



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR, PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

“ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LORA PARA
COMUNICACIÓN SUBACUÁTICA QUE PERMITA EL MONITOREO DE
VARIABLES AMBIENTALES EN LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA”

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

Línea de investigación: Desarrollo, aplicación de software y cibersecurity (seguridad cibernética)

AUTOR:

Diego Arbey Montezuma Rosero

DIRECTOR:

MSc. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez

Ibarra – Ecuador

2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1759334525		
APELLIDOS Y NOMBRES:	MONTEZUMA ROSERO DIEGO ARBEY		
DIRECCIÓN:	Olivo Alto – Casa 200		
EMAIL:	damontezumar@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	No registra	TELF. MOVIL	0999463259

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis de la implementación de la tecnología Lora para comunicación subacuática que permita el monitoreo de variables ambientales en la laguna de Yahuarcocha.
AUTOR (ES):	Diego Arbey Montezuma Rosero
FECHA: AAAAMMDD	2025/07/09
SOLO PARA TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Telecomunicaciones.
DIRECTOR:	MSc. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez
ASESOR:	MSc. Jaime Roberto Michilena Calderón

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Diego Arbey Montezuma Rosero, con cédula de identidad Nro. 1759334525, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 09 días del mes de julio de 2025

EL AUTOR:



Diego Arbey Montezuma Rosero

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 09 días del mes de julio de 2025

EL AUTOR:



.....

Diego Arbey Montezuma Rosero

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 09 de julio de 2025

MSc. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



ING. FABIÁN GEOVANNY CUZME RODRÍGUEZ, MSC

C.C.: 1311527012

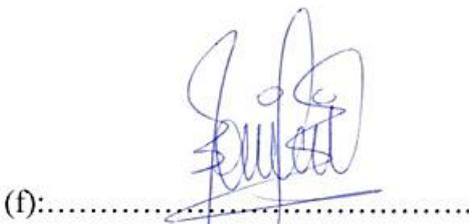
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LORA PARA COMUNICACIÓN SUBACUÁTICA QUE PERMITA EL MONITOREO DE VARIABLES AMBIENTALES EN LA LAGUNA DE YAHUARCOCHA.” elaborado por DIEGO ARBEY MONTEZUMA ROSERO, previo a la obtención del título del INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



(f).....

ING. FABIÁN GEOVANNY CUZME RODRÍGUEZ, MSC
C.C: 131152701-2



(f).....

ING. JAIME ROBERTO MICHILENA CALDERÓN, MSC
C.C: 100219843-8

DEDICATORIA

Hace algunos unos años inicie está loca aventura llamada Ingeniería, un recorrido que trajo consigo grandes personas, grandes historias, a veces desesperación, lagrimas, pero siempre acompañado de la felicidad de recorrer el camino que me trajo hasta aquí. Sin embargo no habría podido llegar hasta este punto sin las personas que estuvieron a mi lado dándome el soporte para seguir avanzando, por eso dedico este trabajo a todos.

A Dios, porque a pesar de los altibajos, sé que siempre he recibido su bendición y siempre estará presente en mi vida.

A mis padres, Cecilia Rosero y Franco Montezuma, porque sin su apoyo nunca habría llegado hasta este punto, siempre fueron mi motor para seguir y siempre serán mi ejemplo y mi orgullo, los amo.

A mi hermana Marisol, por siempre estar en las buenas y en las malas, por su apoyo y por ser la mejor hermana, nunca dudes del cariño que te tengo.

A Gisel, porque ha sabido entregarme un cariño incondicional y se ha ganado un espacio especial en mi corazón.

A mis amigos, Mateo, Bryan, Israel y Jonathan, por ser unas excelentes personas y por acompañarme en este recorrido, nunca cambien y espero que su amistad perdure siempre; A mi amiga Gabriela Caragulla con quien iniciamos desde nivelación y siempre estuvo presente brindándome una amistad sincera.

A quienes conocí en este recorrido, Erick Guacán, Sebastián Chamorro, Wendy Luna, Víctor Echeverría, Alan Sandoval, Fernando Guerra, Andrés Cuenca, Pablo Muños, Ronny Quelal, Ramiro Ajala, José Bustillos, Antony Panamá, Steven Fuertes, German Nupan, Bryan Beltrán, Jhon Yépez, Jorge Yacelga, Evelyn Quishpe, Xavier Arroyo, Dennis Morales y a todos con quienes compartí en algún momento.

A todos ustedes, con cariño y agradecimiento, dedico este trabajo que culmina hoy con una etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Al culminar este trabajo de grado expreso mi más sincero agradecimiento a todos quienes ayudaron a que este momento sea posible, siempre estaré infinitamente agradecido por su apoyo.

A Dios, porque es la guía en cada paso que recorro y quien me ha dado la sabiduría para poder afrontar todos los retos que se me presentan.

A mis padres, Cecilia Rosero y Franco Montezuma, gracias por todo su apoyo, gracias por nunca dejarme solo, no hay palabras suficientes en este mundo para expresar la gratitud que les tengo, su ejemplo y sus enseñanzas siempre prevalecerán.

A mi hermana, Marisol, gracias por confiar, por ser mi confidente y por estar en las buenas y en las malas.

A Gisel, gracias por apoyarme en este último recorrido, siempre atenta, siempre preocupada y siempre brindando tu ayuda.

A mis amigos, gracias por ser pacientes, por brindarme su sincera amistad, por haber estado siempre a mi lado, por ayudarme a levantar en los tropiezos y por ser los mejores amigos que podría pedir.

Agradezco de forma especial al Ing. Fabián Cuzme, ya que por su tiempo, dedicación y su constante asesoría fue posible culminar este trabajo. También agradecerle por impulsar a que presente mi trabajo en diferentes conferencias.

Al Ing. Jaime Michilena por sus valiosas observaciones que ayudaron a enriquecer el desarrollo del trabajo y a Fernando Guerra por facilitar el uso de la antena Ubiquiti.

A todos los que siempre me extendieron la mano, Infinitas gracias.

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular nace de la necesidad de implementar sistemas de monitoreo ambiental eficientes para cuerpos de agua dulce como el caso de la laguna de Yahuarcocha, la cual enfrenta una problemática de alta contaminación, centrándose en el uso de tecnologías de bajo consumo y abordando las limitaciones de transmisión de datos en medios subacuáticos; el objetivo general fue diseñar e implementar un sistema de comunicación inalámbrica basado en la tecnología LoRa para la transmisión de datos desde un entorno subacuático hacia la superficie, con el fin de monitorear parámetros ambientales y al mismo tiempo evaluar la viabilidad de la tecnología LoRa en estos ambientes; la metodología consistió en un enfoque experimental, el cual incluye la caracterización del medio acuático, el desarrollo de un prototipo con sensores de pH y Turbidez de agua (Nodo Sensor) en conjunto con un nodo recepción de datos y posterior envío hacia la nube (Boya de Comunicaciones), la implementación de una red LoRa a 915MHz, y la generación de las pruebas correspondientes en diferentes distancias de separación entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones tanto en un ambiente controlado, como en un ambiente real; Los resultados más relevantes demostraron que es posible establecer una comunicación efectiva hasta 10m de distancia de separación entre nodos, logrando una tasa de recepción de datos superior al 80% y que es posible aumentar la distancia de transmisión si se establece una red de sensores que se separen a distancia inferiores a 11m, esto tomando en cuenta que el Nodo Sensor es el que se encuentra sumergido a x profundidad, mientras que la Boya de Comunicaciones se encuentra suspendida en la superficie del agua.

Palabras clave: Tecnología LoRa, comunicación subacuática, monitoreo ambiental, transmisión de datos, telemetría.

ABSTRACT

The present curricular integration project arises from the need to implement efficient environmental monitoring systems for freshwater bodies, such as the Yahuarcocha lagoon, which faces severe pollution problems. The study focuses on the use of low-power technologies and addresses the limitations of data transmission in underwater environments. The general objective was to design and implement a wireless communication system based on LoRa technology for transmitting data from an underwater environment to the surface, in order to monitor environmental parameters while evaluating the feasibility of using LoRa technology in such environments. The methodology followed an experimental approach, including the characterization of the aquatic environment, the development of a prototype equipped with pH and turbidity sensors (Sensor Node) alongside a receiving node responsible for sending data to the cloud (Communication Buoy), the implementation of a LoRa network operating at 915 MHz, and the execution of tests at different distances between the Sensor Node and the Communication Buoy in both controlled and real environments. The most relevant results showed that it is possible to establish effective communication up to 10 meters of separation between nodes, achieving a data reception rate higher than 80%, and that it is feasible to increase the transmission distance by deploying a sensor network with spacing below 11 meters, considering that the Sensor Node is submerged at a certain depth, while the Communication Buoy is floating on the water surface.

Keywords: LoRa technology, underwater communication, environmental monitoring, data transmission, telemetry.

LISTA DE SIGLAS

ABS. Acrilonitrilo Butadieno Estireno.

ARCOTEL. Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones.

API. Interfaz de Programación de Aplicaciones.

CSS. Espectro Ensanchado por Pulsos Chrip.

