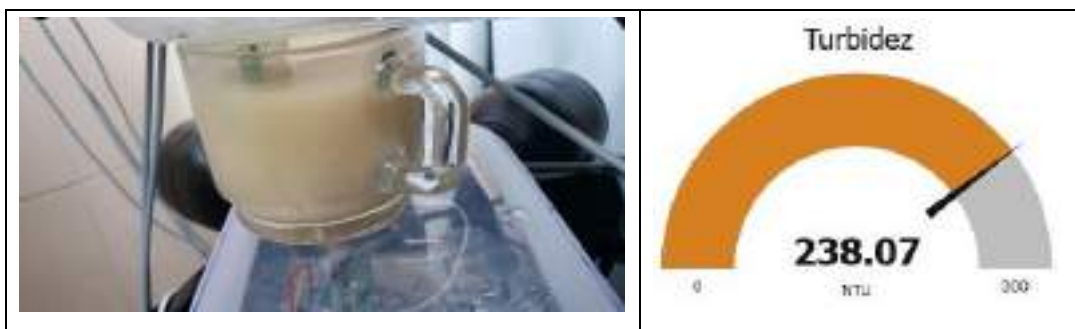


Ilustración 4-30: Prueba de sensor en agua con alta turbidez

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.6.2 Análisis de cobertura de los sistemas

El análisis de cobertura de los sistemas se lo realiza en dos partes, primero se realiza un análisis en el software de simulación de Radio Mobile para cada uno de los enlaces y luego se realiza un censado de los datos recibidos en la comunicación entre antenas LoRa como son RSSI, SNR y número de paquetes enviados y recibidos, este análisis es realizado en el lugar que ya van a ser instalados cada uno de los nodos para una mayor eficacia.

4.6.2.1 Cobertura para el sistema de Guanando

Haciendo uso del software de simulación Radio Mobile se analiza primero el radioenlace entre los módulos de comunicación LoRa RYLR998 con sus datos de operación correspondientes como se indica en la Ilustración 4-31.

The screenshot shows the 'Sistemas' configuration window in Radio Mobile. The window has tabs for 'Parámetros', 'Topología', 'Miembros', 'Sistemas', and 'Estilo'. The 'Sistemas' tab is active. The configuration includes:

- Channel: 00 (dropdown), Seleccionar desde VHF ... UHF ... (dropdown)
- Nombre del sistema: Sistema Guanando (text field)
- Potencia del Transmisor (Watt): 0,1584893 (text field), (dBm) 22 (text field)
- Umbral del receptor (μ V): 0,0794 (text field), (dBm) -129 (text field)
- Pérdida de la línea (dB): 0,5 (text field), (Cable+cavidades+conectores) (text)
- Tipo de antena: omni.ant (dropdown), Ver (button)
- Ganancia de antena (dBi): 2,15 (text field), (dBd) 0 (text field)
- Altura de antena (m): 5 (text field), (Sobre el suelo) (text)
- Pérdida adicional cable (dB/m): 0 (text field), (Si la altura de la antena difiere) (text)
- Buttons: Agregar a Radiosys.dat, Remove del Radiosys.dat

Ilustración 4-31: Llenado de las características de operación de la antena LoRa RYLR998

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Luego se procede a simular el enlace entre el nodo maestro 1 y el nodo esclavo 1 como se muestra en la Ilustración 4-32, notamos que el enlace tiene línea de vista directa y un adecuado despejamiento en la zona de Fresnel teniendo libre 1,1 veces la primera zona, además el Nivel de RX es de -58.9 dBm y acorde al nivel mínimo de sensibilidad de recepción que es de -129 dBm los datos enviados en el enlace se transmitirán correctamente.

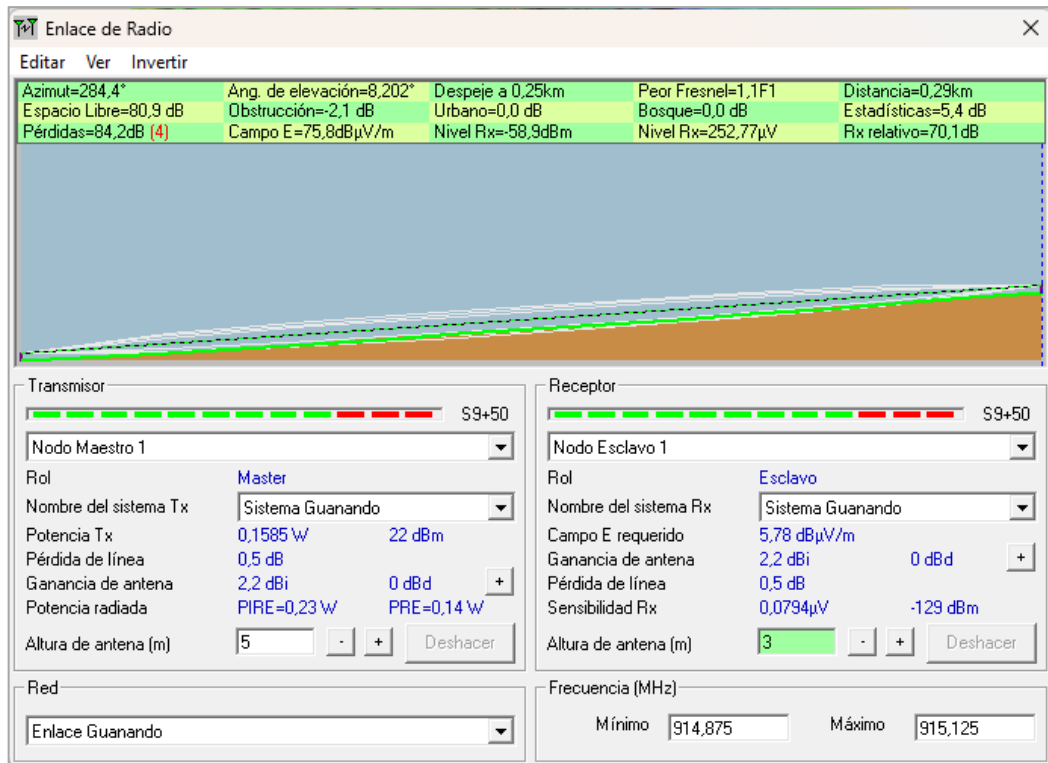


Ilustración 4-32: Enlace de radio LoRa con antena RYLR998 para Guanando

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Establecido el enlace se simula el mapa de cobertura para un alcance máximo de 10 Km como se indica en la Ilustración 4-33, donde se tiene como resultado una buena recepción de la señal desde el nodo master 1 al nodo esclavo 1 con aproximadamente -93 dBm según el mapa.

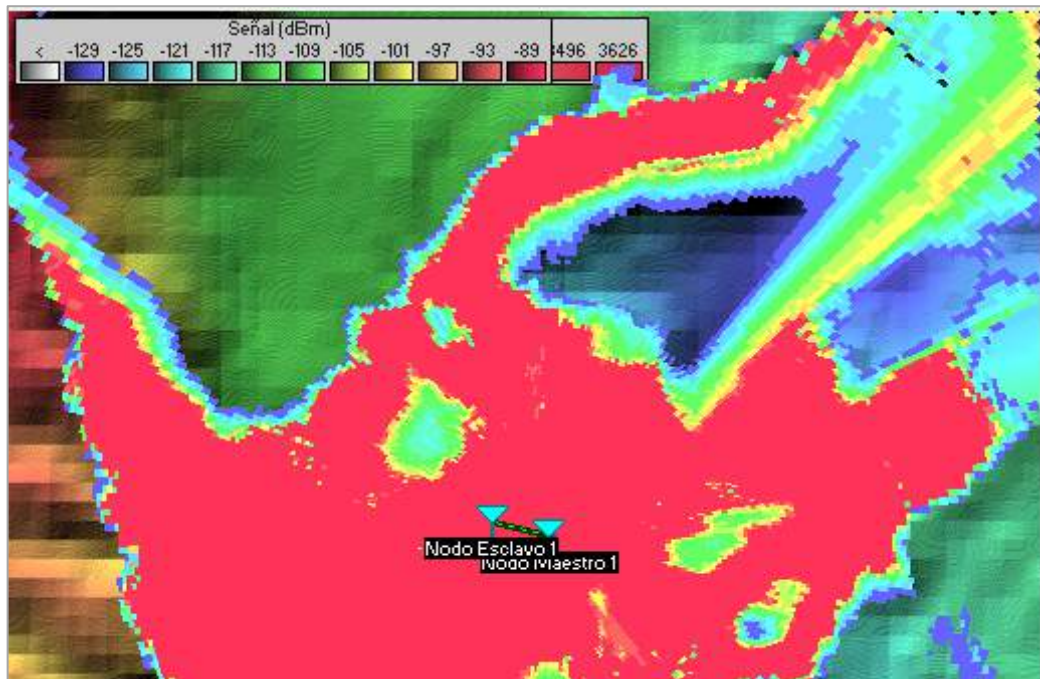


Ilustración 4-33: Mapa de cobertura antena LoRa RYLR998 para Guanando

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Finalmente se realiza pruebas físicamente en los puntos establecidos para cada uno de los nodos, para verificar la existencia de cobertura se hace uso de los datos que RSSI, SNR y número de paquetes proporcionados por los mismos módulos LoRa RYLR998. En la Ilustración 4-34 se indica el lugar donde fueron ubicados los nodos master y esclavo LoRa para las pruebas de cobertura.



Ilustración 4-34: Prueba de cobertura de módulos LoRa RYLR998 en Guanando

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los datos receptados desde el nodo esclavo 1 por el nodo maestro 1 se indican en la Ilustración 4-35, cabe mencionar que los datos recopilados son de después de mantenerlos fijos a los nodos por aproximadamente 30 min con la finalidad de tener valores más exactos, los valores son recuperados mediante el monitor serial de Arduino IDE.

```
ID_ANTENA:3 DATOS:25.00/10/296/319/0 NUM:18 RSSI:-78dBm SNR:11
ID_ANTENA:3 DATOS:25.00/10/706/599/0 NUM:18 RSSI:-85dBm SNR:9
ID_ANTENA:3 DATOS:25.00/10/576/546/0 NUM:18 RSSI:-78dBm SNR:10
ID_ANTENA:3 DATOS:25.00/10/504/436/0 NUM:18 RSSI:-78dBm SNR:10
```

Ilustración 4-35: Datos de comunicación entre nodo maestro 1 y nodo esclavo 1

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Realizadas las pruebas de cobertura para el sistema de Guanando queda comprobado que existe una relación entre lo simulado y lo real dándonos como resultado una comunicación exitosa.

4.6.2.2 Cobertura para el sistema de Huillis

Realizando el mismo proceso anterior con el software de simulación Radio Mobile se analiza primero el radioenlace entre los módulos de comunicación LoRa RYLR993 con sus datos de operación correspondientes como se indica en la Ilustración 4-36.

Parámetros	Topología	Miembros	Sistemas	Estilo
00			Seleccionar desde VHF ... UHF ...	
Nombre del sistema		Sistema Huillis		
Potencia del Transmisor (Watt)	0,1584893	(dBm)	22	
Umbral del receptor (µV)	0,0089	(dBm)	-148	
Pérdida de la línea (dB)	0,5	(Cable+cavidades+conectores)		
Tipo de antena	omni.ant	Ver		
Ganancia de antena (dBi)	5	(dBd)	2,85	
Altura de antena (m)	4	(Sobre el suelo)		
Pérdida adicional cable (dB/m)	0	(Si la altura de la antena difiere)		
Agregar a Radiosys.dat		Remover del Radiosys.dat		

Ilustración 4-36: Llenado de las características de operación de la antena LoRa RYLR993

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Luego se procede a simular el enlace entre el nodo maestro 2 y el nodo esclavo 2 como se muestra en la Ilustración 4-37, notamos que el enlace no tiene línea de vista directa, tiene una obstrucción a 2,32 Km desde el transmisor, así como la zona de Fresnel está obstruido 361,5 veces la primera zona, además el nivel de RX es de -217,1 dBm lo cual sobrepasa el nivel de sensibilidad mínima que es de -148 dBm, por tanto según los datos de simulación para el radioenlace no tiene las condiciones apropiadas para establecer la comunicación, pero se debe tomar en cuenta que los módulos LoRa tienen la capacidad de sobrepasar los obstáculos haciendo ajustes del Spreading Factor haciendo posible la comunicación en condiciones como ésta.

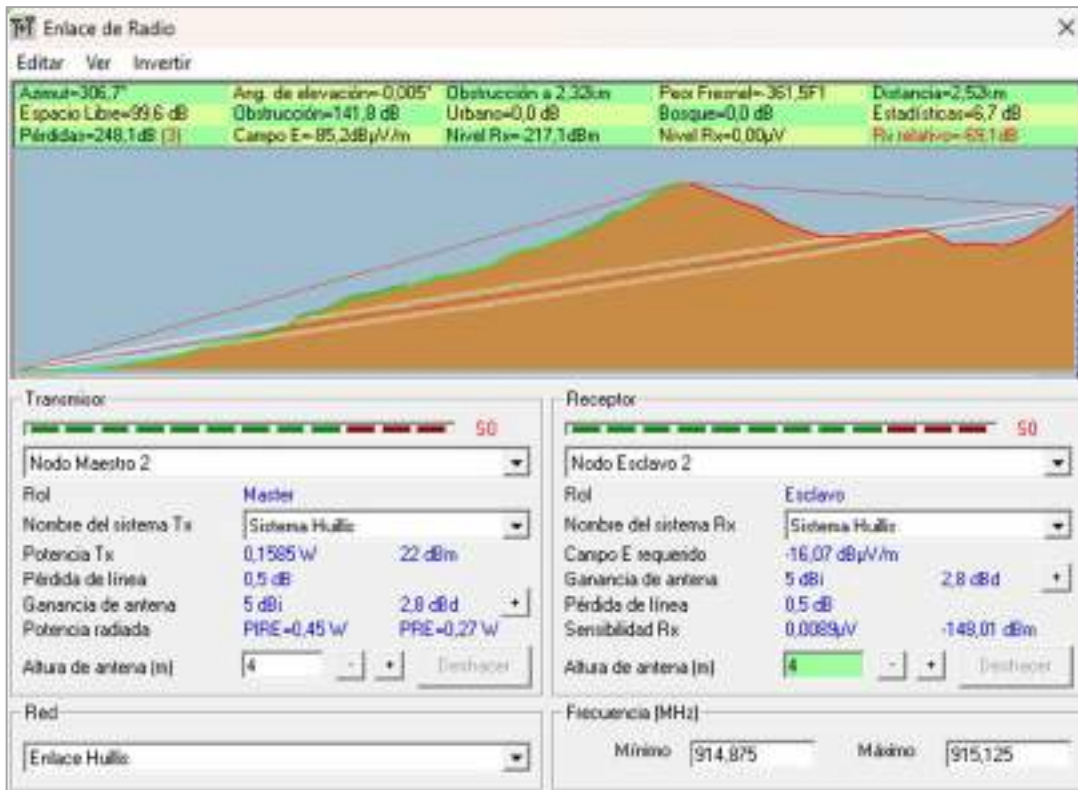


Ilustración 4-37: Enlace de radio LoRa con antena RYLR993 para Huillis

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Establecido el enlace se simula el mapa de cobertura para un alcance máximo de 10 Km como se indica en la Ilustración 4-38, donde se tiene como resultado una recepción de la señal que se aproxima a los -145 dBm según el mapa, llegando casi al umbral mínimo de -148 dBm.

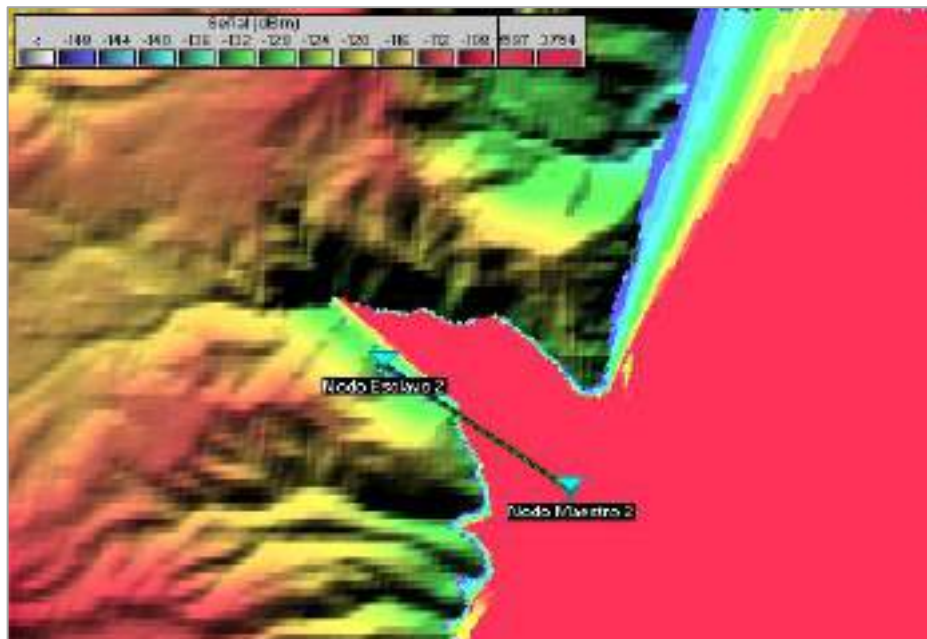


Ilustración 4-38: Mapa de cobertura antena LoRa RYLR993 para Huillis

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Finalmente se realizan pruebas físicas en los puntos establecidos para cada uno de los nodos con los módulos LoRa RYLR993. En la Ilustración 4-39 se indica el lugar donde fueron ubicados los nodos master y esclavo LoRa para las pruebas de cobertura en la localidad de Huillis.