DELAY. Tiempo de retardo.

dB. Decibelio.

dBm. Decibelio referenciado a un milivatio.

ESP32. Microcontrolador de Espressif

FHSS. Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia.

FSK. Modulación por Desplazamiento de Frecuencia.

GFSK. Modulación FSK con Filtro Gaussiano.

HTML. Lenguaje de Marcado de Hipertexto.

IDE. Entorno de Desarrollo Integrado.

IP65. Protección contra polvo y chorros de agua.

IOT. Internet de las Cosas.

ISM. Industrial, Científico y Médico.

NTP. Protocolo de Tiempo de Red.

LAN. Red de Área Local.

LED. Diodo Emisor de Luz.

LORA. Largo Alcance.

LORAWAN. Red de Área de Largo Alcance.

LPWAN. Red de Área Amplia de Bajo Consumo.

OLED. Diodo Orgánico Emisor de Luz.

PAN. Red de Área Personal.

PCB. Placa de Circuito Impreso.

P2P. Punto a Punto.

RSNR. Relación Señal/Ruido recibida.

RSSI. Potencia de señal recibida.

RTC. Reloj de Tiempo Real.

SF. Factor de expansión de la señal.

TCP. Protocolo de Control de Transmisión.

UDP. Protocolo de Datagrama de Usuario.

UL/DL. Subida / Bajada de Datos.

UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

US915. Banda de Frecuencia LoRa de EEUU (915MHz).

WAN. Red de Área Amplia.

WIFI. Fidelidad Inalámbrica.

WMAN. Red Metropolitana Inalámbrica.

WWAN. Red Inalámbrica de Área Amplia.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	13
ÍNDICE DE TABLAS.....	18
ÍNDICE DE FIGURAS	19
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	25
CAPITULO I ANTECEDENTES	27
1.1 Problema de investigación.....	27
1.2 Objetivos.....	29
1.2.1 Objetivo General.....	29
1.2.2 Objetivos Específicos.	29
1.3 Alcance.....	30
1.4 Justificación.....	32
CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	35
2.1 Comunicaciones subacuáticas.	35
2.1.1 Mecanismos de comunicación en entornos subacuáticos.	36
2.1.1.1 Comunicaciones acústicas.....	37
2.1.1.2 Comunicaciones ópticas.....	41
2.1.1.3 Comunicaciones electromagnéticas.....	44
2.2 Comunicaciones inalámbricas.....	47

2.2.1	Comunicaciones LPWAN.....	49
2.3	Tecnología LoRa/LoraWAN	51
2.3.1	Arquitectura de una Red LoRa.	52
2.4	Monitoreo ambiental.	54
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....		56
3.1	Metodología.....	56
3.2	Situación actual.	58
3.2.1	Laguna de Yahuarcocha.....	58
3.3	FASE 1: Análisis de los requerimientos.....	60
3.3.1	Nomenclatura de requerimientos.	61
3.3.2	Stakeholders.....	61
3.3.3	Requerimientos Operacionales.	62
3.3.4	Requerimientos del sistema.	63
3.3.5	Requerimientos del Hardware y Software.	65
3.4	Elección de Hardware y Software.	66
3.4.1	Elección de Hardware.....	67
3.4.1.1	Elección de placa LoRa.	67
3.4.1.2	Elección de sensor de PH.	72
3.4.1.3	Elección de sensor de turbidez.	74
3.4.2	Elección de Software.	75
3.5	FASE 2: Diseño del sistema.	76
3.5.1	Diagrama de bloques del sistema.....	76

3.5.1.1	Diagrama de Bloques de Nodo Sensor.....	78
3.5.1.2	Diagrama de Bloques de Boya de Comunicaciones y Base de Datos.	81
3.5.2	Diagramas de flujo y de secuencia.	85
3.5.2.1	Diagrama de Flujo de Nodo Sensor.....	85
3.5.2.2	Diagrama de Flujo de Boya de Comunicaciones.....	88
3.5.2.3	Diagrama de Secuencia del Sistema.....	93
3.5.3	Arquitectura.	97
3.5.3.1	Arquitectura del Nodo Sensor.	97
3.5.3.2	Arquitectura de Boya de Comunicaciones.	99
3.5.3.3	Arquitectura del sistema.	100
3.5.4	Parámetros de comunicación.	101
3.5.4.1	Frecuencia.....	102
3.5.4.2	Potencia.	105
3.5.4.3	Ancho de banda.	105
3.5.4.4	Spreading Factor.....	106
3.5.4.5	Coding Rate.....	108
3.5.4.6	Preamble Length.....	110
3.5.4.7	Rx Timeout y Buffer Size.....	111
3.5.4.8	Modulación LoRa.....	112
3.5.4.9	Formato de paquete LoRa.....	114
3.5.5	Librerías.	117
3.5.6	Diseño de conexión de circuito.....	121
3.5.6.1	Alimentación.	121
3.5.6.2	Esquema de conexiones de Nodo Sensor.	123
3.5.6.3	Esquema de conexiones de Boya de Comunicaciones.	127

3.5.7	Diseño de PCB.....	128
3.5.7.1	Diseño de PCB para Nodo Sensor.....	128
3.5.7.2	Diseño de PCB para Boya de Comunicaciones.....	130
3.5.8	Diseño de modulo hermético para Nodo Sensor en 3D.....	132
3.6	FASE 3: Implementación.....	140
3.6.1	Programación del sistema.....	141
3.6.1.1	Código de programación para Nodo Sensor.....	141
3.6.1.2	Código de programación para Boya de Comunicaciones.....	146
3.6.2	PCB Nodo Sensor.....	154
3.6.3	PCB para Boya de Comunicaciones.....	156
3.6.4	Nodo Sensor.....	157
3.6.5	Boya de Comunicaciones.....	163
3.6.6	Firebase e Interfaz de Usuario.....	166
3.7	FASE 4: Simulación.....	170
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		179
4.1	Resultados de simulación.....	179
4.2	Pruebas de funcionamiento y comunicación del sistema.....	182
4.3	Pruebas de envío de datos hacia Firebase y visualización.....	188
4.4	Parámetros de medición.....	192
4.5	Ambiente de pruebas en piscina.....	194
4.5.1	Preparación de escenario.....	194
4.5.2	Resultados de pruebas en piscina con configuración SF12.....	198

4.5.3	Resultados de pruebas en piscina con configuración SF11.	204
4.5.4	Resultados de pruebas en piscina con configuración SF9.	207
4.5.5	Resultados de pruebas en piscina con configuración SF7.	210
4.5.6	Comparación de resultados de pruebas en piscina.	213
4.6	Ambiente de pruebas laguna de Yahuarcocha.	215
4.6.1	Preparación de escenario.	215
4.6.2	Resultados de pruebas en la Laguna de Yahuarcocha – SF7.	218
4.6.3	Resultados de pruebas en la Laguna de Yahuarcocha – SF12.	222
4.6.4	Comparación de resultados de pruebas en la Laguna de Yahuarcocha.	227
4.7	Ambiente de pruebas laguna de San Pablo.	230
4.7.1	Preparación de escenario.	230
4.7.2	Resultados de pruebas en la Laguna de San Pablo– SF12.	231
4.8	Resultados Generales.	236
4.9	Trabajos futuros.	241
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		242
Conclusiones.		242
Recomendaciones		244
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		245
ANEXOS		259

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistencia acústica específica de un fluido.	38
Tabla 2. Datos técnicos LoRa.	52
Tabla 3. Características de la Laguna de Yahuarcocha.	58
Tabla 4. Abreviaturas de los requerimientos.	61
Tabla 5. Abreviaturas de los requerimientos.	61
Tabla 6. Prioridad de requerimientos.	62
Tabla 7. Requerimientos Operacionales y de Usuario.	62
Tabla 8. Requerimientos Operacionales y de Usuario.	63
Tabla 9. Requerimientos de Hardware y Software.	65
Tabla 10. Comparativa de requerimientos de placa LoRa.	67
Tabla 11. Comparación entre RYLR896, RYLR998 Y LoRa32v3.	68
Tabla 12. Ventajas y desventajas de módulos REYLR 998, 896 y Wifi LoRa 32 V3. ...	68
Tabla 13. Datos técnicos de placa Heltec Wifi LoRa 32 V3 / HTITWB32LA V3.	70
Tabla 14. Chip LoRa SX1262.	71
Tabla 15. Comparativa de requerimientos de sensor de PH.	72
Tabla 16. Comparación entre PH-4502 y SEN0169.	73
Tabla 17. Comparativa de requerimientos de sensor de turbidez.	74
Tabla 18. Sensor de turbidez de agua KS0414 y CUS52D.	74
Tabla 19. Comparativa de requerimientos de software de desarrollo.	75
Tabla 20. Factores de comunicación según el Ancho de Banda.	106
Tabla 21. Sensibilidad por valor SF.	107
Tabla 22. Tasa de bit y Tasa de símbolo.	110
Tabla 23. Consumo de energía de dispositivos.	122

Tabla 24. Datos obtenidos de pruebas en piscina.	214
Tabla 25. Datos obtenidos de pruebas en Yahuarcocha.....	229
Tabla 26. Datos obtenidos de pruebas en la Laguna de San Pablo.	235
Tabla 27. Comparación de datos SF12 - 0.8m obtenidos en los 3 escenarios.	239
Tabla 28. Datos de distancia según la profundidad - Laguna de San Pablo.	240
Tabla 29. Datos de distancia según la profundidad – regresión exponencial.....	241

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura genérica de la propuesta. _____	32
Figura 2. Ingeniería subacuática. _____	36
Figura 3. Ondas acústicas. _____	38
Figura 4. Dispersión de luz en medio acuático. _____	42
Figura 5. Absorción de luz en el agua. _____	43
Figura 6. Comunicación mediante frecuencias extremadamente bajas. _____	47
Figura 7. Clasificación de redes inalámbricas según su cobertura. _____	49
Figura 8. Comparación de LPWAN con otras tecnologías. _____	51
Figura 9. Arquitectura LoRaWAN. _____	53
Figura 10. Modelo referencia OSI para LoRaWAN. _____	54
Figura 11. Tablero Kanban _____	57
Figura 12. Laguna de Yahuarcocha. _____	59
Figura 13. Equipos de ultrasonido _____	60
Figura 14. Wifi LoRa 32 V3. _____	70
Figura 15. Wifi LoRa 32 V3 – Asignación de pines. _____	72

Figura 16. <i>Kit sensor pH-4502.</i>	73
Figura 17. <i>Sensor de turbidez de agua KS0414.</i>	75
Figura 18. <i>Diagrama de bloques del sistema.</i>	77
Figura 19. <i>Diagrama de bloques de Nodo Sensor.</i>	79
Figura 20. <i>Diagrama de Bloques de Boya de Comunicaciones y Bas de Datos.</i>	82
Figura 21. <i>Diagrama de flujo de código para Nodo Sensor.</i>	87
Figura 22. <i>Diagrama de flujo de código para Boya de Comunicaciones – Diagrama A.</i>	89
Figura 23. <i>Diagrama de flujo de la Boya de Comunicaciones – Diagrama B.</i>	91
Figura 24. <i>Diagrama de flujo de la Boya de Comunicaciones – Diagrama C.</i>	93
Figura 25. <i>Diagrama de secuencia del sistema.</i>	96
Figura 26. <i>Arquitectura de Nodo Sensor.</i>	98
Figura 27. <i>Arquitectura de boya de comunicación.</i>	100
Figura 28. <i>Arquitectura del sistema.</i>	101
Figura 29. <i>Bandas de frecuencia – Espectro Radioeléctrico.</i>	103
Figura 30. <i>Pulsos de Chrips.</i>	114
Figura 31. <i>Formato de paquete LoRa.</i>	114
Figura 32. <i>Tamaño de paquete LoRa.</i>	117
Figura 33. <i>Esquema de conexión de Nodo Sensor.</i>	125
Figura 34. <i>Esquema de conexión de dispositivos de Nodo Sensor.</i>	126
Figura 35. <i>Esquema de conexión de dispositivos de Boya de Comunicaciones.</i>	127
Figura 36. <i>Diagrama de conexiones para diseño de PCB de Nodo Sensor.</i>	128
Figura 37. <i>Modelado 3D de PCB para Nodo Sensor.</i>	129
Figura 38. <i>Hoja de impresión PCB para Nodo Sensor.</i>	130

Figura 39. Diagrama de conexiones para diseño de PCB de Boya de Comunicaciones.	130
_____	130
Figura 40. Modelo 3D de PCB para Boya de Comunicaciones.	131
Figura 41. Modelo 3D de PCB para Boya de Comunicaciones.	131
Figura 42. Modelado en 3D de Nodo Sensor.	133
Figura 43. Cubierta superior de Nodo Sensor.	135
Figura 44. Cubierta inferior de Nodo Sensor.	137
Figura 45. Cubierta de sensor de turbidez.	138
Figura 46. Sujetador de sonda PH.	138
Figura 47. Base de sujeción para PCB.	139
Figura 48. Cubierta de antena y LED.	140
Figura 49. Ejemplos de librería Heltec ESP32 Dev-Boards.	141
Figura 50. Placa impresa de Nodo Sensor.	154
Figura 51. PCB de Nodo Sensor.	155
Figura 52. Placa para Nodo Sensor montada.	155
Figura 53. Placa impresa de Boya de Comunicaciones.	156
Figura 54. Placa de Boya de Comunicaciones montada.	157
Figura 55. Cubierta superior e inferior de Nodo Sensor.	157
Figura 56. Cubierta de antena para Nodo Sensor.	158
Figura 57. Cubierta de LED para Nodo Sensor.	158
Figura 58. Tapas de cobertura para orificios de sensores.	159
Figura 59. Cubierta para sensor de Turbidez.	159
Figura 60. Sujetador para sonda pH.	160
Figura 61. Sensores instalados en cubierta inferior.	160

Figura 62. Elementos de cubierta superior.	161
Figura 63. Elementos y conexión interna de Nodo Sensor.	162
Figura 64. Nodo Sensor.	163
Figura 65. Cubierta de circuito y antena de Boya de Comunicaciones.	164
Figura 66. Interior de cubierta de Boya de Comunicaciones.	164
Figura 67. Material flotante de Boya de Comunicaciones.	165
Figura 68. Boya de Comunicaciones.	166
Figura 69. Estructura JSON general en Firebase.	167
Figura 70. Estructura JSON de Historial de datos en Firebase.	167
Figura 71. Estructura JSON de Historial por timestamp en Firebase.	168
Figura 72. Estructura JSON de parámetros individuales en Firebase.	169
Figura 73. Interfaz de Usuario – Pagina Web.	169
Figura 74. Tabla de potencia recibida por distancia específica.	180
Figura 75. Grafica de Propagación de señal 915 MHz.	181
Figura 76. Grafica de SNR en función de la distancia.	182
Figura 77. Encendido de placas para pruebas de transmisión.	183
Figura 78. Inicio de sistema de Boya de Comunicaciones.	184
Figura 79. Petición de sincronización de hora.	184
Figura 80. Confirmación de confirmación de hora.	185
Figura 81. Petición de actividad desde Nodo Sensor.	185
Figura 82. Envío de confirmación de actividad desde Boya de Comunicaciones.	186
Figura 83. Recepción de confirmación de actividad en Nodo Sensor.	186
Figura 84. Envío de datos desde Nodo Sensor.	187
Figura 85. Recepción de datos en Boya de Comunicaciones y envío a Firebase.	187

Figura 86. <i>Modo de verificación de actividad.</i>	188
Figura 87. <i>Actualización de datos en Firebase.</i>	189
Figura 88. <i>Variables ambientales – Interfaz de usuario.</i>	190
Figura 89. <i>Grafica de pH – Interfaz de usuario.</i>	190
Figura 90. <i>Parámetros de conexión – Interfaz de usuario.</i>	191
Figura 91. <i>Grafica de RSSI – Interfaz de usuario.</i>	192
Figura 92. <i>Esquema de medidas de distancia.</i>	193
Figura 93. <i>Piscina de pruebas.</i>	195
Figura 94. <i>Profundidad de antena de Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones.</i>	195
Figura 95. <i>Antena Ubiquiti Loco M2.</i>	196
Figura 96. <i>Ubicación de Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones</i>	197
Figura 97. <i>Separación de Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones.</i>	198
Figura 98. <i>Grafica de RSSI – piscina – SF12.</i>	199
Figura 99. <i>Grafica de RSSI por metro – piscina – SF12.</i>	200
Figura 99. <i>Grafica de RSNR – piscina – SF12.</i>	201
Figura 101. <i>Grafica de RSNR por metro – piscina – SF12.</i>	202
Figura 102. <i>Grafica perdida de paquetes - piscina – SF12.</i>	203
Figura 103. <i>Grafica de Delay – piscina -SF12.</i>	203
Figura 104. <i>Grafica de RSSI – piscina – SF11.</i>	204
Figura 105. <i>Grafica de RSNR – piscina – SF11.</i>	205
Figura 106. <i>Grafica perdida de paquetes - piscina – SF11.</i>	206
Figura 106. <i>Grafica de Delay – piscina -SF11.</i>	206
Figura 108. <i>Grafica de RSSI – piscina – SF9.</i>	207
Figura 109. <i>Grafica de RSNR – piscina – SF9.</i>	208