Ilustración 4-39: Prueba de cobertura de módulos LoRa RYLR993 en Huillis

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los datos receptados desde el nodo esclavo 2 por el nodo maestro 2 se indican en la Ilustración 4-40, los datos tomados son después de 30 min establecido el enlace para tener valores más exactos.

```
ID_ANTENA:1 DATOS: -127.00/-226.55/260/260/0 NUM:25 RSSI: -112dBm SNR: -10
ID_ANTENA:1 DATOS: -127.00/-230.59/257/258/0 NUM:25 RSSI: -112dBm SNR: -7
ID_ANTENA:1 DATOS: -105.00/-223.55/259/260/0 NUM:25 RSSI: -112dBm SNR: -14
ID_ANTENA:1 DATOS: -127.00/-225.55/264/263/0 NUM:25 RSSI: -112dBm SNR: -11
ID_ANTENA:1 DATOS: -127.00/-219.60/268/265/0 NUM:25 RSSI: -112dBm SNR: -13
ID_ANTENA:1 DATOS: -127.00/-225.55/259/258/0 NUM:25 RSSI: -112dBm SNR: -11
ID_ANTENA:1 DATOS: -127.00/-227.56/260/260/0 NUM:25 RSSI: -113dBm SNR: -13
```

Ilustración 4-40: Datos de comunicación entre nodo maestro 2 y nodo esclavo 2

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Realizadas las pruebas de cobertura para el sistema de Huillis queda comprobado que existe una relación entre la simulación del mapa de cobertura y las mediciones reales dándonos como resultado una comunicación exitosa, además en la ultima prueba se puede afirmar que el RSSI es de -112 dBm siendo adecuado para la comunicación ya que la sensibilidad mínima permitida de RX es de -148 dBm.

4.6.3 Análisis de latencia de los sistemas

El análisis de latencia de los sistemas se los realiza en dos fases, la primera desde el nodo esclavo hasta el nodo maestro, la segunda del nodo maestro hasta el servidor de Node-RED (publicación y suscripción mediante broker MQTT HiveMQ) y finalmente se tiene una tercera fase que es túnel de Ngrok para la dirección pública donde se obtiene el dashboard que contiene resultados de ambos sistemas.

4.6.3.1 Latencia del sistema para Guanando

Fase 1: Con ayuda del código de Arduino se realiza un ping desde el nodo esclavo 1 al nodo maestro 1 durante 20 min teniendo como resultado los promedios que se muestran en la Tabla 4-1. Cabe mencionar que los resultados del ping también se pueden obtener desde los reportes, Ilustración 4-41.

	A	B	C	D	E	F
1	Tiempo (s)	Ping	Fecha			
2	1		490 Tue Jan 30 2024 15:59:29 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
3	2		460 Tue Jan 30 2024 15:59:30 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
4	3		300 Tue Jan 30 2024 15:59:31 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
5	4		490 Tue Jan 30 2024 15:59:32 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
6	5		490 Tue Jan 30 2024 15:59:33 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
7	6		470 Tue Jan 30 2024 15:59:34 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
8	7		450 Tue Jan 30 2024 15:59:35 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
9	8		470 Tue Jan 30 2024 15:59:36 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
10	9		480 Tue Jan 30 2024 15:59:37 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
11	10		480 Tue Jan 30 2024 15:59:38 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
12	11		490 Tue Jan 30 2024 15:59:39 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
13	12		500 Tue Jan 30 2024 15:59:40 GMT-0500 (hora de Ecuador)			
14	13		460 Tue Jan 30 2024 15:59:41 GMT-0500 (hora de Ecuador)			

Ilustración 4-41: Reporte de ping de nodo esclavo a nodo maestro

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Tabla 4-1: Latencia nodo esclavo 1 y maestro 1

# Muestras	#Paquetes promedio	SF	Bandwidth	Coding Rate	Distancia enlace	Tiempo respuesta promedio
1200	49 bytes	9	125 kHz	1	0,291 km	479 ms

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Fase 2: Se mide el tiempo de respuesta que existe desde la publicación de los datos censados por parte del nodo maestro 1 hasta la recuperación de estos datos a través de la suscripción haciendo uso del protocolo MQTT desde el servidor de Node-RED, para ello se realiza un ping MQTT

simple haciendo uso de un Flow desde Node-RED, Ilustración 4-42, los resultados se muestran en la Tabla 4-2.

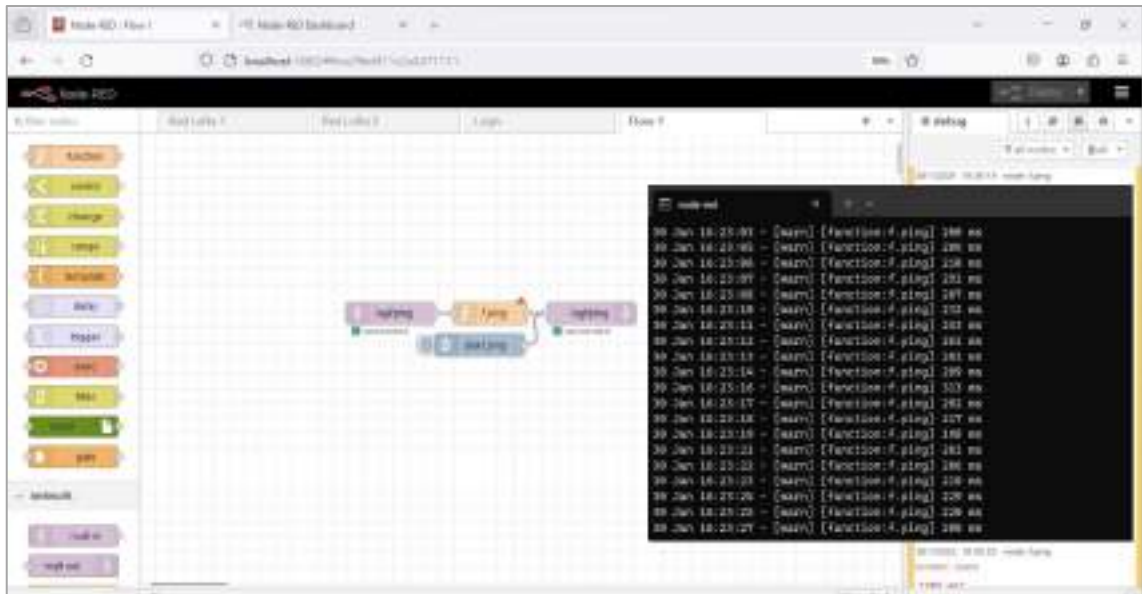


Ilustración 4-42: ping publicación-suscripción al broker MQTT desde Node-RED

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Tabla 4-2: Latencia nodo maestro 1 - servidor Node-RED

# Muestras	# Paquetes promedio	Tiempo respuesta promedio
1200	49 bytes	235 ms

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

El tiempo de latencia total para el sistema de Guanando es la suma de los tiempos de respuesta promedio de la fase 1 y fase 2 teniendo como resultado una latencia promedio de 714 ms.

4.6.3.2 Latencia del sistema para Huillis

Fase 1: Se realiza un ping desde el nodo esclavo 2 al nodo maestro 2 durante 20 min teniendo como resultado los promedios que se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Latencia nodo esclavo 2 y maestro 2

# Muestras	#Paquetes promedio	SF	Bandwidth	Coding Rate	Distancia enlace	Tiempo respuesta promedio
1200	49 bytes	9	125 kHz	1	2,7 km	626 ms

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Fase 2: Se mide el tiempo de respuesta que existe desde la publicación de los datos censados por parte del nodo maestro 2 hasta la recuperación de estos datos a través de la suscripción haciendo uso del protocolo MQTT desde el servidor de Node-RED, los resultados se muestran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Latencia nodo maestro 2 - servidor Node-RED

# Muestras	# Paquetes promedio	Tiempo respuesta promedio
1200	49 bytes	308 ms

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

El tiempo de latencia total para el sistema de Huillis es la suma de los tiempos de respuesta promedio de la fase 1 y fase 2 teniendo como resultado una latencia promedio de 934 ms.

4.6.3.3 Latencia de túnel Ngrok

Fase 3: En esta fase se mide el tiempo que demora el enlace URL de dominio público en abrirse tras generarse el túnel haciendo uso de Ngrok para mostrar la dashboard de Node-RED desde cualquier localidad con acceso a internet, para las pruebas se abre el enlace desde 4 navegadores diferentes lo resultados se muestran en la tabla 4-5. Cabe mencionar que para medir la velocidad del internet se hace uso de la herramienta online de Speedtest, Ilustración 4-43, y para medir la latencia del túnel se hace uso del inspector de Ngrok, Ilustración 4-44.



Ilustración 4-43: Test de velocidad de internet para el servidor

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

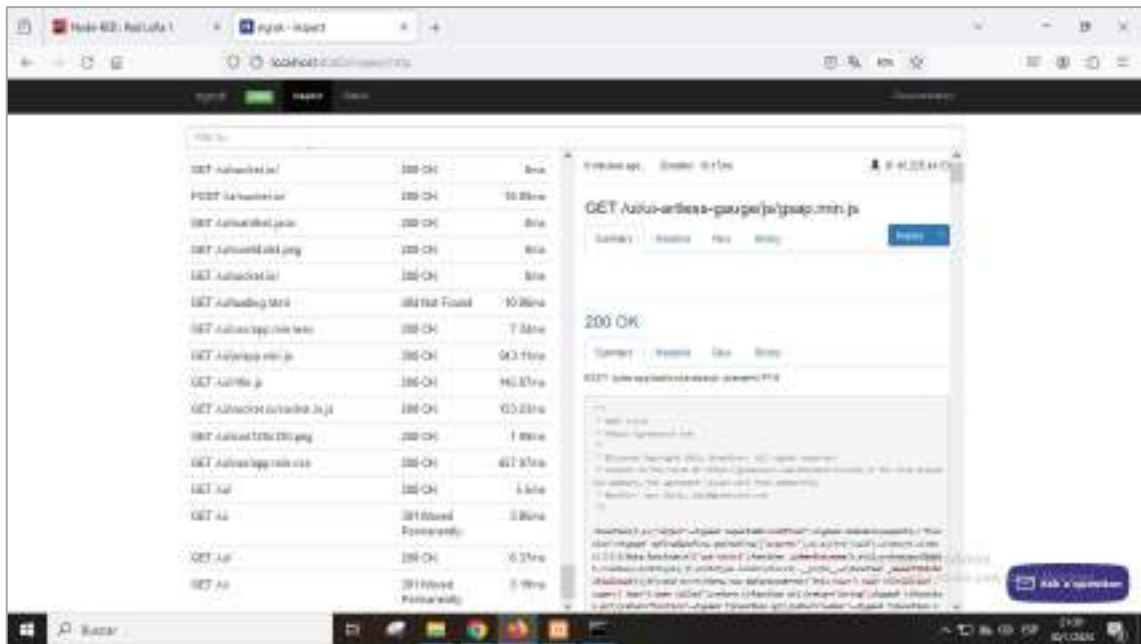


Ilustración 4-44: Inspector de Ngrok

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Tabla 4-5: Latencia de túnel Ngrok para distintos navegadores

Navegador	Velocidad internet Usuario		Velocidad internet Servidor		Latencia
	Downlink	Uplink	Downlink	Uplink	
Chrome	41,68 Mbps	48,21 Mbps	75.59 Mbps	76.75 Mbps	7432 ms
Mozilla	41,68 Mbps	48,21 Mbps			5515 ms
Microsoft	41,68 Mbps	48,21 Mbps			6290 ms
Móvil	15,36 Mbps	17,14 Mbps			10077 ms

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.6.4 Análisis de tasa de transmisión de los sistemas

En Arduino las tramas de datos enviadas desde el nodo esclavo al nodo master son de variables tipo String las cuales almacenan los datos en formato ASCII, donde cada carácter o paquete ocupa 1 byte o en su efecto 8 bits. En la Tabla 4-6 se indican los valores obtenidos de ambos sistemas de las mediciones de transmisión de paquetes durante 8 días consecutivos.

Tabla 4-6: Número de paquetes mínimos y máximos de los sistemas en la comunicación

Días censados	#Muestras totales	#Mínimo de paquetes	#Máximo de paquetes
8	23632	47 bytes	51 bytes

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Para el análisis de la tasa de transmisión se hace uso de la ecuación 4-1 y 4-2

$$1 \text{ byte} = 8 \text{ bits} \quad (4-1)$$

$$S = \frac{A}{T} \quad (4-2)$$

Dónde:

S: Tasa de transmisión [bps].

A: Cantidad de datos transferidos [bits].

T: Tiempo de transferencia de los datos [s].

Con los datos obtenidos en el apartado 4.6.3 se tiene el valor del tiempo de transferencia de los datos para cada uno de los sistemas y en la Tabla 4-6 se tiene la cantidad de datos transferidos en bytes, haciendo uso de la ecuación 4-1 se transforma a bits, los resultados de la tasa de transmisión se muestran en la tabla 4-7.

Tabla 4-7: Tasa de transmisión mínimo y máximo de ambos sistemas

Sistema	A mín	A máx	T	S mín	S máx
Guanando	376 bits	408 bits	714 ms → 0,714 s	526,61 bps	571,43 bps
Huillis	376 bits	408 bits	934 ms → 0,934 s	402.57 bps	436.83 bps

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Al analizar los resultados obtenidos con las características generales de la modulación LoRa se tiene que para un Spreading Factor de 9 con un ancho de banda de 125 kHz se puede tener un payload máximo de 53 bytes y una tasa de transmisión de hasta 1760 bps, por tanto, la tasa de transmisión de ambos sistemas es óptima para la transferencia de datos.

4.6.5 Análisis de consumo de energía de los sistemas

Para este análisis se hace uso del sensor de corriente ACS712, Ilustración 4-45, que permite medir la corriente y tensión del sistema, los datos leídos se recuperan en la misma base de datos de los reportes de censado, Ilustración 4-46, permitiendo tener a la par las medidas de consumo según la variación de los sensores.