Figura 110. Grafica perdida de paquetes - piscina – SF9.	209
Figura 111. Grafica de Delay – piscina -SF9.	209
Figura 112. Grafica de RSSI – piscina – SF7.	210
Figura 113. Grafica de RSNR – piscina – SF7.	211
Figura 114. Grafica perdida de paquetes - piscina – SF7.	212
Figura 115. Grafica de Delay – piscina -SF7.	212
Figura 116. Grafica de RSSI por cada SF.	213
Figura 117. Grafica de RSNR por cada SF.	214
Figura 118. Antena Loco M2 apuntando hacia la laguna de Yahuarcocha.	216
Figura 119. Pruebas de cobertura Wifi en diferentes sectores de Yahuarcocha.	216
Figura 120. Inserción de Nodo Sensor en la Laguna de Yahuarcocha.	217
Figura 121. Inserción de Boya de Comunicaciones en la Laguna de Yahuarcocha.	218
Figura 122. Grafica de RSSI – Yahuarcocha – SF7.	219
Figura 123. Grafica de RSNR – Yahuarcocha – SF7.	220
Figura 124. Grafica de perdida de paquetes – Yahuarcocha – SF7.	221
Figura 125. Grafica de Delay – Yahuarcocha – SF7.	221
Figura 126. Grafica de RSSI – Yahuarcocha – SF12.	223
Figura 127. Grafica de RSNR – Yahuarcocha – SF12.	224
Figura 128. Grafica de perdida de paquetes – Yahuarcocha – SF12.	226
Figura 129. Grafica de delay – Yahuarcocha – SF12.	227
Figura 130. Grafica comparativa de RSSI para SF12 & SF7 – Yahuarcocha.	228
Figura 131. Grafica comparativa de RSNR para SF12 & SF7 – Yahuarcocha.	229
Figura 132. Instalación de Nodo Sensor en Laguna de San Pablo.	230
Figura 133. Instalación de Boya de Comunicaciones en la Laguna de San Pablo.	231

Figura 134. Grafica de RSSI – SF12 – Laguna de San Pablo. _____	232
Figura 135. Grafica de RSNR – SF12 – Laguna de San Pablo. _____	233
Figura 136. Grafica de perdida de paquetes – SF12 – Laguna de San Pablo. _____	234
Figura 137. Grafica de Delay - SF12 - Laguna de San Pablo. _____	235
Figura 138. Grafica comparativa de RSSI para SF12 – 3 Escenarios. _____	237
Figura 139. Grafica comparativa de RSNR para SF12 – 3 Escenarios. _____	238
Figura 139. Grafica de dispersión de la Tabla 28. _____	240

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1) Relación para la presión de una onda plana.	37
(2) Velocidad de disminución de energía de una onda.	39
(3) Perdida de transmisión subacuática.	39
(4) Fórmula de Throp.	39
(5) Velocidad de propagación con factores P, T y S.	41
(6) Energía dispersada por una partícula.	43
(7) Velocidad de propagación en agua dulce.	44
(8) Coeficiente de absorción de ondas electromagnéticas en un medio acuático.	45
(9) Velocidad de propagación en agua marina.	46
(10) Perdida por absorción en agua marina.	46
(11) Longitud de onda.	104
(12) Cantidad de chips por bit.	107
(13) Tasa de símbolo.	108
(14) Tasa de codificación de errores.	109
(15) Bitrate.	109

<i>(16) Longitud de preámbulo.....</i>	<i>111</i>
<i>(17) Tamaño de preámbulo.....</i>	<i>116</i>
<i>(18) Conversión de dBm A Watts.....</i>	<i>171</i>
<i>(19) Constante de atenuación para un medio con pérdidas.....</i>	<i>173</i>
<i>(20) Coeficiente de atenuación adaptada al agua.....</i>	<i>173</i>
<i>(21) Ecuación de perdida por absorción.....</i>	<i>174</i>
<i>(22) Ecuación de Friis.....</i>	<i>175</i>
<i>(23) Ecuación de ruido recibido.....</i>	<i>176</i>
<i>(24) Ecuación de ruido total del sistema.....</i>	<i>177</i>

CAPITULO I ANTECEDENTES

En el presente capítulo se expone el planteamiento del problema que constituye la base fundamental de este trabajo de grado. Además, se establecen de manera clara y precisa los objetivos que se persiguen con el desarrollo de este. Posteriormente, se delimita el alcance que abarcará el presente trabajo para finalmente establecer la justificación que fundamenta la implementación de este, brindando así una comprensión más profunda de la relevancia y necesidad de llevar a cabo este estudio.

1.1 Problema de investigación.

La laguna de Yahuarcocha, ubicada en Ibarra, provincia de Imbabura (Ecuador), según información de Imbabura Geoparque Mundial, Yahuarcocha fue declarada la tercera laguna sagrada del Ecuador por el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (Imbabura GM, 2008).

En los últimos años este cuerpo de agua se ha visto afectado por diferentes factores que han ido agrupándose para generar el deterioro del ecosistema, como lo señalaba un artículo de prensa realizado por el diario El Comercio en una entrevista a Cristina Valles quien fue Técnico de Calidad Ambiental de la Dirección Zonal 1 del Ministerio del Ambiente, “La coloración que se refleja en la cuenca está al límite de un estado hipereutrófico, es decir, un grave deterioro de la calidad del agua de la laguna” (El Comercio, 2020).

Así mismo con el pasar de los años se han ido visualizando diferentes reportes como el que realizó el medio de comunicación Ecuavisa, en el cual detalla que “La laguna de Yahuarcocha ha entrado en un deterioro ambiental acelerado, convirtiéndose en un foco de insalubridad” (Ecuavisa EC, 2022). Para estas fechas, en este mismo reporte Javier Jaramillo, quien es investigador Lacustre, informaba que “El problema más grande

es toda la materia vegetal que se acumula en el fondo de la laguna ocasionando mayor cantidad de metano” (Ecuavisa EC, 2022).

Algunas iniciativas, como las tomadas por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de San Miguel de Ibarra, han generado proyectos para la recuperación de la laguna de Yahuarcocha, como lo señala un artículo del GAD municipal, “Esto no es una solución de un día para otro, las soluciones son a mediano y corto plazo que necesita combinar acciones hacia el cuerpo de agua como son, monitoreo constante de sedimentos, nutrientes y la calidad del agua” (Aayala, 2021a).

Según señala el diario La Hora “El alcalde Álvaro Castillo baraja opciones para continuar con la recuperación de la laguna, entre las cuales está el dragado de ciertas zonas de mano con la reforestación y el tratamiento del agua que ingresa a esta” (La Hora, 2023b). También se han realizado diversos estudios y redacciones académicas de grado como la realizada por la Universidad Técnica del Norte titulada “Análisis espacio temporal de la calidad de agua del Lago Yahuarcocha utilizando métodos convencionales y sensores remotos”, en la cual se mide la concentración de clorofila “a” mediante aplicación de bandas del sensor remoto Dove Classic del satélite PlanetScope, así como la información multitemporal de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con información actual (Quimbiamba & Sánchez, 2023).

A causa de los factores mencionados y otros agregados, como el mal manejo de desechos residuales, aguas servidas vertidas en la laguna, se ha generado un grave problema de contaminación de esta, por lo que son necesarias medidas de control con el fin de contribuir a la recuperación de ecosistema que aquí se contiene.

La tecnología es un medio que puede ayudar en este tipo de situaciones. Por lo tanto, este trabajo se centra en el análisis de una implementación de la tecnología LoRa, la cual es un tipo de tecnología de largo alcance en tierra. En este caso, se plantea para

ser estudiada en la comunicación subacuática, generando resultados que permitan conocer la viabilidad de su uso en un ambiente no terrestre, con el objetivo de permitir el monitoreo de variables ambientales en la laguna a través del envío de datos recolectados en tiempo real a largas distancias. Esto permitiría analizar el comportamiento de estos factores.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo General.

Realizar el análisis de la viabilidad del uso de la tecnología LoRa, para la comunicación electromagnética en ambientes subacuáticos.

1.2.2 Objetivos Específicos.

1. Realizar una investigación sobre que mecanismos tecnológicos se han implementado para la medición de variables ambientales en la laguna de Yahuarcocha, así como las tecnologías aplicadas al medio subacuático en este ambiente.
2. Determinar las alternativas que se puedan plantear tanto de hardware como de software para la implementación del nodo, así como establecer un escenario básico de simulación para analizar ciertos comportamientos en la transmisión de datos en el ambiente subacuático (modulaciones, pérdida de paquetes, retardo o latencia y tasas de transferencia).
3. Realizar un nodo subacuático con la implementación de la tecnología LoRa, que permita el monitoreo de variables ambientales de la laguna de Yahuarcocha.
4. Realizar pruebas relacionadas con las métricas, latencia y retardo utilizando el nodo subacuático en la laguna de Yahuarcocha. Esto permitirá obtener resultados

sobre el funcionamiento de la tecnología LoRa en un entorno subacuático y determinar las diferencias con el entorno simulado.

1.3 Alcance.

En cuanto al alcance de esta propuesta, se delimita con el desarrollo de un nodo subacuático con el uso de tecnología LoRa que permita el análisis de variables ambientales de la laguna de Yahuarcocha, con el cual se pueda analizar esta tecnología en un ambiente no terrestre. Para lo anterior el trabajo se va a basar en la metodología Kanban (Lo que es de hacer, lo que está en curso, lo que se va a probar y lo que está completo).

En el análisis de la delimitación de este trabajo, se tendrán en cuenta aspectos como la recopilación de información sobre las tecnologías implementadas en la laguna de Yahuarcocha para el monitoreo de las variables ambientales, así como para mitigar los efectos adversos de la contaminación.

Como segundo aspecto, se espera llevar a cabo una investigación acerca de lo que se ha realizado con relación al tema de comunicaciones subacuáticas en el entorno de la laguna de Yahuarcocha. Esto se hará con el fin de generar un estado del arte que esté en concordancia con el tema planteado. Del mismo modo, se realizará una investigación sobre las comunicaciones subacuáticas en lo que respecta a la comunicación entre nodos. Una vez concluido este proceso, se implementará la propuesta del desarrollo del nodo subacuático con tecnología LoRa, que constará de 4 aspectos fundamentales, los cuales se enumeran a continuación.

1. El uso de un entorno de simulación que permita el análisis de ciertos comportamientos en la transmisión de datos en el ambiente subacuático (modulaciones, pérdida de paquetes, retardo o latencia y tasas de transferencia).

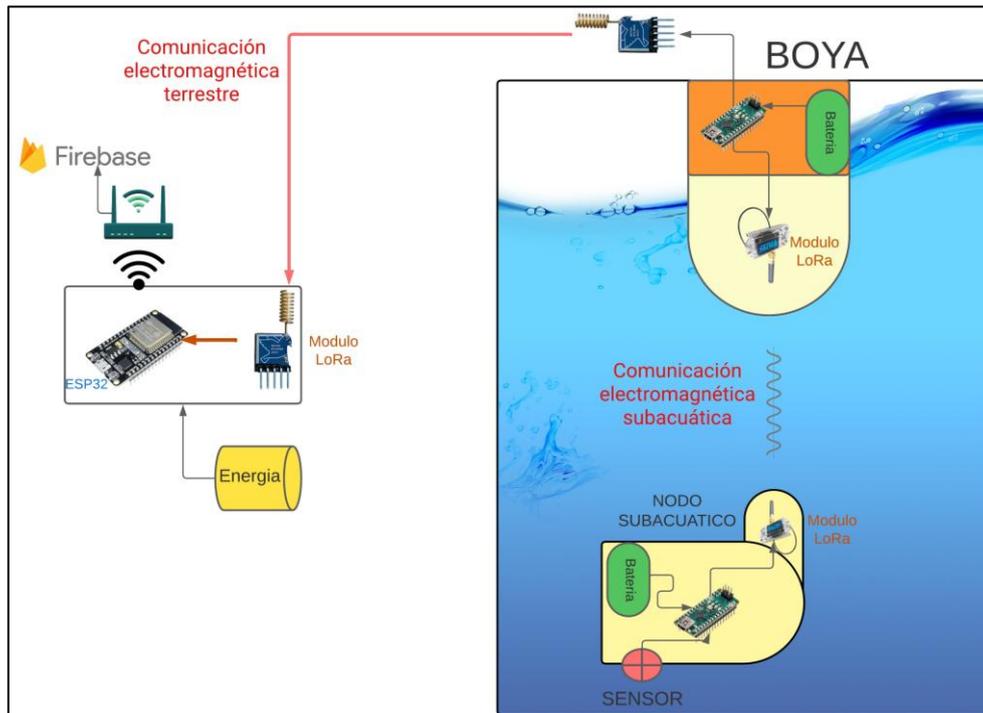
2. La implementación de una Boya flotante que pueda ser colocada en la laguna, la cual tendrá una placa de comunicación LoRa sumergida en el agua, que permitirá la recepción de datos desde el nodo que estará sumergido a una distancia que permita la comunicación.
3. La implementación del nodo subacuático que pueda ser sumergido en el agua, el cual permita recolectar datos de las variables ambientales de la laguna y enviar dichos datos por medio de comunicación electromagnética hacia la Boya.
4. Implementar un sistema de comunicación que permita el envío de datos desde la Boya hacia una ubicación fuera de la laguna que pueda recibir los datos enviados por esta mediante el uso de LoRa para la comunicación.

Estos cuatro puntos fundamentales son la base para la implementación del sistema propuesto. La Figura 1, que se encuentra al final de esta sección, se plantea para delimitar el resultado de la propuesta.

Por último, se llevará a cabo la recopilación de los datos obtenidos en tiempo real a través del sistema y se almacenarán en una base de datos. Esto permitirá visualizar los resultados de los datos recopilados. Nuestro objetivo es obtener un análisis del funcionamiento de la tecnología LoRa en un entorno subacuático y realizar una comparación con los datos obtenidos de la simulación correspondiente.

Figura 1.

Arquitectura genérica de la propuesta.



Nota: En la figura se puede observar los aspectos fundamentales en los que se centra el proyecto, Nodo subacuático, Boya y comunicación hacia la base de datos.

1.4 Justificación.

El 17 de abril de 2019 Imbabura fue declarado como “Geoparque Mundial en Ecuador” por la Organización de las Naciones Unidas Para la Educación, la Ciencia y la Cultura – UNESCO (GAD Imbabura, 2022). Dicha acreditación exige un trabajo articulado entre los diferentes actores que componen a esta sociedad, puesto que la Educación, el geoturismo y la conservación son los elementos a los que se debe el desarrollo en el territorio. La UNESCO cataloga a la provincia de Imbabura como “Un Geoparque Mundial, famoso por su gran número de Lagos y magníficas formaciones geológicas” (Imbabura Geoparque, 2018).

Los territorios denominados Geoparques mundiales de la UNESCO, son áreas que están delimitadas por paisajes y lugares de relevancia geológica, estos deben ser gestionados siguiendo los conceptos de protección, educación y desarrollo sostenible.

Aquí se da uso a los patrimonios geológicos, áreas naturales y los patrimonios culturales para hacer conciencia del uso de los recursos naturales de forma sostenible (GAD Imbabura, 2022). Por ende, el deterioro de la Laguna de Yahuarcocha en su grave crisis de contaminación va en contra de los principios que lograron dicha certificación, por ende, como lo establece la UNESCO, es labor en conjunto de quienes conforman la sociedad el trabajar por su preservación.

El ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador, en su Boletín N° 227 del 16 de junio del 2021, establece que “La Laguna Yahuarcocha pertenece a una de las 27 lagunas rodean a la provincia de Imbabura, tiene una superficie de 187,5 ha y una profundidad máxima de 5, 5 metros; siendo una de las más visitadas por turistas nacionales y extranjeros” (Ministerio del Ambiente, 2021). Aquí se establecen los lineamientos técnicos para la gestión de la laguna de Yahuarcocha, en el cual se prevé una solución a corto y largo plazo con indicadores medibles que mejoren de forma progresiva el estado de la Laguna. Como Autoridad Ambiental Nacional da el impulso para que la sociedad participe, se informe, cree conciencia y divulgue la importancia de la recuperación, protección y conservación de la Laguna de Yahuarcocha (Ministerio del Ambiente, 2021).

El numeral 27 del artículo 66 de la Constitución de la Republica del Ecuador, determina el derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza (Asamblea Nacional, 2017). Así mismo el artículo 10 de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, cataloga de dominio hídrico público a los ríos, lagos, lagunas, humedales, nevados, glaciares y caídas naturales (Asamblea Nacional, 2014).

En el marco del plan nacional de oportunidades 2021-2025, se establece en su objetivo número 11 “Conservar, restaurar, proteger y hacer un uso sostenible de los

recursos naturales”, en este ámbito se dicta la política 11.1 “Promover la protección y conservación de los ecosistemas y su biodiversidad; así como, el patrimonio natural y genético nacional” (Secretaría Nacional de Planificación, 2021).

La ONU, en su objetivo número 6 de “Agua limpia y saneamiento” de los objetivos de Desarrollo Sostenible, establece la meta de “Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos bosques, montañas, humedales, ríos, acuíferos y lagos” (Naciones Unidas, 2015).

De igual forma, el artículo 71 de la Constitución de la República del Ecuador reconoce los derechos de la naturaleza. Esta tiene derecho a que se le respete íntegramente su existencia y al mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos (Asamblea Nacional Constituyente, 2008).

Por último, el artículo 14 de la Constitución de la República del Ecuador reconoce que la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, así como la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados, son de interés público (Asamblea Nacional Constituyente, 2008).

De lo anterior, entendemos que la preservación de los ecosistemas es deber de todos los ciudadanos. Por ende, los ingenieros en telecomunicaciones tienen la responsabilidad de generar proyectos sostenibles que no vayan en contra del medio ambiente y, en caso necesario, crear proyectos que aporten a la preservación, recuperación o mantenimiento de estos. Este proyecto se justifica en base a estos elementos para ser implementado.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Este capítulo se enfoca en recopilar información teórica sobre los distintos ejes temáticos abordados en este trabajo de grado. Aquí se exponen los diversos mecanismos de comunicación subacuática pertinentes para la solución propuesta. En este contexto, se recopila información acerca de fórmulas, conceptos y teoría general relacionada con el comportamiento de las señales electromagnéticas, acústicas y ópticas en entornos acuáticos. Se presenta una referencia teórica general sobre los tipos de comunicaciones inalámbricas aplicables según su distancia de propagación. El objetivo es conocer qué tipo de tecnología se aplica en entornos IoT, que pueda ser estudiada en ambientes subacuáticos, como es el caso de LPWAN. Finalmente, se lleva a cabo un análisis de la tecnología seleccionada para el estudio de este trabajo de grado: LoRa/LoRaWAN, teniendo en cuenta información relevante como las distancias de propagación, el consumo de energía, las frecuencias de operación y la arquitectura que esta tecnología utiliza para el despliegue de redes de sensores.