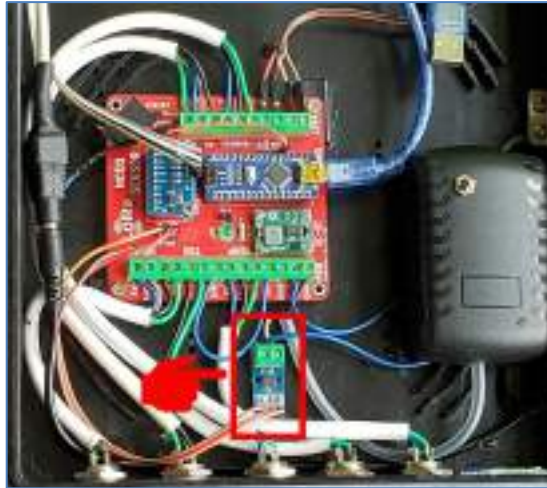


Ilustración 4-45: Sensor de corriente ACS172

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

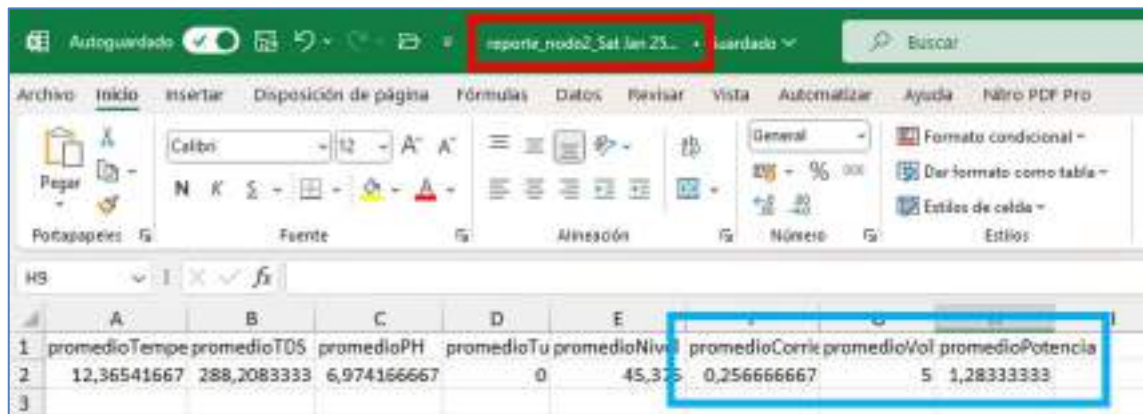


Ilustración 4-46: Reporte de censado con valores de consumo de energía

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los resultados promedio de los 8 días de censado se muestran en la Tabla 4-8 para el sistema de Guanando y en la Tabla 4-9 para el sistema de Huillis. Para el cálculo de la potencia se hace uso de la ecuación 4-3.

$$Promedio Potencia = Promedio Corriente \times Promedio Tensión \quad [W] \quad (4-3)$$

Tabla 4-8: Consumo de energía para sistema de Guanando

Día	Tiempo entre muestras	Promedio TDS (ppm)	Promedio pH	Promedio Turbidez (NTU)	Promedio Corriente (A)	Promedio Tensión (V)	Promedio Potencia (W)
01/20	10 seg	270,44	7,20	0,00	0,233	5,03	1,172
01/21	15 seg	270,08	7,36	0,34	0,234	5,03	1,177

01/22	30 seg	268,91	7,72	0,40	0,232	5,03	1,167
01/23	5 min	269,92	7,46	0,01	0,227	5,03	1,142
01/24	30 min	267,73	7,26	0,00	0,224	5,03	1,127
01/25	1 H	270	6,98	0,00	0,225	5,03	1,132
01/27	1 H	270,13	7,62	0,00	0,225	5,03	1,132
01/28	3 H	268,25	7,89	0,00	0,224	5,03	1,127

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Tras analizar los datos recopilados de los días de censado se llega a un consumo promedio de 228 mAh para el sistema de Guanando. Además, es evidente que el consumo de energía va a variar en pequeñas cantidades de acuerdo con las lecturas de los sensores.

Tabla 4-9: Consumo de energía para sistema de Huillis

Día	Tiempo entre muestras	Promedio TDS (ppm)	Promedio pH	Promedio Turbidez (NTU)	Promedio Corriente (A)	Promedio Tensión (V)	Promedio Potencia (W)
01/20	10 seg	286,64	6,50	0,00	0,289	5,00	1,445
01/21	15 seg	286,92	7,82	0,00	0,286	5,00	1,430
01/22	30 seg	284,46	6,94	0,00	0,277	5,00	1,385
01/23	5 min	287,58	7,02	0,00	0,271	5,00	1,355
01/24	30 min	288,06	7,28	0,00	0,264	5,00	1,320
01/25	1 H	288,21	6,97	0,00	0,257	5,00	1,285
01/27	1 H	287,67	6,88	0,00	0,255	5,00	1,275
01/28	3 H	287,25	7,50	0,00	0,258	5,00	1,290

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Tras analizar los datos recopilados de los días de censado se llega a un consumo promedio de 269 mAh para el sistema de Guanando.

4.7 Resultados obtenidos del sistema de monitoreo IoT

En el apartado de “REPORTES” del dashboard de Node-RED se generan y recuperan los reportes de los días de censado, dentro de cada reporte se encuentran los valores de temperatura, TDS, pH, turbidez, nivel, corriente, voltaje, potencia, número de paquetes, rssi, snr, ping y fecha/hora, para el análisis de las variables se toman los valores de 8 días con diferentes tiempos para la toma de muestras. Cabe mencionar que se realiza la toma de muestras con diferentes tiempos para

comprobar que el sistema está diseñado para funcionar correctamente en cualquiera de las condiciones de tiempo establecidos.

La instalación del sistema de monitoreo en cada localidad es realizada el sábado 20 de enero del 2024 con lo que se inicia el monitoreo a partir de las 16:16:00 y se finaliza el domingo 28 de enero del 2024 para ambos sistemas, cabe mencionar que el viernes 26 de enero no se registraron los valores en la base de datos debido a que se realizó las pruebas de latencia de los sistemas.

Día 20 de enero: Se toman muestras a partir de las 16:16:00 con intervalos de cada 10 segundos entre muestras, dando como resultado 2784 muestras por sistema y un total de 5568 muestras entre ambos. El resultado de los datos monitoreados de TDS se muestran en la Ilustración 4-47, dónde los valores para el sistema 1 (Guanando) varían de 264 a 277 ppm y para el sistema 2 (Huillis) varían de 281 a 289 ppm, teniendo una calidad de agua excelente según rangos establecidos por la OMS.

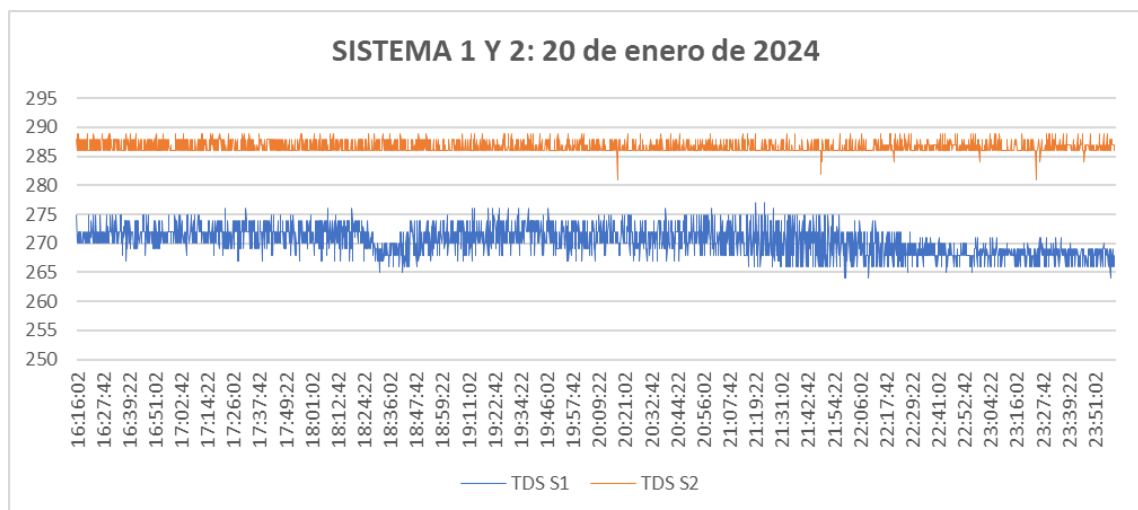


Ilustración 4-47: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 20/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los resultados de pH se muestran en la Ilustración 4-48, dónde los valores de pH para el sistema 1 varían de 6,49 a 8,22 y para el sistema 2 de 6,44 a 6,53 lo cual indica que los valores por debajo de 6,5 están fuera del rango establecido, a pesar de ello aún se encuentra en un nivel de pH neutro lo que no representa un problema.

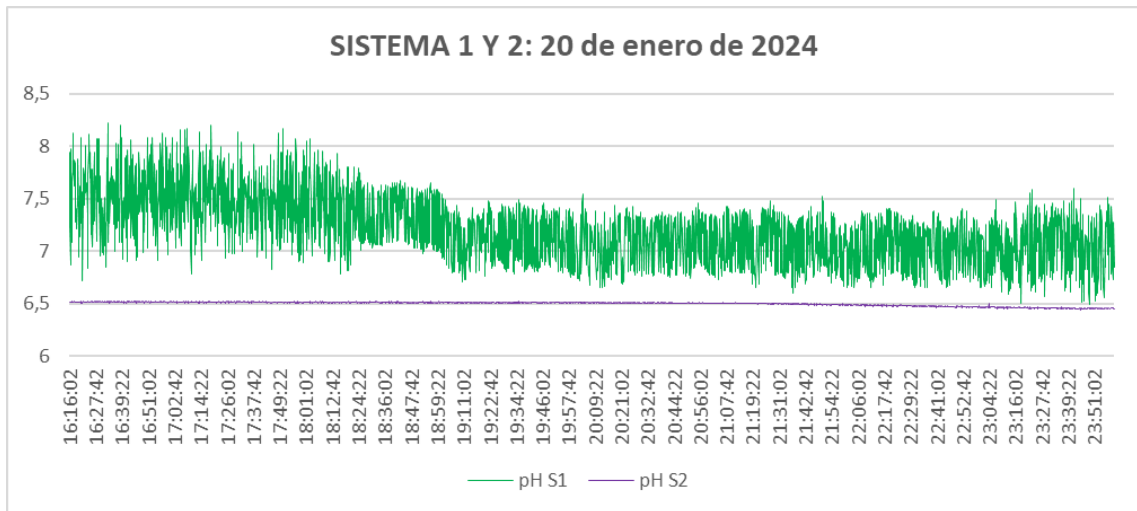


Ilustración 4-48: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 20/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los valores de turbidez se muestran en la Ilustración 4-49, para el sistema 1 varían de 0 a 0,24 NTU y para el sistema 2 de 0 a 1,94 NTU, ambos valores se encuentran dentro del rango permitido según la norma INEN 1108.

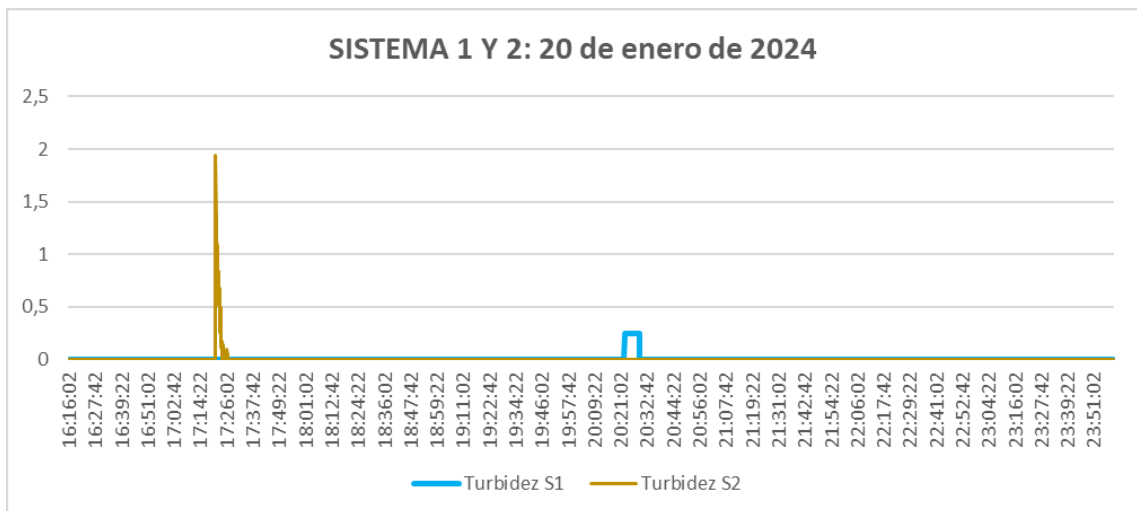


Ilustración 4-49: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 20/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Día 21 de enero: Se toman muestras a partir de las 00:00:01 hasta 23:59:46 con intervalos de cada 15 segundos entre muestras, dando un total de 11520 muestras entre ambos sistemas. El resultado de los datos monitoreados de TDS se muestran en la Ilustración 4-50, donde los valores para el sistema 1 varían de 262 a 278 ppm y para el sistema 2 de 201 a 289 ppm, teniendo una calidad de agua excelente según rangos establecidos por la OMS.

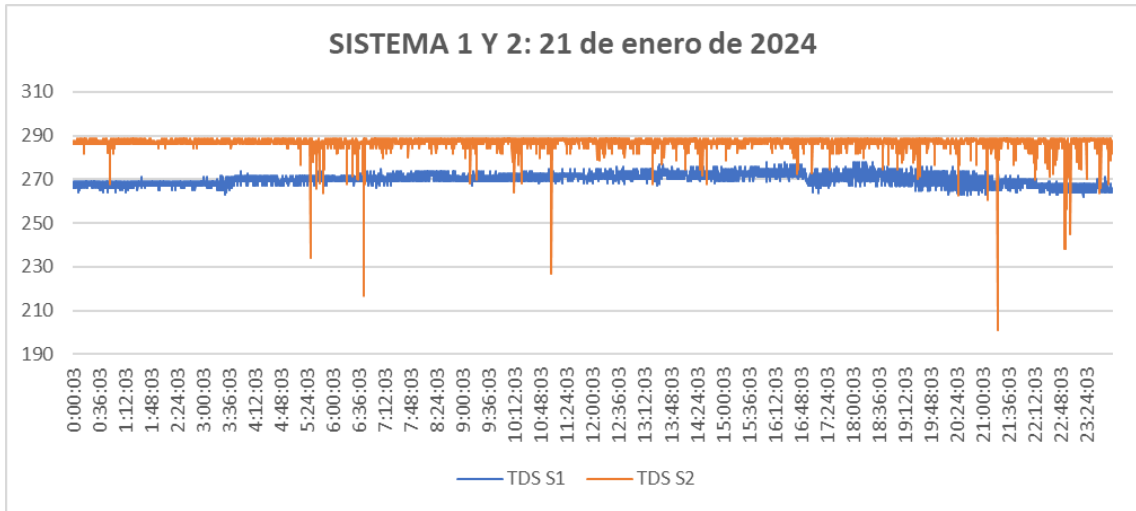


Ilustración 4-50: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 21/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los resultados de pH se muestran en la Ilustración 4-51, donde los valores de pH para el sistema 1 varían de 6,15 a 8,49 y para el sistema 2 de 6,6 a 7,9, lo cual indica que los valores por debajo de 6,5 están fuera del rango establecido, a pesar de ello aún se encuentra en un nivel de pH neutro lo que no representa un problema.

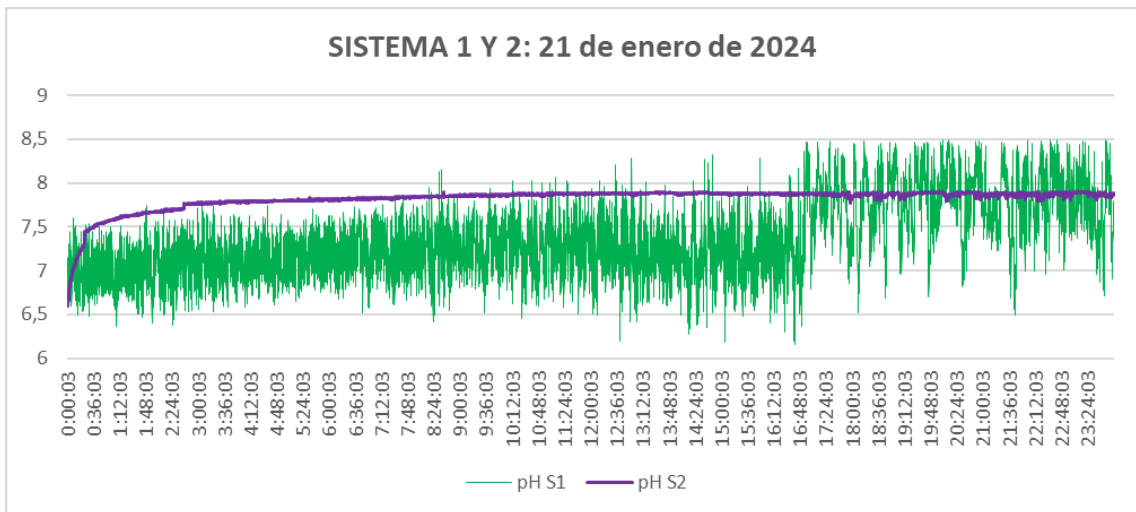


Ilustración 4-51: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 21/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los valores de turbidez se muestran en la Ilustración 4-52, para el sistema 1 varían de 0 a 1,14 NTU y para el sistema 2 de 0 a 0,83 NTU, ambos valores se encuentran dentro del rango permitido según la norma INEN 1108.