2.1 Comunicaciones subacuáticas.

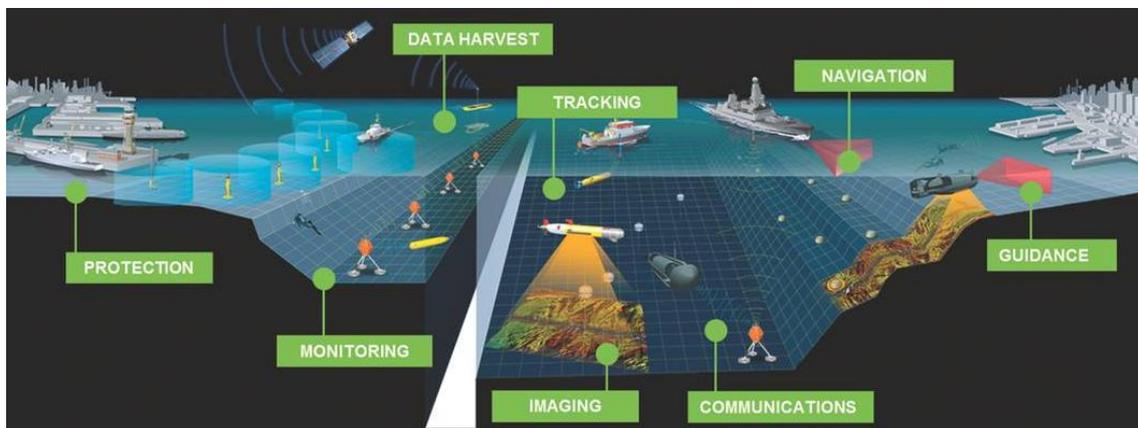
Adentrándose un poco en el concepto de "comunicación subacuática", este se refiere al método que posibilita la transferencia de datos en un medio acuático. Este medio puede aplicarse en áreas como océanos, mares, lagos o ríos, pero también abarca fuentes artificiales como piscinas o estanques. La aplicación de esta rama de las comunicaciones no solo permite el monitoreo de variables en estos ambientes, sino que también involucra la transmisión de datos desde o hacia vehículos, plataformas submarinas o actividades de buceo (Buñay, 2023).

Las señales que posibilitan este tipo de comunicaciones se propagan a través del medio acuático aprovechando las propiedades específicas que presenta el agua como

entorno de transmisión. Esto ha permitido la implementación de diversos aspectos derivados del concepto de comunicación subacuática (Otnes et al., 2012). Entre ellos, se encuentran secciones dedicadas a la transferencia de datos dirigidos a la navegación, el monitoreo de áreas protegidas como arrecifes, mapeo de la estructura geográfica del fondo marino y en la aplicación de comunicaciones o tomas de datos con fines militares (Buñay, 2023), tal como se ilustra en la Figura 2.

Figura 2.

Ingeniería subacuática.



Nota: En la figura, se pueden apreciar los distintos ámbitos de implementación de la transferencia de datos en entornos subacuáticos, como áreas de protección, monitoreo, mapeo de imágenes en el fondo marino, comunicaciones, recolección de datos, seguimiento, navegación y orientación. La imagen ha sido recuperada de (Mulligan, 2018).

2.1.1 Mecanismos de comunicación en entornos subacuáticos.

Si bien, las comunicaciones subacuáticas son uno de los aspectos que ha experimentado un desarrollo de alta importancia en los últimos años (Ruiz & Muñoz, 2022), estas presentan un desafío a la hora de lograr su implementación, ya que el entorno acuático conlleva varios aspectos que afectan la transmisión de datos. Para abordar este desafío, existen tres tipos de mecanismos o tecnologías que permiten la comunicación y transferencia de datos por este medio, los cuales se presentan a continuación.

2.1.1.1 Comunicaciones acústicas.

Uno de los métodos más empleados al implementar las comunicaciones subacuáticas es el uso de ondas acústicas. Este método se fundamenta porque el sonido se propaga más rápidamente en el agua que en un ambiente seco. Esto se debe a que el agua presenta factores de pérdida de energía menores en comparación con el aire (Sendra, 2011). En concreto, esta comunicación utiliza el movimiento de las moléculas en una sustancia elástica. El movimiento generado por una partícula, que puede ser originado por una fuente, se propaga hacia las partículas adyacentes, creando una onda en su trayecto. Este movimiento de partículas ocasiona cambios en la presión que pueden ser detectados por un receptor. En el caso de una onda plana, la presión (P) está relacionada con la densidad del fluido y su velocidad de propagación, representada por la ecuación 1 (Balanis, 2012).

$$P = \rho c u \quad (1)$$

Donde,

- ρ = Densidad de fluido.
- c = Velocidad de propagación de onda.
- u = Velocidad de partículas de fluido.

En este caso, el factor de proporcionalidad (ρc) se denomina la resistencia acústica específica de un fluido (Urick, 1983). Estos se representan tanto para el aire como para el agua marina en la Tabla 1.

Tabla 1.

Resistencia acústica específica de un fluido.

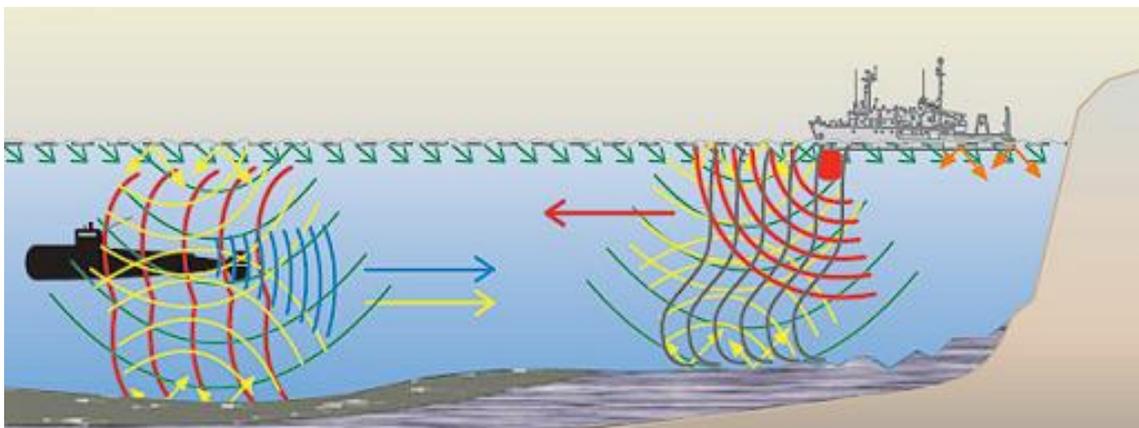
Agua de mar	Aire.
$\rho c = 1.5 \times 10^5 \text{ g}/(\text{cm}^2)(\text{s})$	$\rho c = 42 \text{ g}/(\text{cm}^2)(\text{s})$

Nota: En la tabla se presenta la comparación de los dos factores de resistencia acústica específica para un fluido. En el lado izquierdo se muestra para el agua marina, y en el lado derecho, para el aire. Esta información ha sido adaptada de (Urick, 1983).

La velocidad de propagación de una onda acústica en un medio subacuático ronda los 1500 m/s. Es decir, es casi 200 veces menor que la velocidad de una onda electromagnética en el aire (Buñay, 2023). Cabe destacar que el desplazamiento de estas ondas acústicas por este medio se caracteriza por ser multitrayecto, es decir, que las ondas se propagan en todos los sentidos desde su punto de origen. Esto se puede visualizar en la Figura 3.

Figura 3.

Ondas acústicas.



Nota: En la figura se puede observar un esquema de propagación de las ondas acústicas, el cual identifica la estructura multitrayecto de estas. La imagen ha sido recuperada de (Gelen, n.d.).

Como se observa la propagación tiende a ser esférica, es decir en todos los sentidos, por ende, conforme la onda avanza por el líquido esta va perdiendo el nivel del sonido, la velocidad con la que disminuye la energía de la onda se puede calcular mediante la ecuación 2 (Shanmuga et al., 2020).

$$SS = -10 \log \left(\frac{I_{SS}}{I} \right) \quad (2)$$

Donde,

- SS = Propagación esférica.
- I_{SS} = Intensidad de propagación en forma esférica.
- I = Intensidad de propagación inicial.

El resultado puede utilizarse para calcular la pérdida de transmisión subacuática a una distancia específica con una frecuencia dada, la cual se realiza mediante la ecuación 3 (Velasco, 2022).

$$T_l = SS + \alpha(f) \times d \times 10^{-3} \quad (3)$$

Donde,

- T_l = Pérdida de transmisión subacuática.
- $\alpha(f)$ = Coeficiente de absorción (véase la ecuación 4).
- d = distancia.