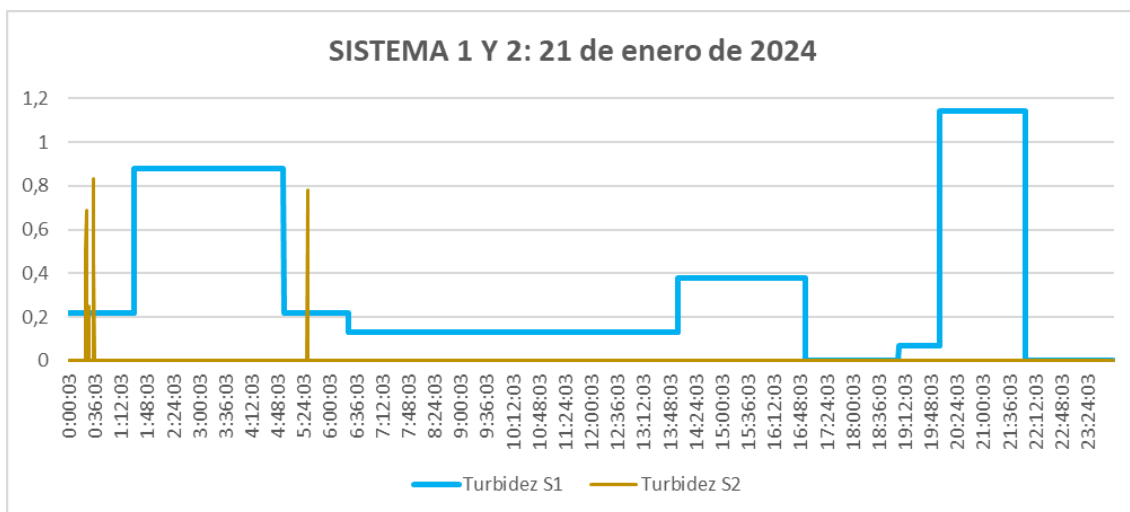


Ilustración 4-52: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 21/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Día 22 de enero: Se toman muestras a partir de las 00:00:03 hasta 23:59:33 con intervalos de cada 30 segundos entre muestras, dando un total de 5760 muestras entre ambos sistemas. El resultado de los datos monitoreados de TDS se muestran en la Ilustración 4-53, dónde los valores para el sistema 1 varían de 262 a 295 ppm y para el sistema 2 de 232 a 291 ppm, teniendo una calidad de agua excelente según rangos establecidos por la OMS.

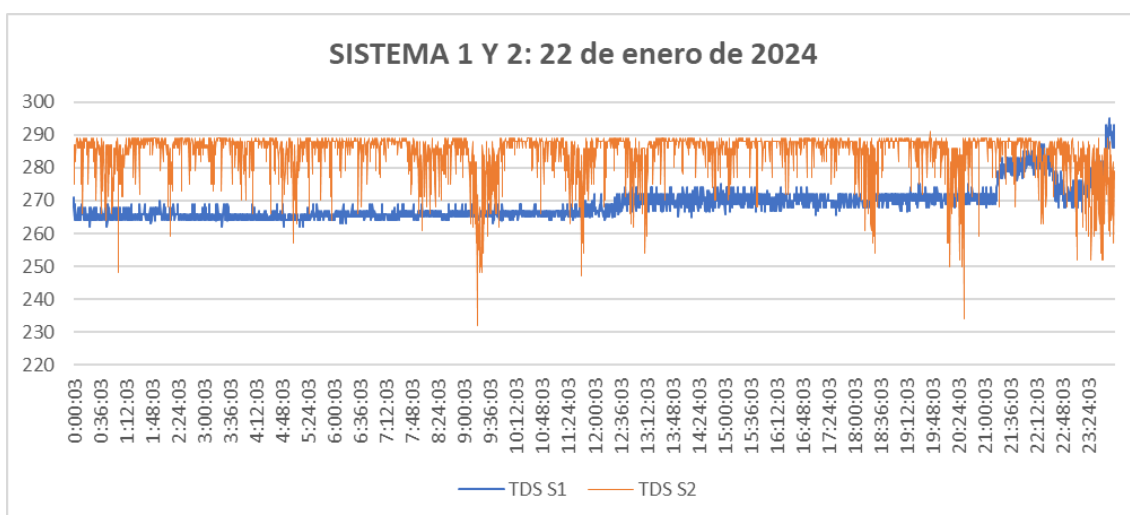


Ilustración 4-53: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 22/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los resultados de pH se muestran en la Ilustración 4-54, dónde los valores de pH para el sistema 1 varían de 6,77 a 8,7 lo cual indica que los valores por encima de 8,5 están fuera del rango establecido, dando un pH de nivel alcalino, esto a razón de que regularmente se dosifica solución

de cloro por goteo al tanque de Guanando y para el sistema 2 varían de 6,7 a 7,82 los cuales están dentro de los rangos permitidos según la norma INEN 1108.

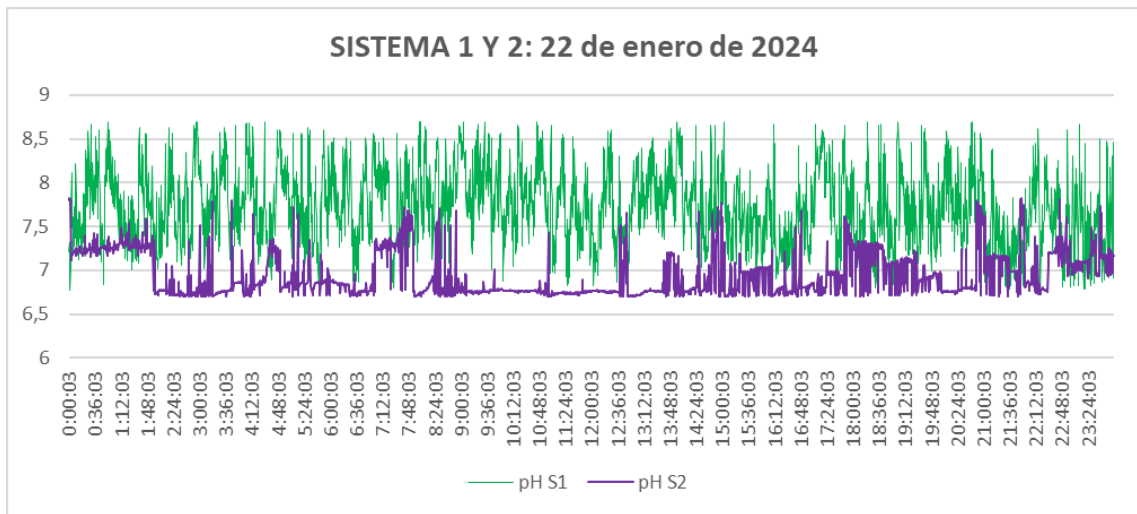


Ilustración 4-54: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 22/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los valores de turbidez se muestran en la Ilustración 4-55, para el sistema 1 varían de 0 a 1,5 NTU y para el sistema 2 de 0 a 0,96 NTU, ambos valores se encuentran dentro del rango permitido según la norma INEN 1108.

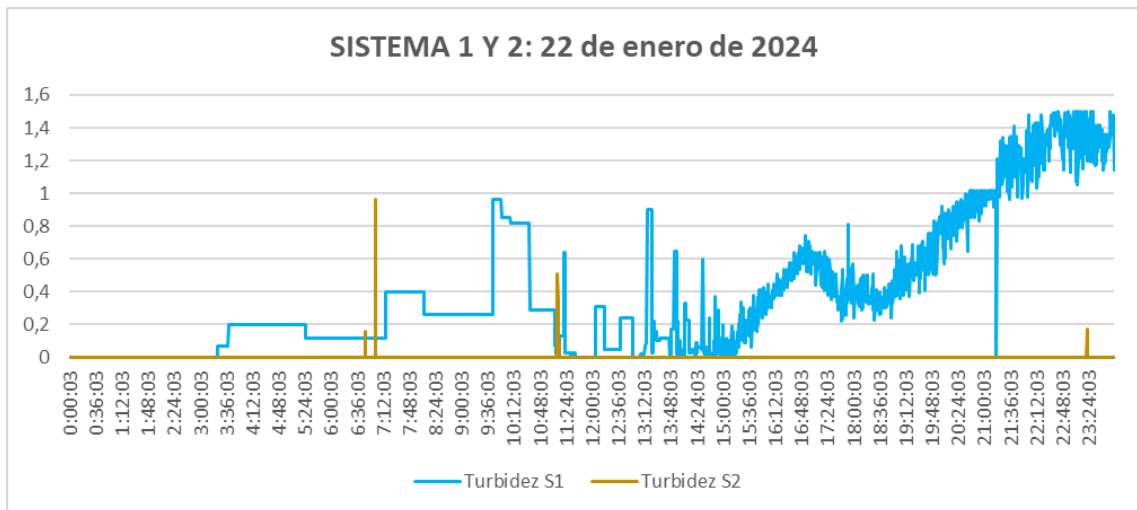


Ilustración 4-55: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 22/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Día 23 de enero: Se toman muestras a partir de las 00:00:03 hasta 23:55:03 con intervalos de cada 5 minutos entre muestras, dando un total de 576 muestras entre ambos sistemas. El resultado de los datos monitoreados de TDS se muestran en la Ilustración 4-56, donde los valores para el

sistema 1 varían de 251 a 275 ppm y para el sistema 2 de 262 a 289 ppm, teniendo una calidad de agua excelente según rangos establecidos por la OMS.

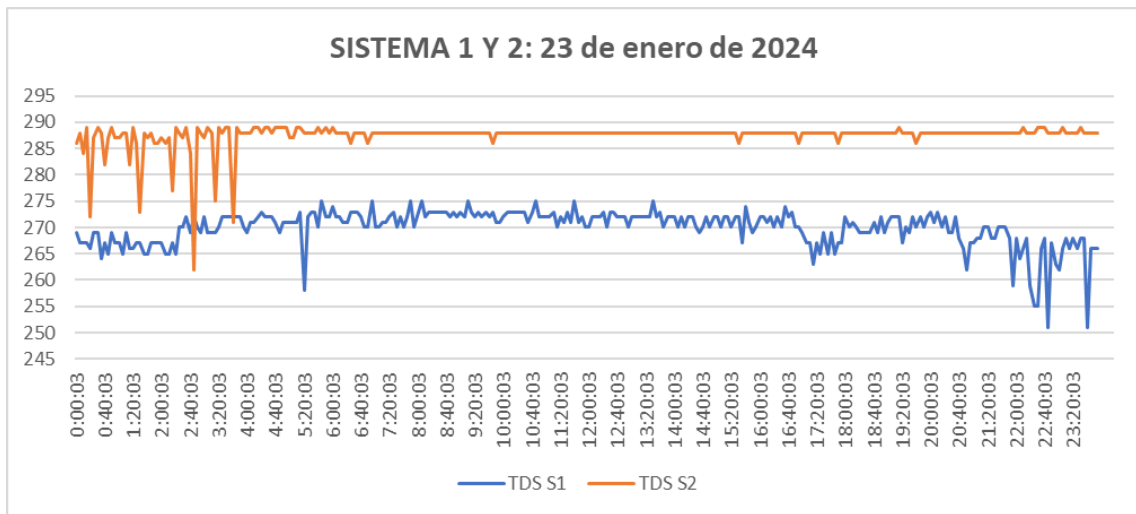


Ilustración 4-56: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 23/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los resultados de pH se muestran en la Ilustración 4-57, donde los valores de pH para el sistema 1 varían de 6,7 a 8,59 lo cual indica que los valores por encima de 8,5 están fuera del rango establecido, dando un pH de nivel alcalino, esto a razón de que regularmente se dosifica solución de cloro por goteo al tanque de Guanando y para el sistema 2 varían de 6,77 a 7,75 los cuales están dentro de los rangos permitidos según la norma INEN 1108.

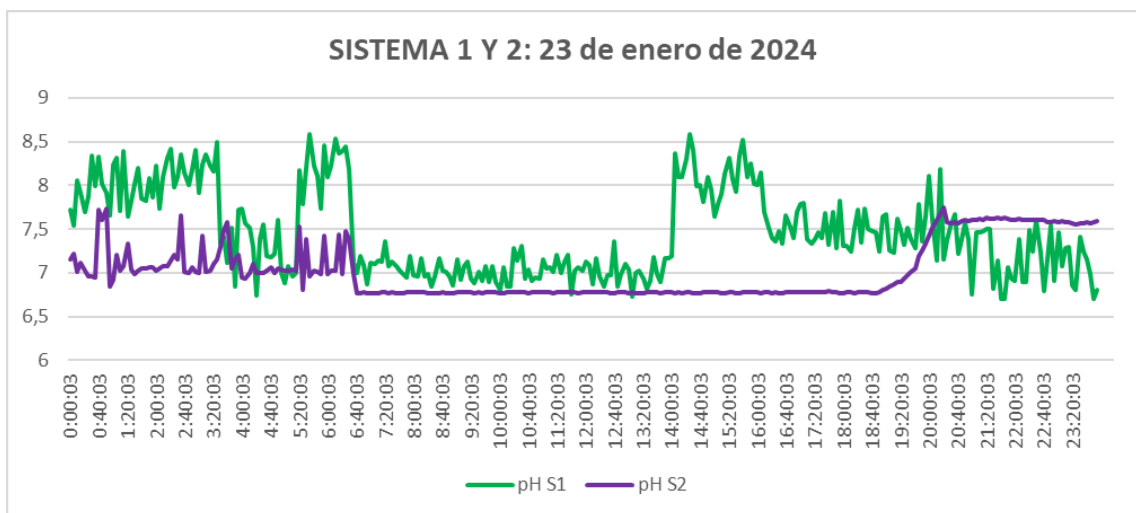


Ilustración 4-57: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 23/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los valores de turbidez se muestran en la Ilustración 4-58, para el sistema 1 varían de 0 a 0,92 NTU y para el sistema 2 se mantiene en 0 NTU, ambos valores se encuentran dentro del rango permitido según la norma INEN 1108.

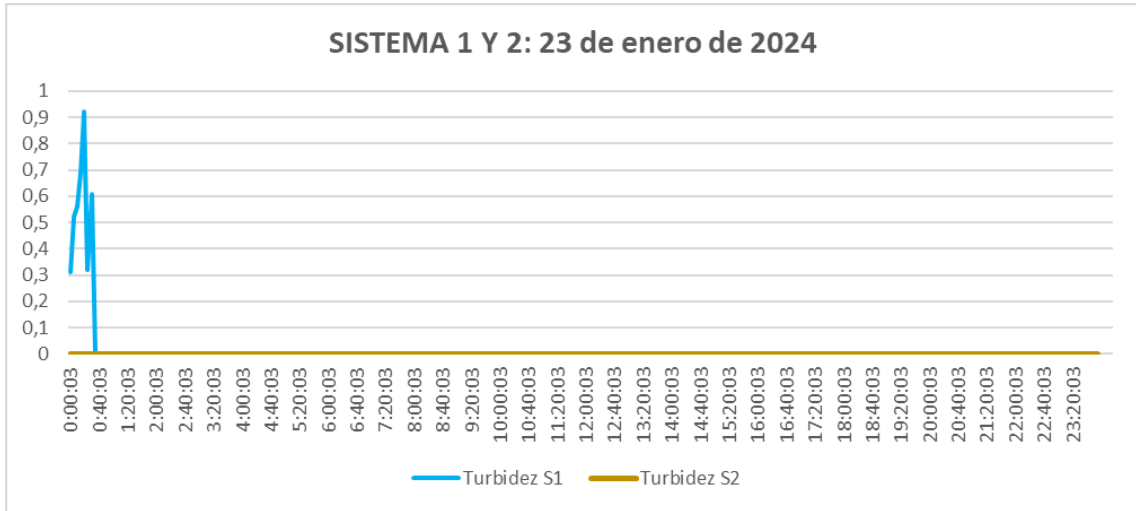


Ilustración 4-58: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 23/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Día 24 de enero: Se toman muestras a partir de las 00:00:07 hasta 23:30:07 con intervalos de cada 30 minutos entre muestras, dando un total de 96 muestras entre ambos sistemas. El resultado de los datos monitoreados de TDS se muestran en la Ilustración 4-59, dónde los valores para el sistema 1 varían de 253 a 276 ppm y para el sistema 2 de 288 a 289 ppm, teniendo una calidad de agua excelente según rangos establecidos por la OMS.

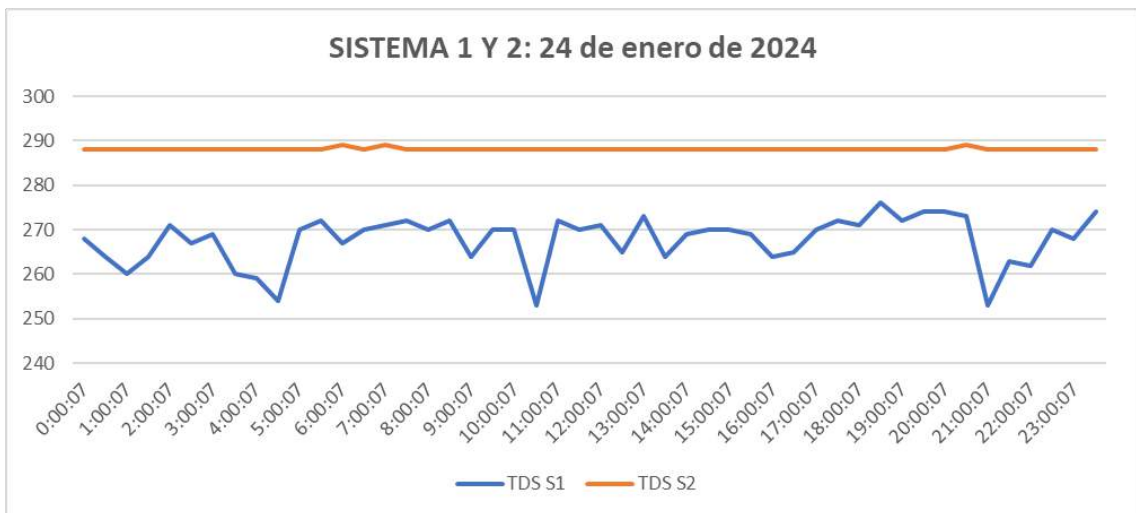


Ilustración 4-59: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 24/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los resultados de pH se muestran en la Ilustración 4-60, dónde los valores de pH para el sistema 1 varían de 6,52 a 8,45 y para el sistema 2 varían de 6,64 a 8,32, los cuales están dentro de los rangos permitidos según la norma INEN 1108.

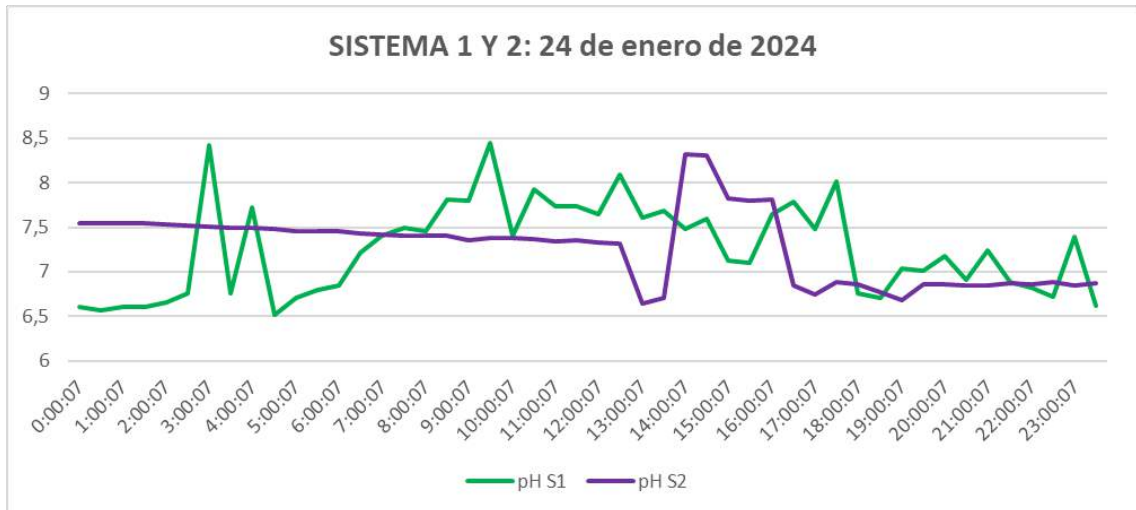


Ilustración 4-60: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 24/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los valores de turbidez se muestran en la Ilustración 4-61, en ambos casos los sistemas se mantienen en un valor de 0 NTU, ambos valores se encuentran dentro del rango permitido según la norma INEN 1108.

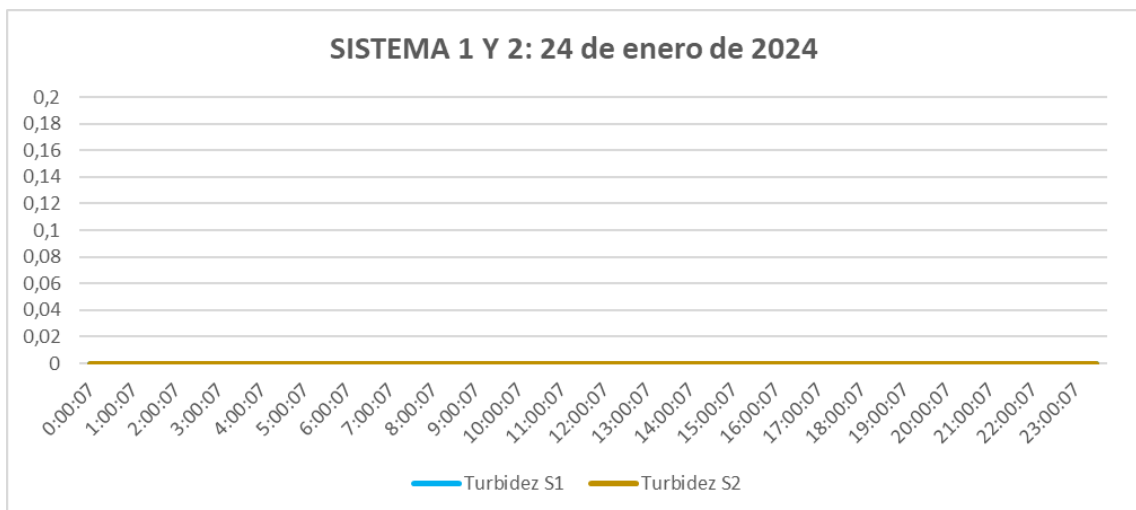


Ilustración 4-61: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 24/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Día 25 de enero: Se toman muestras a partir de las 00:01:13 hasta 23:01:15 con intervalos de cada 1 hora entre muestras, dando un total de 48 muestras entre ambos sistemas. El resultado de los datos monitoreados de TDS se muestran en la Ilustración 4-62, dónde los valores para el

sistema 1 varían de 263 a 274 ppm y para el sistema 2 de 288 a 289 ppm, teniendo una calidad de agua excelente según rangos establecidos por la OMS.

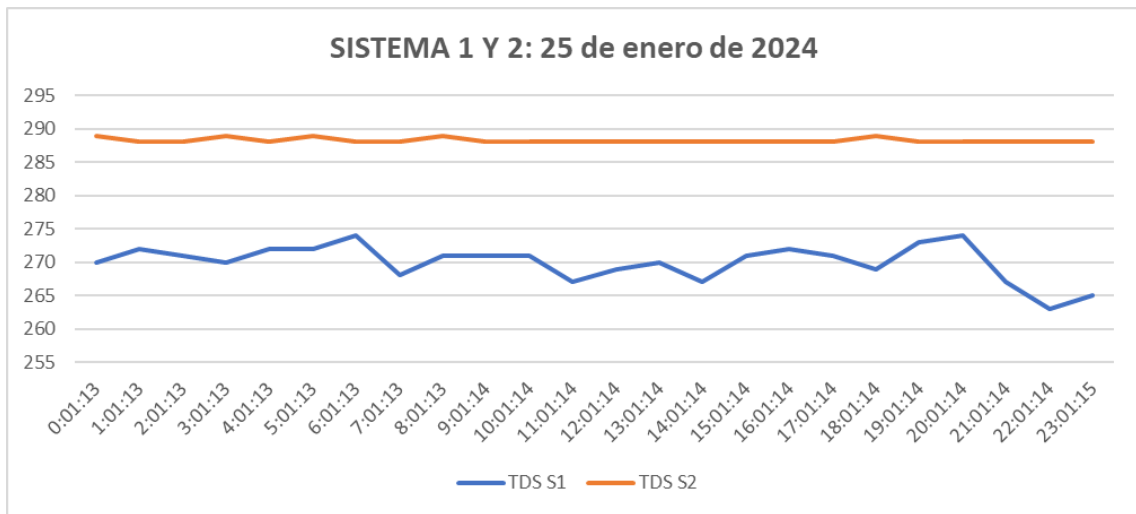


Ilustración 4-62: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 25/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los resultados de pH se muestran en la Ilustración 4-63, dónde los valores de pH para el sistema 1 varían de 6,57 a 8,37 y para el sistema 2 varían de 6,83 a 7,15 los cuales están dentro de los rangos permitidos según la norma INEN 1108.

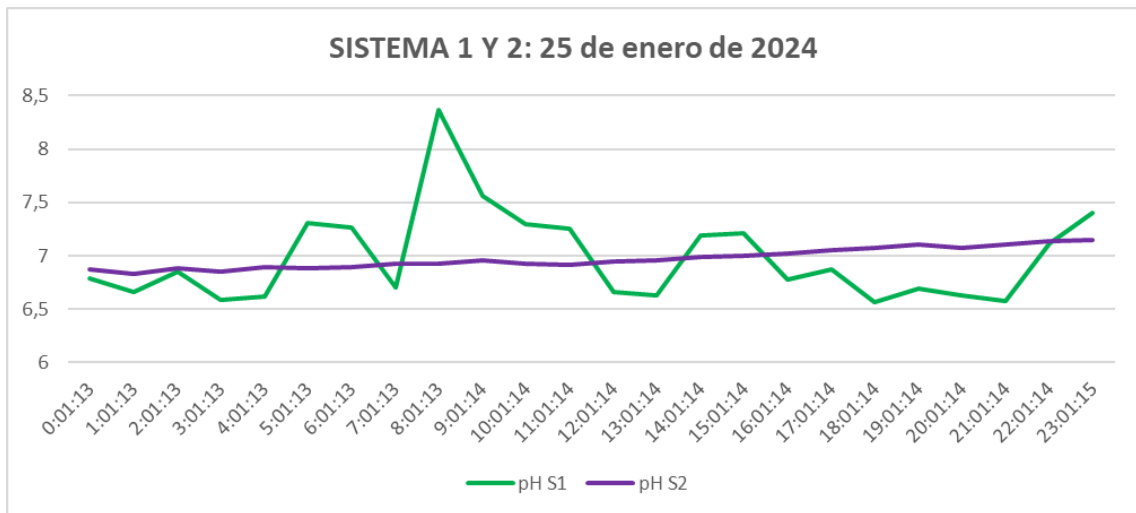


Ilustración 4-63: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 25/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los valores de turbidez se muestran en la Ilustración 4-64, en ambos casos los sistemas se mantienen en un valor de 0 NTU, ambos valores se encuentran dentro del rango permitido según la norma INEN 1108.

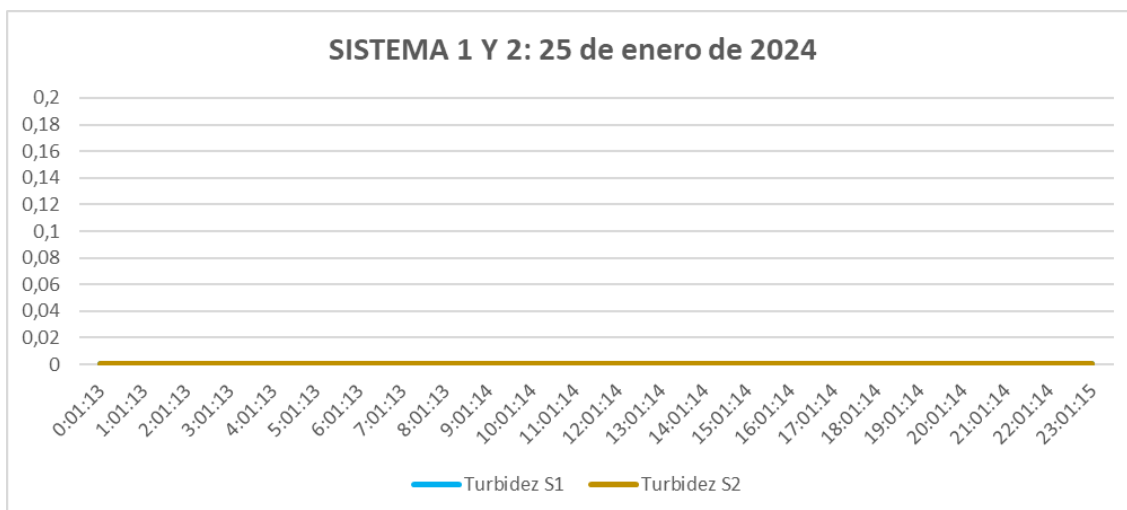


Ilustración 4-64: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 25/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Día 27 de enero: Se toman muestras a partir de las 00:10:05 hasta 23:10:05 con intervalos de cada 1 hora entre muestras, dando un total de 48 muestras entre ambos sistemas. El resultado de los datos monitoreados de TDS se muestran en la Ilustración 4-65, dónde los valores para el sistema 1 varían de 268 a 272 ppm y para el sistema 2 de 282 a 289 ppm, teniendo una calidad de agua excelente según rangos establecidos por la OMS.

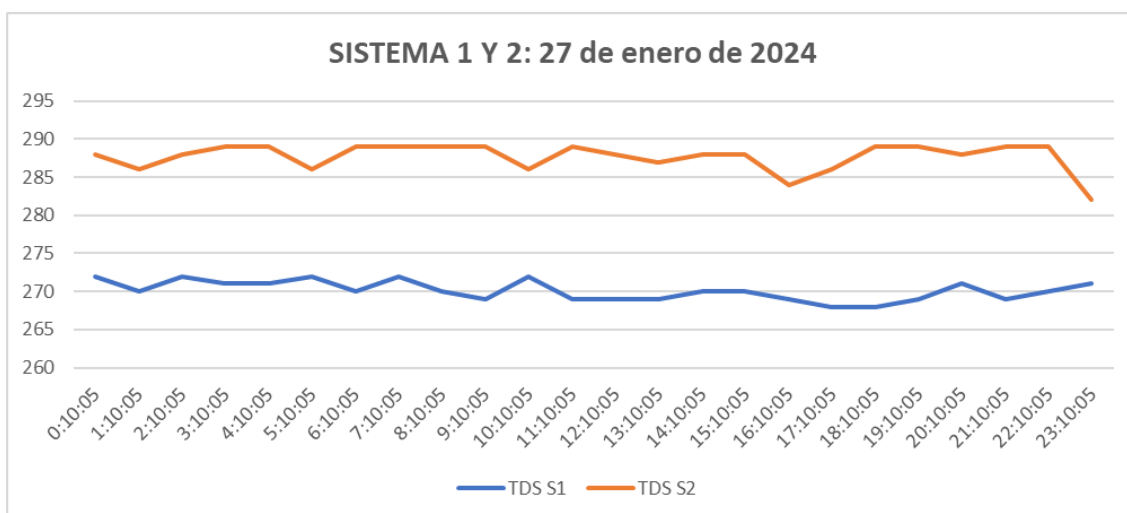


Ilustración 4-65: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 27/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los resultados de pH se muestran en la Ilustración 4-66, dónde los valores de pH para el sistema 1 varían de 6,81 a 7,85 y para el sistema 2 varían de 6,6 a 7,06 los cuales están dentro de los rangos permitidos según la norma INEN 1108.

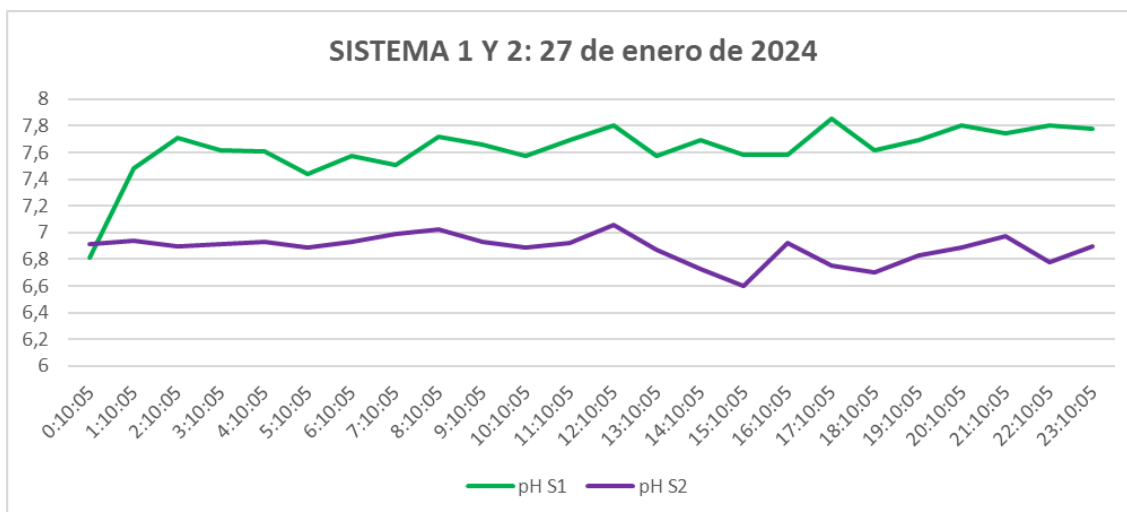


Ilustración 4-66: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 27/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los valores de turbidez se muestran en la Ilustración 4-67, en ambos casos los sistemas se mantienen en un valor de 0 NTU, ambos valores se encuentran dentro del rango permitido según la norma INEN 1108.