Para el cálculo de $\alpha(f)$ se puede utilizar una fórmula de Thorp, la cual se representa mediante la ecuación 4 (Velasco, 2022).

$$\alpha(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100f^2} + 2.75 \times 10^{-4}f^2 + 0.003 \quad (4)$$

Existe una característica de las ondas acústicas que se manejan en el entorno acuático, a la cual se le denomina el "Efecto Doppler". Este fenómeno se basa en el cambio de frecuencia que ocurre cuando un transmisor o receptor se encuentra en movimiento, provocando que las frecuencias se desplacen y se dispersen. Este efecto está relacionado con el canal de comunicaciones, que en este caso es el agua. Dado que los

dispositivos son más propensos al movimiento en este medio, la baja velocidad de las ondas sonoras contribuye a que el efecto Doppler sea más significativo.

Como se mencionó anteriormente, en general, el rendimiento de los sistemas de comunicación submarina no está determinado por el ruido; por el contrario, se atribuye a la propagación multitrayecto y al efecto Doppler. Esto se debe a que es sumamente complicado aumentar la tasa de datos de manera significativa o reducir la tasa de error de bits a un límite más bajo mediante un aumento de la relación señal/ruido (Otnes et al., 2012).

También hay diversos factores que afectan la distancia que puede recorrer una onda bajo el agua, ya que las partículas del agua pueden absorber, dispersar o reflejar frecuencias generadas por el sonido, de manera similar a lo que ocurre en la atmósfera terrestre. En el caso del agua marina, la absorción de estas partículas es aproximadamente 30 veces mayor que en agua dulce. Por esta razón, cuando se generan sonidos de frecuencia baja, pueden atravesar más partículas y viajar a una distancia mayor antes de sufrir pérdidas significativas. Sin embargo, algunos factores como la temperatura, la presión o la salinidad del agua afectan notablemente la propagación del sonido en estos entornos (Sendra, 2011).

De esto se destaca el funcionamiento de dicha velocidad de propagación en entornos cambiantes como el océano. En estas circunstancias, la temperatura puede disminuir hacia el fondo oceánico, lo que resulta en una disminución de la velocidad del sonido. En profundidades cercanas al kilómetro, las temperaturas no experimentan cambios significativos, por lo que la velocidad de propagación de la onda acústica se ve más afectada por la presión del agua. El cálculo de esta velocidad de propagación, a través de los factores de profundidad, temperatura y salinidad, se basa en la ecuación 5 (Balanis, 2012).

$$c(T, S, P) = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5(S - 35) + a_6Z + a_7Z^2 + a_8T(S - 35) + a_9Z^3 \quad (5)$$

Donde,

- a_1 = Valores constante 1448.96.
- a_2 = Valores constantes 4.591.
- a_3 = Valores constantes -5.304×10^{-2} .
- a_4 = Valores constantes -2.374×10^{-4} .
- a_5 = Valores constantes 1.340.
- a_6 = Valores constantes 1.630×10^{-2} .
- a_7 = Valores constantes 1.675×10^{-7} .
- a_8 = Valores constantes -1.025×10^{-2} .
- a_9 = Valores constantes -7.139×10^{-13} .
- T = Temperatura en grados Celsius.
- S = Salinidad del agua.
- P = Profundidad del agua en metros.

En el canal submarino que se enfoca en la acústica, generalmente se agrupan los diferentes aspectos que generan pérdidas en un canal de ruido, los cuales incluyen la mala calidad y una alta latencia (Buñay, 2023). Pero en comparación con los métodos de comunicación electromagnética y comunicaciones ópticas, la comunicación acústica es uno de los métodos óptimos para el despliegue de un enlace en medios acuáticos.

2.1.1.2 Comunicaciones ópticas.

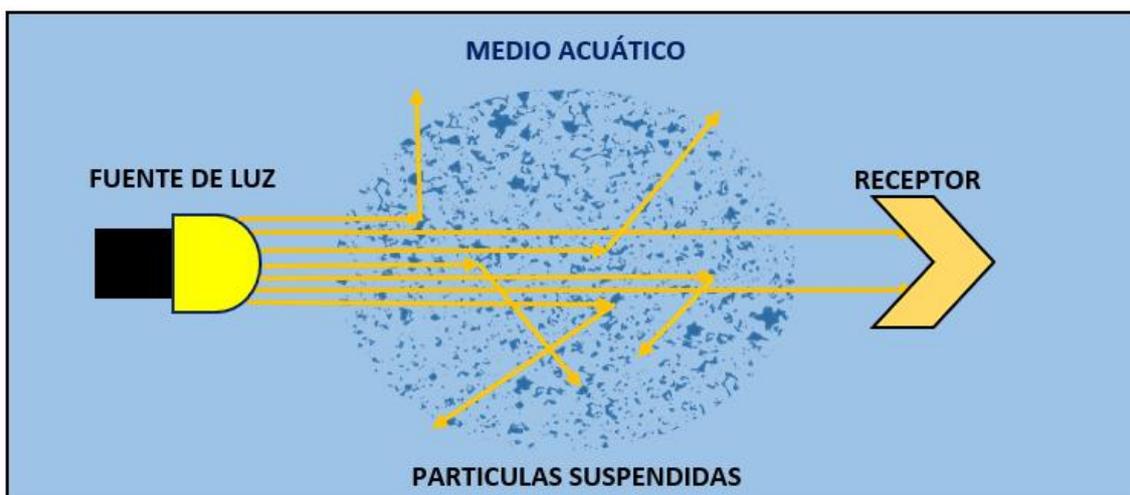
Cuando se habla de comunicaciones ópticas, se hace referencia al uso de la luz para la transferencia de información entre un transmisor y un receptor. Aunque son muy eficientes en entornos terrestres gracias al uso de la fibra óptica como canal de propagación, mediante la cual pueden recorrer kilómetros sin sufrir pérdidas significativas, permitiendo transferencias de datos a frecuencias realmente altas y con anchos de banda bastante amplios. En un entorno acuático donde no se utiliza un canal como la fibra óptica, sino en su lugar se utiliza el agua como medio de transmisión, estos haces de luz se ven afectados por la absorción del propio medio, lo que impide que se puedan transmitir a largas distancias (Arias, 2022).

Hay varios tipos de longitudes de onda que forman parte del espectro de luz y que no se afectan igual. En longitudes de onda correspondientes a colores rojizos o anaranjados, se observa un mayor índice de absorción. Por otro lado, las longitudes de onda entre azules y verdes (con un rendimiento de 10 Mbps a 150 Mbps en distancias de 10 a 100 m) presentan menos absorción en el medio acuático. Consultar la figura 5 (Arias, 2022).

Las comunicaciones ópticas son una opción de estudio en aplicaciones submarinas, puesto que el efecto Doppler no afecta a estas señales y la distancia que se puede recorrer mediante el uso de estos sistemas depende de su frecuencia (Ruiz & Muñoz, 2022). Sin embargo, el agua presenta partículas que se encuentran suspendidas, lo que ocasiona una dispersión significativa de la luz. Además, con el aumento de las propiedades físicas de este medio, la absorción de la luz se vuelve más elevada. En comparación con el aire, en un medio acuático la luz pierde intensidad de forma exponencial. La Figura 4 ilustra el efecto de dispersión de la luz en el medio acuático.

Figura 4.

Dispersión de luz en medio acuático.



Nota: En la figura se observa el efecto de dispersión de luz causado por las partículas suspendidas en el medio acuático. Este fenómeno provoca que la luz no pueda propagarse a grandes distancias.

Se puede calcular cuánta energía se dispersa por una partícula mediante el uso de una expresión teórica obtenida de la teoría de dispersión de Mie (Sendra, 2011). Y se expresa en la ecuación 6 (Balanis, 2012).

$$C_{SCA} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{SCA} r^2 \sin\phi d\phi d\theta}{I_0} \quad (6)$$

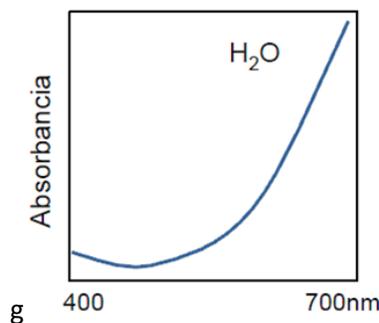
Donde,

- I_{SCA} = Intensidad de luz que se ha dispersado.
- I_0 = Intensidad de luz que incide.
- r = Radio de una partícula.
- $\sin\phi d\phi d\theta$ = Angulo que calcula toda la superficie de una esfera.
- a_5 = Valores constantes 1.340.

Efectos como la absorción son importantes, puesto que la luz tiende a transformarse en calor u otro tipo de energía química. Por ejemplo, las algas utilizan las fuentes de luz para obtener energía. Otros factores, como partículas orgánicas e inorgánicas en suspensión, tal como se observa en la figura 4, absorben la luz, evitando su propagación (Sendra, 2011). En la Figura 5, se observan los niveles de absorción de luz según la longitud de onda.

Figura 5.

Absorción de luz en el agua.



Nota: En la figura se observa la tendencia de absorción de la luz desde los 400 hasta los 700 nm de longitud de onda, donde los rangos por encima de 400 nm, que representan

coloraciones verdes y azules, presentan menos absorción, mientras que esta se dispara por encima de los 550 nm. La figura ha sido recuperada de (Instituto de Tecnologías Educativas., n.d.).