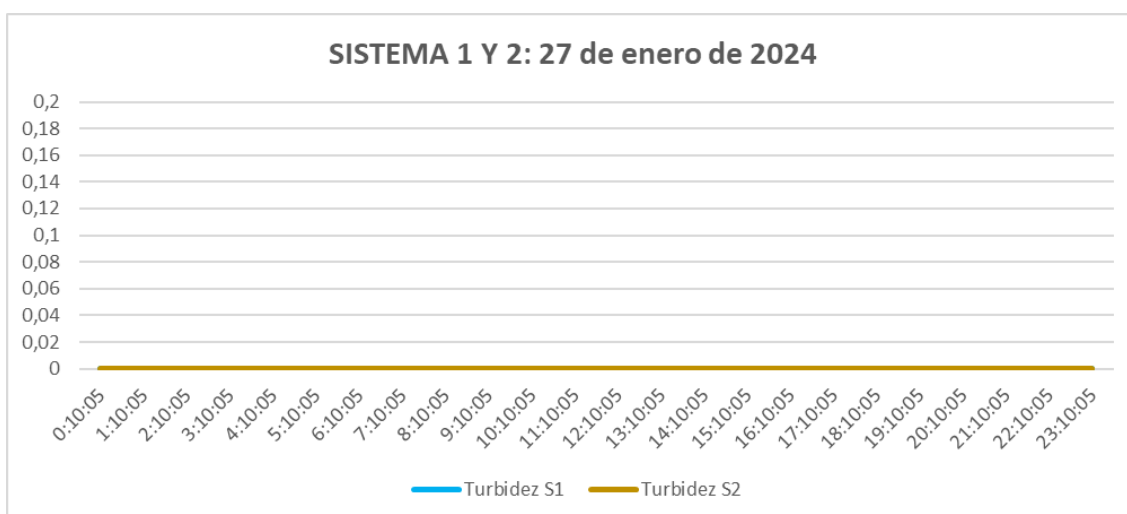


Ilustración 4-67: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 27/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Día 28 de enero: Se toman muestras a partir de las 00:37:50 hasta 21:37:50 con intervalos de cada 3 horas entre muestras, dando un total de 16 muestras entre ambos sistemas. El resultado de los datos monitoreados de TDS se muestran en la Ilustración 4-68, dónde los valores para el sistema 1 varían de 267 a 270 ppm y para el sistema 2 de 286 a 289 ppm, teniendo una calidad de agua excelente según rangos establecidos por la OMS.

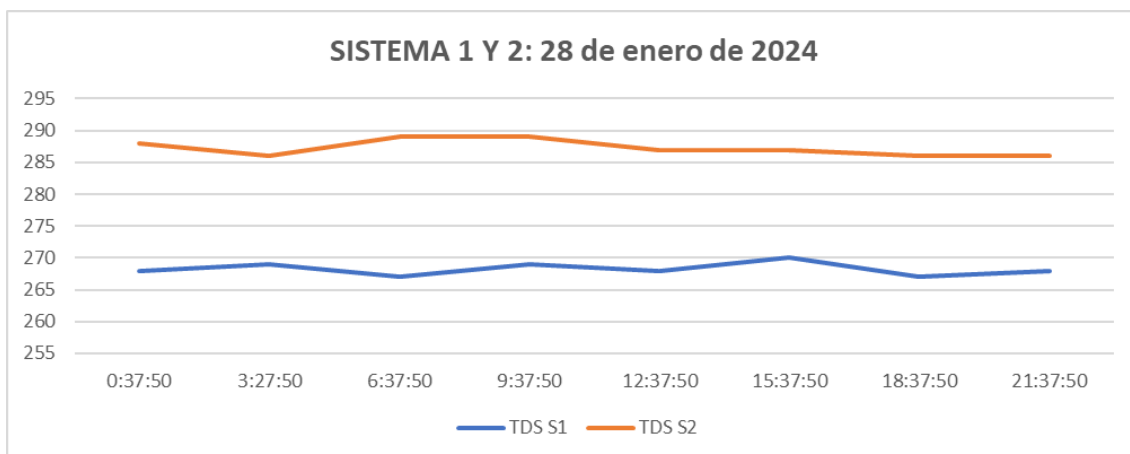


Ilustración 4-68: Gráfica resultados de TDS para ambos sistemas 28/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los resultados de pH se muestran en la Ilustración 4-69, dónde los valores de pH para el sistema 1 varían de 7,02 a 8,32 y para el sistema 2 varían de 6,96 a 8,05 los cuales están dentro de los rangos permitidos según la norma INEN 1108.

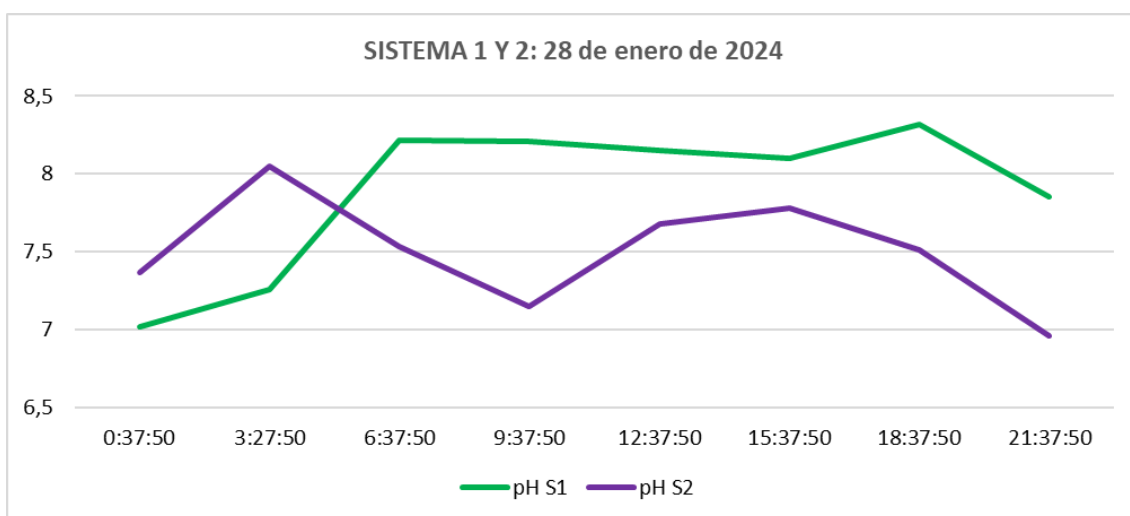


Ilustración 4-69: Gráfica resultados de pH para ambos sistemas 28/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

Los valores de turbidez se muestran en la Ilustración 4-70, en ambos casos los sistemas se mantienen en un valor de 0 NTU, ambos valores se encuentran dentro del rango permitido según la norma INEN 1108.

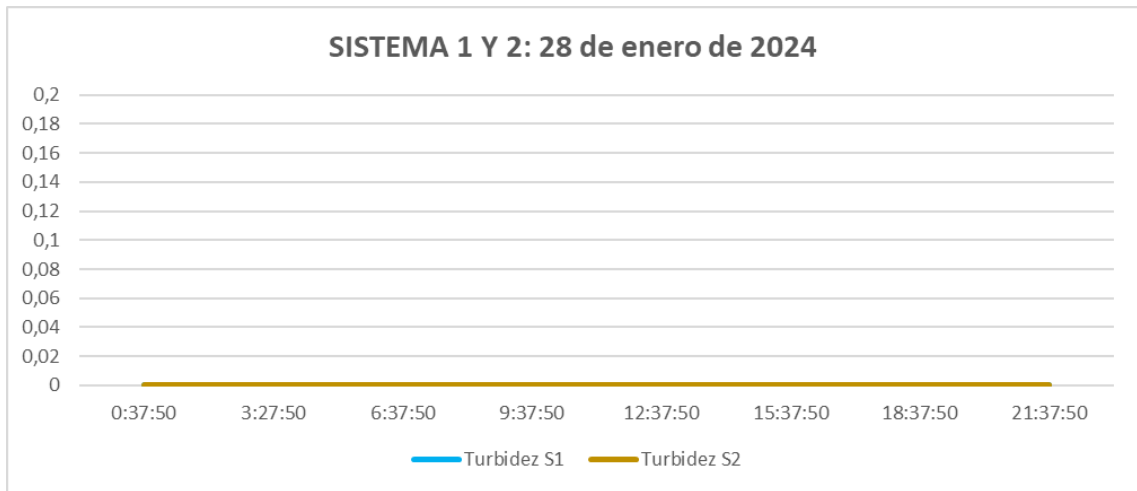


Ilustración 4-70: Gráfica resultados de turbidez para ambos sistemas 28/01/2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.7.1 Resultados promedio del sistema de monitoreo IoT (desde el 20 de enero al 28 de enero del 2024)

Se toma los resultados promedio de TDS, pH y turbidez de cada día de censado para comparar las variaciones durante los 8 días, los valores de resultados promedios se encuentran en la Tabla 4-8 para el sistema 1 (Guanando) y en la Tabla 4-9 para el sistema 2 (Huillis).

En la Ilustración 4-71 se muestran los resultados promedio diarios de TDS para ambos sistemas desde el día 20 al 28 de enero de 2024, tras realizar el análisis de los resultados se puede concluir que el agua que contiene el tanque de Huillis tiene valores de TDS más altos que los del tanque de Guanando esto se debe a que el tanque de Huillis se abastece directamente de la vertiente de agua la cual sigue un proceso natural por tanto participa en un proceso de erosión y sedimentación, a diferencia del tanque de Guanando que se somete a cloración por goteo regularmente.

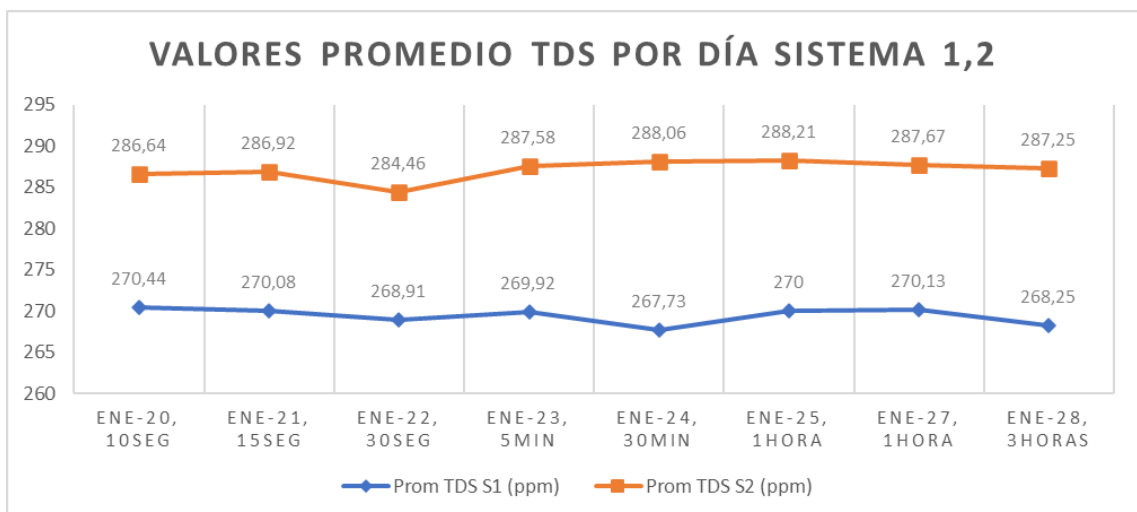


Ilustración 4-71: Resultados promedio de TDS por día, desde el 20 al 28 de enero 2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-72 se muestran los resultados promedio diarios de pH para ambos sistemas desde el día 20 al 28 de enero de 2024, tras realizar el análisis de los resultados se puede concluir que en promedio el tanque de Guanando contiene un nivel más alto de pH con relación al tanque de Huillis, esto a causa de que al tanque de Guanando se le dosifica regularmente cloro a goteo.

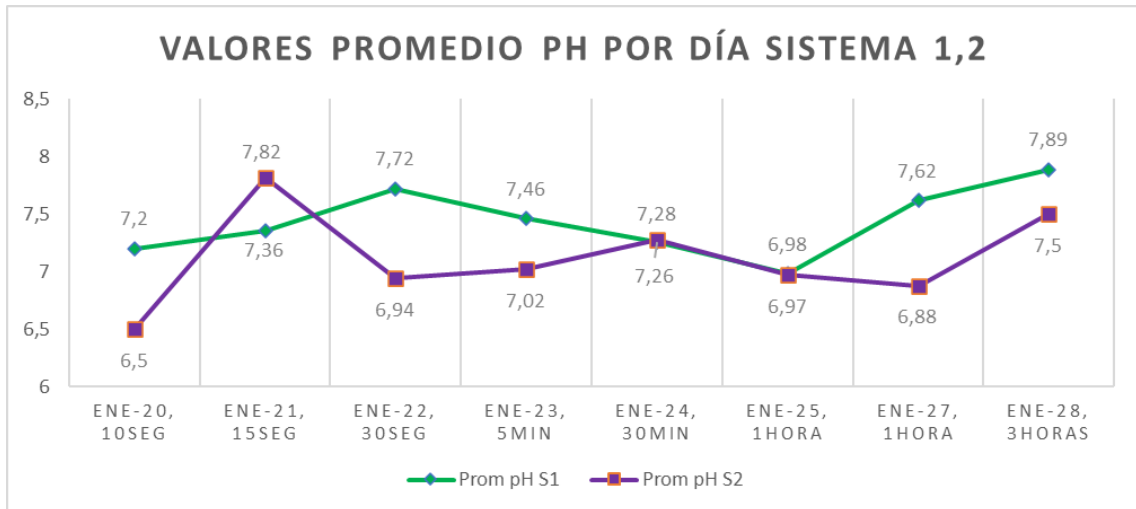


Ilustración 4-72: Resultados promedio de pH por día, desde el 20 al 28 de enero 2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Ilustración 4-73 se muestran los resultados promedio diarios de turbidez para ambos sistemas desde el día 20 al 28 de enero de 2024, tras realizar el análisis de los resultados se puede concluir que en promedio el tanque de Guanando contiene un nivel más alto de turbidez con relación al tanque de Huillis, esto a causa de que al tanque de Guanando se le dosifica regularmente cloro a goteo, además, entre el 21 y 22 de enero existió una avería en la tubería por tanto el agua contenía pequeñas cantidades de sedimentación.

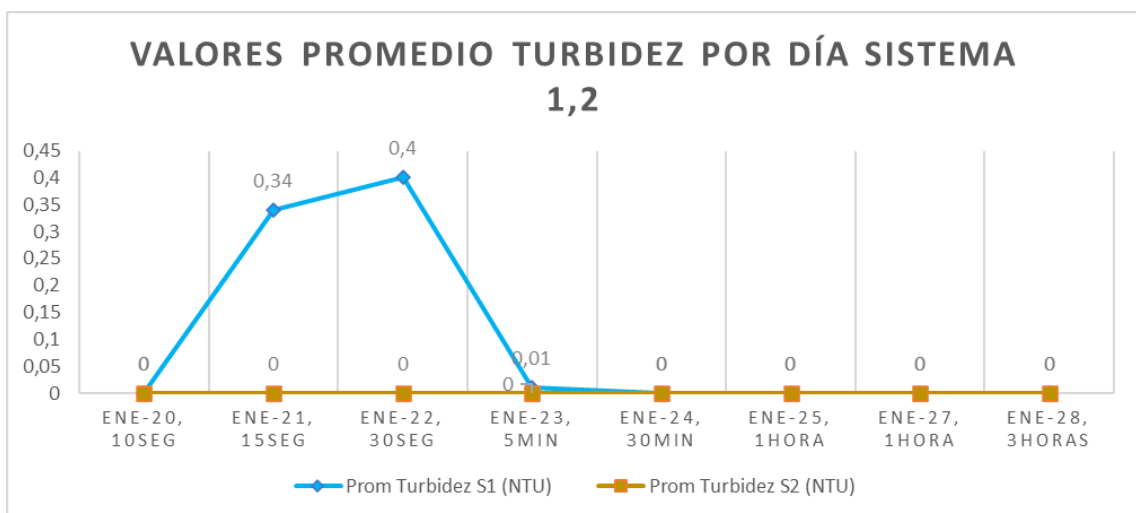


Ilustración 4-73: Resultados promedio de Turbidez por día, desde el 20 al 28 de enero 2024

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.7.2 Cálculo de la varianza de los resultados del sistema de monitoreo IoT (desde el 20 de enero al 28 de enero del 2024)

Se realiza el cálculo de la varianza para determinar la dispersión o cuánto se están alejando cada uno de los valores de las muestras con respecto a la media de la cantidad total de muestras tomadas, sabiendo que a valores más altos de varianza existirá una mayor dispersión de los datos. Para llevar a cabo el cálculo de la varianza y desviación típica se hace uso de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (4-4)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (4-5)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (4-6)$$

Dónde:

\bar{x} : media.

n : número total de muestras.

x_i : muestras.

N : Número de muestras en el conjunto de datos.

σ^2 : Varianza.

σ : Desviación típica.

En la Tabla 4-10 se realiza el análisis de la varianza y desviación típica del sistema 1 (Ganando) y sistema 2 (Huillis) para las muestras diarias de TDS durante 8 días.

Tabla 4-10: Análisis de la varianza y desviación típica diaria de ambos sistemas para TDS

Día	Cantidad de muestras	Media TDS (ppm) S1	Media TDS (ppm) S2	Varianza S1	Varianza S2	Desviación Típica S1	Desviación Típica S2
01/20	2784	270,44	286,64	5,97	0,88	2,44	0,95
01/21	5760	270,08	286,92	7,28	10,46	2,70	3,23
01/22	2880	268,91	284,46	21,63	46,73	4,65	6,84
01/23	288	269,92	287,58	12,13	6,53	3,48	2,56
01/24	48	267,73	288,06	29,36	0,06	5,42	0,24
01/25	24	270	288,21	7,08	0,16	2,66	0,41
01/27	24	270,13	287,67	1,61	3,22	1,27	1,80
01/28	8	268,25	287,25	0,94	1,44	0,97	1,20

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Tabla 4-11 se realiza el análisis de la varianza y desviación típica del sistema 1 (Ganando) y sistema 2 (Huillis) para las medias de las muestras diarias totales tomadas de TDS durante 8 días, donde se puede determinar que la dispersión de los datos es baja proporcionándole una buena confiabilidad de las lecturas del sistema para cualquier intervalo de tiempo que se elija para el muestreo.

Tabla 4-11: Análisis de la varianza y desviación típica total de ambos sistemas para TDS

Días	Cantidad total muestras	Media TDS (ppm) S1	Media TDS (ppm) S2	Varianza S1	Varianza S2	Desviación Típica S1	Desviación Típica S2
8	11816	269,43	287,10	0,88	1,24	0,94	1,11

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Tabla 4-12 se realiza el análisis de la varianza y desviación típica del sistema 1 (Ganando) y sistema 2 (Huillis) para las muestras diarias de pH durante 8 días.

Tabla 4-12: Análisis de la varianza y desviación típica diaria de ambos sistemas para pH

Día	Cantidad de muestras	Media pH S1	Media pH S2	Varianza S1	Varianza S2	Desviación Típica S1	Desviación Típica S2
01/20	2784	7,20	6,50	0,10	0,00	0,32	0,00
01/21	5760	7,36	7,82	0,20	0,02	0,45	0,13
01/22	2880	7,72	6,94	0,19	0,06	0,44	0,25
01/23	288	7,46	7,02	0,24	0,10	0,49	0,32
01/24	48	7,26	7,28	0,26	0,16	0,51	0,40
01/25	24	6,98	6,97	0,18	0,01	0,42	0,09
01/27	24	7,62	6,88	0,04	0,01	0,20	0,10
01/28	8	7,89	7,50	0,21	0,11	0,46	0,33

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Tabla 4-13 se realiza el análisis de la varianza y desviación típica del sistema 1 (Ganando) y sistema 2 (Huillis) para las medias de las muestras diarias totales tomadas de pH durante 8 días, donde se puede determinar que la dispersión de los datos es baja

proporcionándole una buena confiabilidad de las lecturas del sistema para cualquier intervalo de tiempo que se elija para el muestreo.

Tabla 4-13: Análisis de la varianza y desviación típica total de ambos sistemas para pH

Días	Cantidad total muestras	Media pH S1	Media pH S2	Varianza S1	Varianza S2	Desviación Típica S1	Desviación Típica S2
8	11816	7,44	7,11	0,08	0,15	0,28	0,38

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Tabla 4-14 se realiza el análisis de la varianza y desviación típica del sistema 1 (Ganando) y sistema 2 (Huillis) para las muestras diarias de turbidez durante 8 días.

Tabla 4-14: Análisis de la varianza y desviación típica diaria de ambos sistemas para Turbidez

Día	Cantidad de muestras	Media Turbidez (NTU) S1	Media Turbidez (NTU) S2	Varianza S1	Varianza S2	Desviación Típica S1	Desviación Típica S2
01/20	2784	0,00	0,00	0,03	0,07	0,00	0,00
01/21	5760	0,34	0,00	0,13	0,00	0,36	0,00
01/22	2880	0,40	0,00	0,17	0,00	0,42	0,00
01/23	288	0,01	0,00	0,01	0,00	0,09	0,00
01/24	48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
01/25	24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
01/27	24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
01/28	8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

En la Tabla 4-15 se realiza el análisis de la varianza y desviación típica del sistema 1 (Ganando) y sistema 2 (Huillis) para las medias de las muestras diarias totales tomadas de turbidez durante 8 días, dónde se puede determinar que la dispersión de los datos es baja proporcionándole una buena confiabilidad de las lecturas del sistema para cualquier intervalo de tiempo que se elija para el muestreo.

Tabla 4-15: Análisis de la varianza y desviación típica total de ambos sistemas para Turbidez

Días	Cantidad total muestras	Media turbidez (NTU) S1	Media turbidez (NTU) S2	Varianza S1	Varianza S2	Desviación Típica S1	Desviación Típica S2
8	11816	0,09	0,00	0,03	0,00	0,16	0,00

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

4.8 Análisis económico del sistema

El análisis económico se lo muestra en la Tabla 4-16, dónde se detallan los elementos que se utilizaron para la construcción de los nodos maestro y esclavo para ambos sistemas, así como para la elaboración del flotador contenedor de los sensores para el monitoreo de las características físicas del agua de consumo humano en los tanques de Huillis y Guanando acorde a las necesidades, dando un costo general de \$ 1242,10

Tabla 4-16: Detalle económico para construcción de prototipo para el sistema de monitoreo

USO	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT	CANT	TOTAL
SENSORES	pH	\$50,00	2	\$100,00
	Turbidez	\$46,00	2	\$92,00
	TDS	\$35,00	2	\$70,00
	Temperatura	\$9,00	2	\$18,00
	Ultrasonido	\$4,00	2	\$8,00
	ACS712	\$4,00	2	\$8,00
Módulos	Arduino Nano	\$12,00	2	\$24,00
	ESP32 38 Pines	\$12,00	2	\$24,00
	LoRa RYLR993	\$60,00	2	\$120,00
	LoRa RYLR998	\$40,00	2	\$80,00
	Regulador MP1584	\$3,00	4	\$12,00
	ADC ADS1115 16bits	\$10,00	2	\$20,00
Placas	Master	\$30,00	2	\$60,00
	Nodo	\$30,00	2	\$60,00
Alimentación de Energía	AC/DC 12V 2A	\$8,00	3	\$24,00
	Conectores Jack DC	\$1,20	4	\$4,80
	Switch 2 tiempos	\$0,60	4	\$2,40
Pantalla	Oled i12C 128x64	\$9,00	2	\$18,00
	LCD 16x2 I2C	\$7,00	2	\$14,00
Conexiones	Conector XLR GX16	\$4,00	10	\$40,00
	Cable blindado 4 hilos	\$0,80	30	\$24,00
	Cable 4 hilos	\$1,20	3	\$3,60

Prototipo	Caja NAP IP65	\$35,00	2	\$70,00
	Caja IP65 10*15	\$5,00	2	\$10,00
	Acrílico	\$10,00	1	\$10,00
	Caja hermética 18*14	\$6,00	2	\$12,00
	Flotadores	\$1,20	8	\$9,60
	Codos 90°	\$0,60	5	\$3,00
	Neplo 5cm	\$0,60	2	\$1,20
	Tapón Hembra	\$0,50	2	\$1,00
	Conector PVC tuerca 1/2"	\$0,45	4	\$1,80
	Empaque Anillo caucho	\$0,40	4	\$1,60
	Pegamento Epóxico	\$6,00	1	\$6,00
	Tubo (Guía)	\$4,00	1	\$4,00
	Buje de Nylon IP69	\$0,60	5	\$3,00
	Enchufe	\$0,70	3	\$2,10
	Cerraduras	\$2,50	2	\$5,00
Sistema energía solar	Panel Solar 50W	\$65,00	1	\$65,00
	Controlador de carga	\$20,00	1	\$20,00
	Batería 12V 9Ah	\$32,00	1	\$32,00
	Cable	\$2,00	2	\$4,00
	Caja Batería 15*14	\$4,00	1	\$4,00
	Soporte para panel	\$20,00	1	
Procesamiento	CPU Core i3 4GB RAM	\$150,00	1	\$150,00
TOTAL				\$1.262,10

Realizado por: Jara Sánchez, I., 2023

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo V después de haber realizado las pruebas y análisis correspondientes al funcionamiento del prototipo IoT para monitorear las características físicas del agua de consumo humano en los tanques de Huillis y Guanando, se procede a detallar las conclusiones y recomendaciones.

5.1 Conclusiones

- Analizadas las condiciones de cada uno de los tanques, tanto de captación (Huillis) como el de distribución (Guanando) se pudo determinar que las características físicas adecuadas para el sistema IoT de monitoreo del agua son las de total de sólidos disueltos (TDS), potencial hidrógeno (pH) y turbidez en base a la norma Ecuatoriana INEN 1108 que presenta los requisitos para la calidad de agua para consumo humano.
- La selección de la tecnología de comunicación LPWAN es fundamental para una correcta comunicación del sistema, tras el análisis realizado se pudo determinar que la tecnología que presta las mejores características y condiciones para establecer la comunicación tanto para el sistema de Guanando como la de Huillis es la de LoRa, además realizadas las pruebas se concluye que el módulo LoRa RYLR998 tiene un menor alcance o cobertura que el módulo LoRa RYLR993, por tanto, el módulo RYLR998 es usado para el sistema de Guanando que requiere una menor distancia de cobertura y el módulo RYLR993 es usado en el sistema de Huillis que requiere una mayor distancia de cobertura con condiciones accidentadas del terreno.
- El protocolo de comunicación MQTT tiene una alta fiabilidad para el envío de mensajes gracias a los tres niveles de calidad de servicio que ofrece, además de portar con seguridad a través del cifrado de mensajes mediante TLS y comunicación de manera bidireccional siendo muy útil para el desarrollo del sistema.
- El diseño del prototipo IoT debe cumplir con al menos una protección IP65, lo cual implica que tenga una total protección contra el polvo y protección ante chorros de agua, esto a razón de que los nodos esclavos estarán expuestos a la intemperie permanentemente y para la protección del circuito electrónico debe estar protegido ante el sol, polvo y lluvia, además, el sistema flotante que contiene los sensores de igual manera debe estar sellado herméticamente por que va a estar constantemente en el agua y cualquier entrada mínima de agua se expone

a dañar los circuitos de los sensores generando daños en el sistema y por ende pérdidas económicas.

- La calibración de los sensores desenvuelve un papel fundamental dentro del sistema, debido a que si estos no están bien calibrados las lecturas de los datos serán incorrectas y por tanto la fiabilidad del sistema es baja. Para una correcta calibración del sensor de TDS se basa en la curva característica del mismo fabricante, para el de pH se centra la lectura del sensor a 2,5 V y posteriormente se calibra con solventes ya conocidos de pH con valores de 4,0 7,0 y 10,01 y finalmente para el sensor de turbidez nos basamos en la librería provista por el mismo fabricante sumado a esto la calibración se relacionará directamente con las tomas de medida del sensor de temperatura.
- La evaluación de la comunicación para ambos sistemas IoT ya implementados en Guanando y Huillis nos da como resultado para el sistema de Guanando una latencia promedio de 714 ms desde el nodo esclavo hasta el servidor de Node-RED, una cobertura teórica con una potencia de señal de llegada -93 dBm y una cobertura real medida de aproximadamente -85 dBm, una tasa de transmisión mínima de 526,61 bps y máxima de 571,43 bps y un consumo de energía promedio de 228 mAh. Para el sistema de Huillis se tiene como resultado una latencia promedio de 934 ms desde el nodo esclavo hasta el servidor de Node-RED, una cobertura teórica con una potencia de señal de llegada -145 dBm y una cobertura real medida de aproximadamente -112 dBm, una tasa de transmisión mínima de 402,57 bps y máxima de 436,83 bps y un consumo de energía promedio de 269 mAh. Finalmente se tiene la latencia de la generación de túnel en Ngrok para abrir la dashboard haciendo uso de un enlace de dominio público, se tiene el mejor resultado para un navegador de Mozilla con una latencia de 5515 ms. Evidentemente la latencia para el sistema de Huillis será mayor debido a que el enlace se encuentra a una mayor distancia (2,7 km) que la de Guanando (0,291 km) así como el consumo de energía será mayor y la potencia de señal de llegada, tasa de transmisión serán menores. Cabe mencionar que la potencia de señal de llegada de ambos sistemas está dentro de los márgenes establecidos por la misma tecnología LoRa específicamente para los modelos de módulos con los que se está trabajando.
- La linealidad de los resultados promedios diarios obtenidos de los valores tanto de TDS, pH y turbidez indican que el diseño del sistema para tomar muestras en los diferentes tiempos establecidos es fiable, además en el análisis de varianza se obtuvo una varianza para el sistema de Guanando en TDS de 0,88, pH de 0,08 y turbidez 0,03 y para el sistema de Huillis una varianza en TDS de 1,24, pH de 0,15 y turbidez 0,00 lo cual indica que existe una baja dispersión de los datos aportándole una alta fiabilidad al sistema en las lecturas tomadas para cualquier intervalo de tiempo para la toma de muestras.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar una adecuada calibración de los sensores realizando diferentes tipos de pruebas con líquidos conocidos para su evaluación.
- Tener de acoplar el sistema flotante con una protección IP68 con la finalidad de no correr riesgos ante posibles infiltraciones de agua dentro de las placas de los sensores, o en su efecto considerar fundir estas placas con resina epóxica, así no se correría ningún riesgo y los sensores podrían ser ubicados en el agua directamente sin ningún sistema flotante, pero se debe tomar en cuenta también la calidad de los cables para que no se corroan fácilmente con el agua.
- Diseñar una especie de capuchón para la sonda de pH, debido a que si no se hace esto al tener movimiento del agua las medidas de pH empezaran a variar drásticamente de un valor a otro.
- Antes de ubicar los sensores al tanque primero sacar una muestra de agua y medirla, para luego corroborar si existe algún tipo de variación, esto con el fin de adaptar bien el sistema al medio en el que va a estar ubicado, ya que se debe tomar en cuenta que el sensor de pH no actúa igual en agua que este reposo a un agua que está en movimiento.

BIBLIOGRAFÍA

ABAMOBILE. *¿Qué es la tecnología Wifi? Características y cómo funciona?*. [En línea]. 2023. [Consulta: 13 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://abamobile.com/web/tecnologia-wifi-que-es-y-caracteristicas/>

Alcora. *Agua apta para consumo humano*. [blog]. 2023. [Consulta: 3 de Julio de 2023]. Disponible en: <https://alcora.es/blog/agua-apta-consumo-humano/>

AME-INEC-ARCA-BDE. *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. 2021*. Ecuador : GESARA, 2021.

AQUAe. *¿Qué son las aguas subterráneas?*. [En línea]. 4 de Febrero de 2022. [Consulta: 14 de Junio de 2023]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/calidad-agua/#:~:text=La%20calidad%20del%20agua%20es,cantidad%20de%20bacterias%20que%20tiene>.

AWS. *¿Qué son los mensajes de publicación y suscripción?*. [En línea]. 2023. [Consulta: 11 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://aws.amazon.com/es/what-is/pub-sub-messaging/#:~:text=El%20modelo%20de%20publicaci%C3%B3n%20y,establecer%20comunicaci%C3%B3n%20entre%20servicios%20desacoplados>.

BASSI, Agustín. *Introducción a MQTT*. [En línea]. 2021. [Consulta: 15 de Noviembre de 2023]. Disponible en: https://www.gotoiot.com/pages/articles/mqtt_intro/index.html.

BASSI, Agustín. *Introducción al protocolo AMQP*. [En línea]. 2021. [Consulta: 15 de Noviembre de 2023]. Disponible en: https://www.gotoiot.com/pages/articles/amqp_intro/index.html.

BASSI, Agustín. *Introducción al protocolo CoAP*. [blog]. 2021. [Consulta: 15 de Noviembre de 2023]. Disponible en: https://www.gotoiot.com/pages/articles/coap_intro/index.html.

CAMARENA GAMARRA, Pedro Andre. *Desarrollo de una red LoRaWAN® para IoT*. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Superior). Universitat Politècnica de Catalunya, ETSEIB. Barcelona-España. 2022. pp. 18-22. [Consulta: 13 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/372214/tfg-pedro-andre-camarena-gamarra.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Carbotecnia. *Significado de los sólidos disueltos totales en agua (TDS).* [En línea]. 2021. [Consulta: 23 de Julio de 2023]. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/solidos-disueltos-totales-tds/>.

CÁRDENAS, Cristian G., y otros. *IoTMonitor-WQ: A Remote Water-Quality Monitoring IoT Platform.* 1, Popayán : Revista Ciencia en Desarrollo, 2023, Vol. 14.

CLOUDFLARE. *¿Qué es el Protocolo de Internet?.* [En línea]. 2023. [Consulta: 14 de Noviembre de 2023]. Disponible en: [https://www.cloudflare.com/es-es/learning/network-layer/internet-protocol/#:~:text=El%20Protocolo%20de%20Internet%20\(IP\)%20es%20un%20protocolo%20%20o,y%20llegar%20al%20destino%20correcto..](https://www.cloudflare.com/es-es/learning/network-layer/internet-protocol/#:~:text=El%20Protocolo%20de%20Internet%20(IP)%20es%20un%20protocolo%20%20o,y%20llegar%20al%20destino%20correcto..)

DE LA CÁMARA, Rubén Adrián. *Diseño de un sistema de monitorización remota de un depósito de agua mediante LoRa.* [En línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad Oberta de Catalunya, Barcelona, España. 12 de Junio de 2019. [Consulta: 18 de Junio de 2023]. Disponible en: <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/97127/8/radriandTFM0619memoria.pdf>.

DE LUZ, Sergio. *¿Qué protocolo es mejor?: TCP vs UDP, descubre cuándo usar cada uno.* RedesZone. [blog]. 2023. [Consulta: 14 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.redeszone.net/tutoriales/internet/tcp-udp-caracteristicas-uso-diferencias/>.

Dset ENERGY. *Tecnología Sigfox: Internet de las cosas.* [En línea]. 2023. [Consulta: 25 de Julio de 2023]. Disponible en: <http://productos-iot.com/sigfox-3/>.

ESNOZ, Ignacio. *Internet de las Cosas de largo alcance (LoRa).* Teldat. [blog]. 14 de Noviembre de 2017. [Consulta: 4 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.teldat.com/es/blog/internet-de-las-cosas-de-largo-alcance-lora/>.

Falthoni, H., y otros. *A Monitoring System of Water Quality Tunghai Lake Using LoRaWAN.* 2020.

Fan del Agua. *Tipos de fuentes naturales de agua.* [En línea]. 27 de Noviembre de 2018. [Consulta: 18 de Julio de 2023]. Disponible en: <https://fandelagua.com/fuentes-naturales-de-agua/>.

FREDA, Anthony. *¿Qué diferencia hay entre IPv4 e IPv6?.* [En línea]. 2021. [Consulta: 15 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.avg.com/es/signal/ipv4-vs->

INDUANALISIS . *Agua subterráneas y superficial*. [En línea]. 17 de Mayo de 2019. [Consulta: 14 de Junio de 2023]. Disponible en: https://www.induanalisis.com/publicacion/detalle/agua_subterranas_y_superficial_29.

IONOS. *¿Cómo funciona el modelo cliente-servidor?*. [En línea]. 31 de Enero de 2023. [Consulta: 10 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/modelo-cliente-servidor/>.

IONOS. *¿Qué es WebSocket?*. [En línea]. 2020. [Consulta: 17 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.ionos.es/digitalguide/paginas-web/desarrollo-web/que-es-websocket/>.

IONOS. *UDP: ¿qué es el protocolo UDP?*. [En línea]. 2020. [Consulta: 14 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/udp-user-datagram-protocol/>.

JUNIPER. *Guía del usuario de interfaces para dispositivos de seguridad*. [En línea]. 2023. [Consulta: 14 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.juniper.net/documentation/mx/es/software/junos/interfaces-security-devices/topics/topic-map/security-interface-ipv4-ipv6-protocol.html>.

Keyestudio. *KS0429 medidor TDS keyestudio V1.0*. [En línea]. 2021. [Consulta: 15 de Diciembre de 2023]. Disponible en: https://wiki.keyestudio.com/KS0429_keyestudio_TDS_Meter_V1.0.

KUAN, Fiona. *Tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance frente a tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance*. [En línea]. 2022. [Consulta: 1 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.mokosmart.com/es/short-range-wireless-communication-technology-vs-long-range-wireless-communication-technology/#:~:text=cosa%20m%C3%A1s%20f%C3%A1cilmente,-,Tecnolog%C3%ADa%20de%20comunicaci%C3%B3n%20inal%C3%A1brica%20de%20largo%20alcance,serv>.

LPWAN.es. *Noticias, tutoriales, proveedores, ... ¡Todo sobre las redes LPWAN!*. [En línea]. 2023. [Consulta: 4 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://lpwan.es/#:~:text=Las%20redes%20Low%20Power%20Wide,de%20recargar%20o%20cambiar%20pilas..>

Martos Reyes, Christian. *Sistema portátil para la monitorización de la calidad del agua*. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Superior). Universidad de Málaga, Málaga - España. Junio de 2021. [Consulta: 14 de Junio de 2023]. Disponible en:

Sigfox. *¿Qué es Sigfox?*. [En línea]. TEISA Integracion Global, 25 de Julio de 2021. [Consulta: 15 de Octubre de 2023]. Disponible en: <https://sigfox.com.py/que-es-sigfox/>.

T- Systems. *Estas son las capas del Internet de las Cosas.* [blog]. 2018. [Consulta: 25 de Julio de 2023]. Disponible en: <https://www.t-systemsblog.es/estas-son-las-capas-del-internet-de-las-cosas/>.

Universitat Oberta de Catalunya. *¿Qué es NB-IoT?* [blog] 22 de Noviembre de 2018. [Consulta: 7 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://blogs.uoc.edu/informatica/que-es-nb-iot/>

VALENCIA, Fabian. *Programación Visual con Node-Red: Conectando Internet de Cosas con Facilidad.* [En línea]. 2016. [Consulta: 18 de Diciembre de 18]. Disponible en: <https://miescapedigital.com/programacion-visual-con-node/#gsc.tab=0>

ZÁRATE, J. *Comunicaciones celulares.* [En línea]. Barcelona-España: Universitat Oberta de Catalunya, 2017. [Consulta: 10 de Noviembre de 2023]. Disponible en: https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/15/PLA4_Comunicaciones%20celulares.pdf

ZOOstock. *El protocolo LORAWAN.* [En línea]. 2023. [Consulta: 13 de Noviembre de 2023]. Disponible en: <https://www.zoostock.com/redes-y-sistemas/el-protocolo-lorawan>.



ANEXOS

ANEXO A: DATASHEET LORA RYLR998

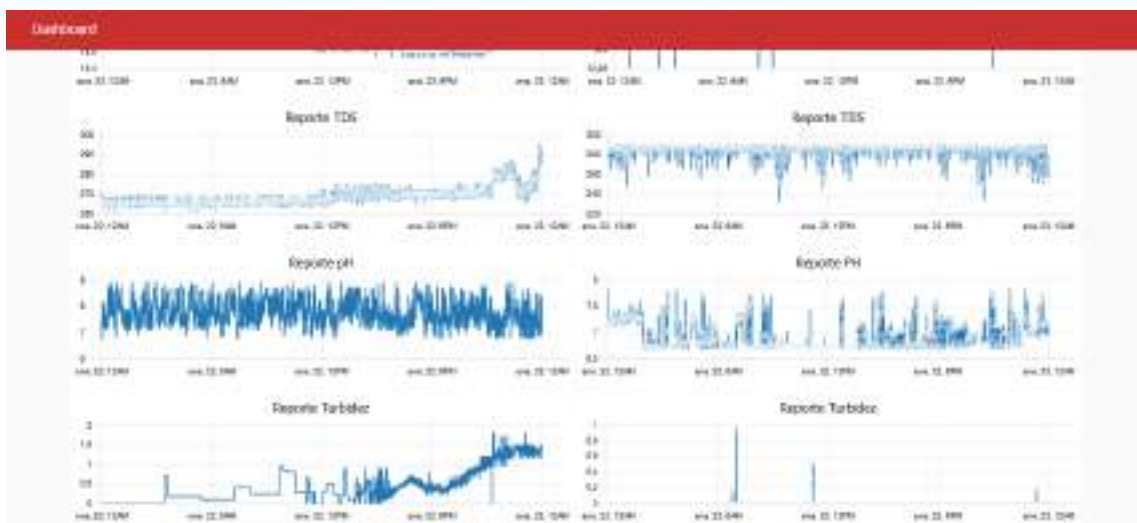
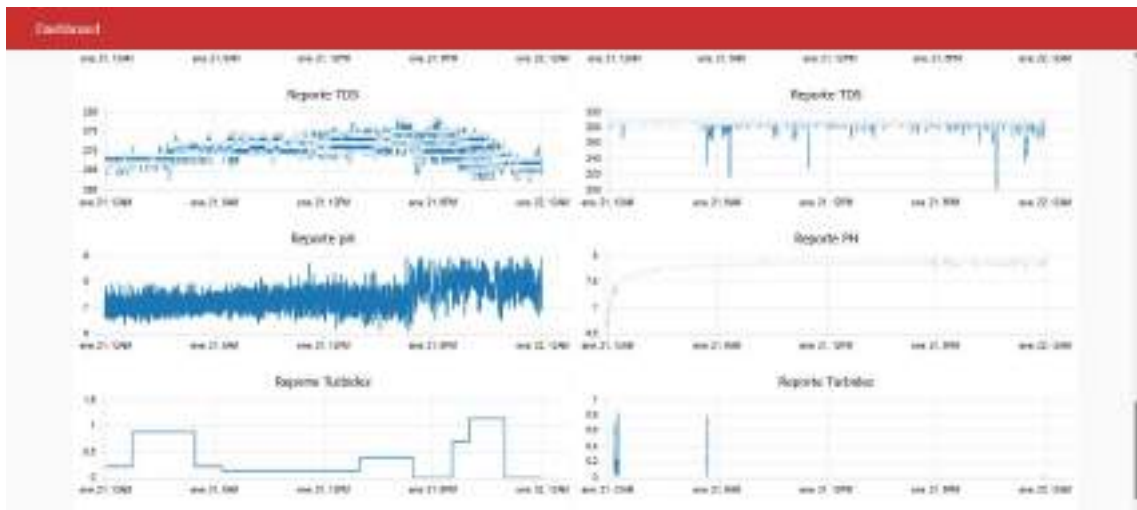
SPECIFICATION

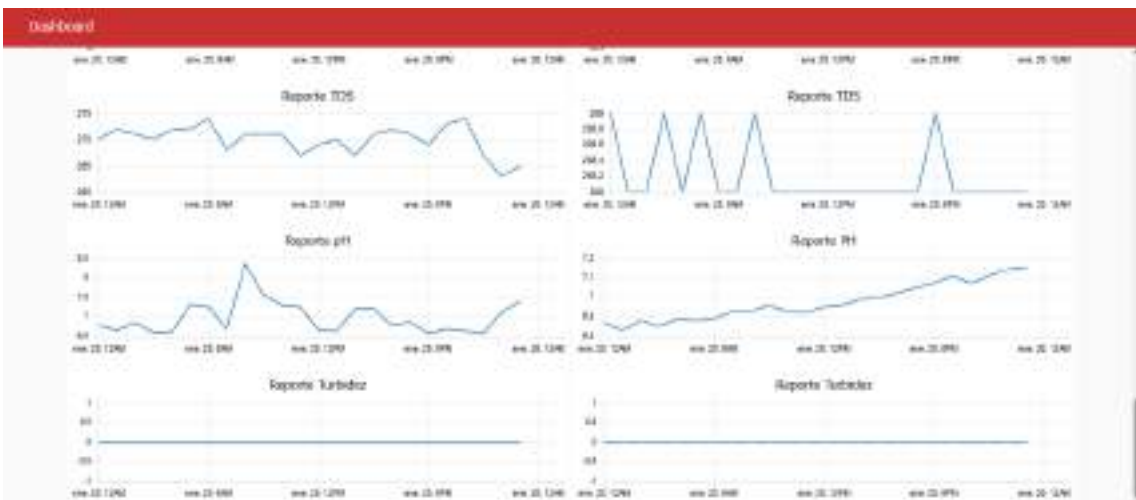
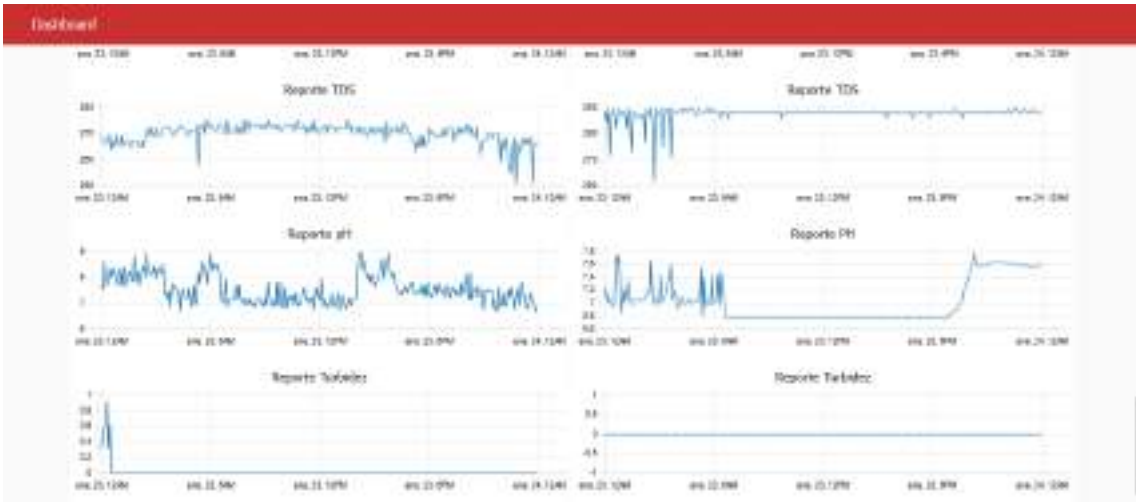
Item	Min.	Typical	Max.	Unit	Condition
VDD Power supply	2.3	3.3	3.6	V	VDD
RF Output power range	0		22	dBm	RF Output Power must be set to less than AT+CRFOP=14 to comply with CE certification.
Filter insertion loss	1	2	3	dB	
RF Sensitivity	-129			dBm	
RF Input level			10	dBm	
Frequency range	820	868/915	960	MHz	
Frequency accuracy		±10		ppm	
Transmit Mode current		140		mA	RFOP = +22dBm
Receive Mode current		17.5		mA	@VDD=+3.3V
Sleep mode current		10		uA	AT+MODE=1 @VDD=+3.3V
Smart receiving power saving mode average current	0.02	2.7	5.5	mA	2.7mA @AT+MODE=2,3000,3000 If you need lower current consumption, you can adjust the AT+MODE=2 parameter.
Baud rate	300	115200	115200	bps	8, N, 1
Digital Input Level High	0.7*VDD		VDD	V	VIH
Digital Input Level Low	0		0.3*VDD	V	VIL
Digital Output Level High	0.9		VDD	V	VOH
Digital Output Level Low			0.1	V	VOL
Cycling (erase / write) Flash data memory		200		K	Cycles
Weight		1.83		g	
Operating temperature	-40	25	+85	°C	

SPECIFICATION

Item	Min.	Typical	Max.	Unit	Condition
VDD Power Supply	1.8	3.3	3.6	V	
VBAT Power Supply	1.55	3.3	3.6	V	
Frequency Accuracy		±5		ppm	at 25°C ±3°C
RF Output Power Range	-4	20	22	dBm	
RF Harmonic			-36	dBm	
RF sensitivity	-148			dBm	
RF Input Level			10	dBm	
Filter insertion loss	1	2	3	dB	
Frequency Range	820	868/915	960	MHz	
Transmit Current		140		mA	RFOP = +22 dBm
Class A Current		5		uA	
Class B & C Current		5		mA	
Baud rate		9600		bps	8, N, 1
Temperature sensor Accuracy		2		°C	
Digital input level high	0.8		VDD	V	VIH
Digital input level low			0.2	V	VIL
Digital output level high	0.9			V	VOH I _{max} = 1 mA
Digital output level low			0.1	V	VOL I _{max} = -1 mA
Operating Temperature	-40	25	+85	°C	
Dimensions					13mm*13mm*2.2mm
Weight		0.71		g	

ANEXO C: REPORTES EN DASHBOARD




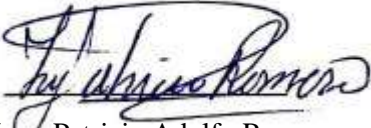






ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 28/ 03 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Israel José Jara Sánchez
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Informática y electrónica
Carrera: Telecomunicaciones
Título a optar: Ingeniero en Telecomunicaciones
 Ing. Alberto Arellano Aucancela Director del Trabajo de Titulación
 Ing. Patricio Adolfo Romero Asesor del Trabajo de Titulación