2.1.1.3 Comunicaciones electromagnéticas.

Otro de los métodos de comunicación subacuática es mediante el uso de ondas electromagnéticas, método en el que se centra este trabajo de grado. En este caso, es necesario dar un vistazo al espectro de radiofrecuencias, el cual se encuentra entre las frecuencias de 3 Hz hasta los 300 GHz (Arias, 2022).

Las ondas electromagnéticas tienen una velocidad máxima en medios como el vacío o el aire, que es aproximadamente 3×10^8 metros/s. Cabe resaltar que este valor no será el mismo en un medio con una permeabilidad relativa de 80, como la que presenta el agua dulce (Ruiz & Muñoz, 2022). Pero, si se desea realizar un análisis de cómo puede comportarse una onda electromagnética en un medio diferente al del aire, es necesario considerar la conductividad del medio en el que se requiera la propagación de estas ondas. Esto se debe a que dichos valores pueden aumentar o reducir la atenuación que se presente en el medio, dando como resultado una mayor o menor velocidad de propagación.

Si hablamos de agua potable, dicha conductividad puede variar entre los 500 a 800 mhos/cm, mientras que, en aguas salinizadas, esta conductividad se eleva hacia los 60000 mhos/cm (Ruiz & Muñoz, 2022). En el caso del agua dulce, como se puede apreciar, tiene un menor índice de pérdida que el agua con índices altos de salinidad. Por ende, la velocidad de propagación se puede calcular mediante la ecuación 7 (Balanis, 2012).

$$V_p \approx \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (7)$$

Donde,

- μ = Permeabilidad magnética del medio.

- ε = Permitividad del medio.
- Vp = Velocidad de propagación en el medio.

La velocidad de propagación de una onda electromagnética en el medio acuático generalmente se reduce en un factor de 9 en comparación con la velocidad de la luz en un entorno ideal. Sin embargo, esta velocidad supera a la que adquiere una onda acústica en el agua, lo que hace que la velocidad de transferencia de información sea mucho mejor con el uso de ondas electromagnéticas. No obstante, existe un coeficiente de absorción para estas ondas electromagnéticas en un medio acuático, el cual reduce significativamente la distancia que estas pueden recorrer. Dicho coeficiente se puede relacionar mediante la ecuación 8 (Balanis, 2012).

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (8)$$

Donde,

- α = coeficiente de absorción.
- σ = Conductividad eléctrica.
- μ = Permeabilidad magnética del medio.
- ε = Permitividad del medio.

Si observamos las ecuaciones número 4 y 5, se puede deducir que, en el agua dulce, el coeficiente de absorción y la velocidad con la que se propaga una onda electromagnética no tienen ninguna relación con la frecuencia que se emplee. Es decir, que el efecto será el mismo para todo tipo de frecuencias. Sin embargo, si se pasa a un medio con índices de salinidad como el agua marina, la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas y los coeficientes de pérdida son directamente proporcionales a

la frecuencia de la portadora de la propia señal transmitida. Esto se debe a que la constante dieléctrica del agua de mar es de 700 en frecuencias bajas a una temperatura de 20°C, mientras que en frecuencias que van alrededor de los 100 MHz, la constante dieléctrica será de 60 (Sendra, 2011). Para el caso de agua marina, si se desea tener un acercamiento a la velocidad de propagación, se utiliza la ecuación 9 (Balanis, 2012).

$$V_p \approx \sqrt{\frac{4\pi f}{\mu\sigma}} \quad (9)$$

Donde,

- V_p = Velocidad de propagación.
- σ = Conductividad eléctrica.
- μ = Permeabilidad magnética del medio.
- f = Frecuencia de portadora.

De igual forma, la pérdida por absorción en agua marina también puede asimilarse mediante la ecuación 10 (Balanis, 2012).

$$\alpha \approx \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (10)$$

Donde,

- α = Coeficiente de absorción.
- σ = Conductividad eléctrica.
- μ = Permeabilidad magnética del medio.
- f = Frecuencia de portadora.

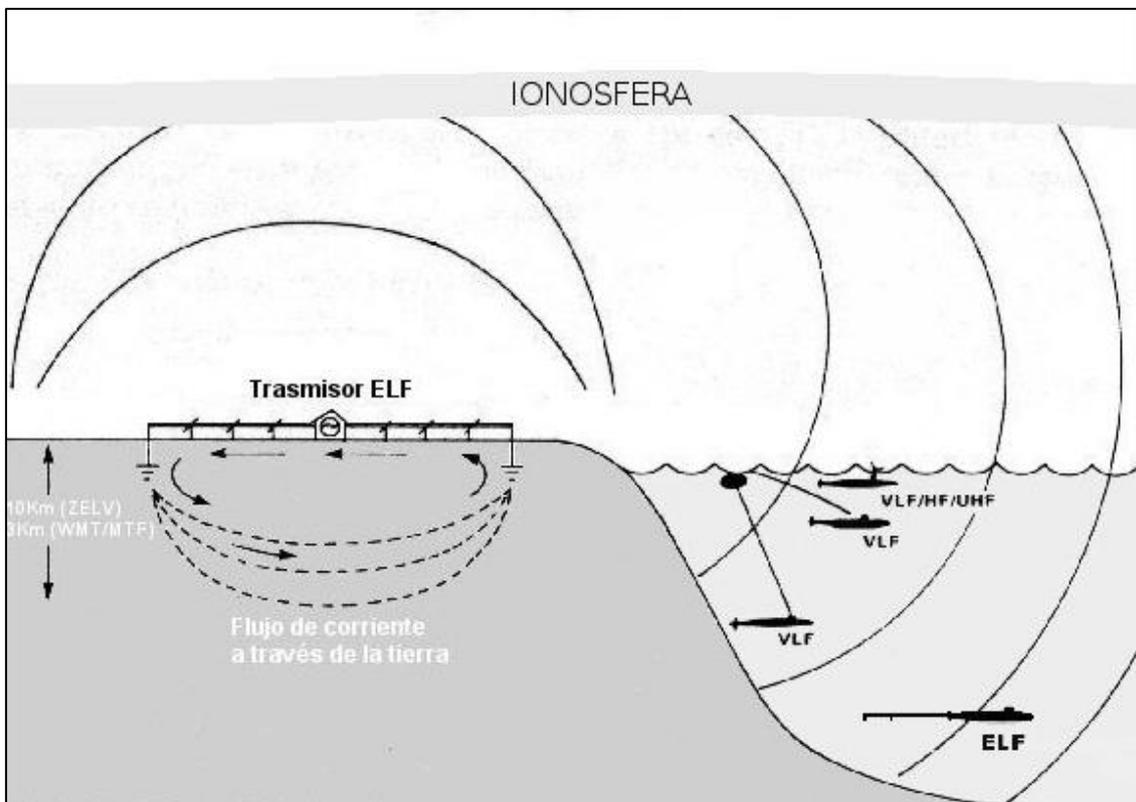
Entonces, se observa que tanto el agua dulce como el agua salada no presentan las mismas propiedades, influyendo directamente en el despliegue de soluciones prácticas

para las comunicaciones subacuáticas por medio de ondas electromagnéticas. Sin embargo, se resalta que es más práctico su desempeño en agua dulce (T. A. I. López, 2017).

Un ejemplo claro de comunicación electromagnética es la utilizada por las ondas ELF en comunicaciones de tierra hacia los submarinos. A menor frecuencia mayor será la longitud de onda y, por ende, menor será la pérdida por absorción. Tal como se observa en la Figura 6.

Figura 6.

Comunicación mediante frecuencias extremadamente bajas.



Nota: En la figura se observa la comunicación tierra-agua desde un transmisor ELF (Frecuencias Extremadamente Bajas) hacia submarinos que se encuentran en el fondo marino. La figura ha sido recuperada de (R. Alvarez, 2020).

2.2 Comunicaciones inalámbricas.

Cuando se habla de comunicaciones inalámbricas, se hace referencia a las redes que típicamente utilizan dispositivos como computadoras, asistentes digitales, teléfonos,

dispositivos de localización o dispositivos de transferencia de información. Pueden comunicarse entre sí mediante la transferencia de datos sin necesidad de un canal cableado, utilizan el aire para propagar ondas electromagnéticas. Si se desea realizar una comunicación inalámbrica para transferir cualquier tipo de dato, este debe realizar una conversión de tal forma que pueda ser transmitida por el aire.

El propósito de las redes inalámbricas generalmente es brindar la facilidad de acceso remoto y actuar como sustituto de la red cableada, puesto que, en comparación, el costo de despliegue es más bajo. Estas redes permiten que los dispositivos se conecten a largas distancias. Para lograr esto, existen tecnologías encargadas del despliegue de una red inalámbrica, las cuales se pueden apreciar en la Figura 7. Aquí, vemos que hay un rango de clasificación. Aquí se puede destacar redes como WPAN (Redes Inalámbricas de Área Personal), que generalmente no exceden un rango de alcance de 10 metros, redes WLAN (Redes Inalámbricas de Área Local), cuyo alcance varía en un entorno de 30 a 100 metros, WMAN (Redes de Área Metropolitana), que pueden cubrir la extensión de una ciudad y variar hasta los 50 km, y finalmente, WWAN (Redes de Área Amplia), las cuales pueden superar los 50 km (Salazar, 2016).

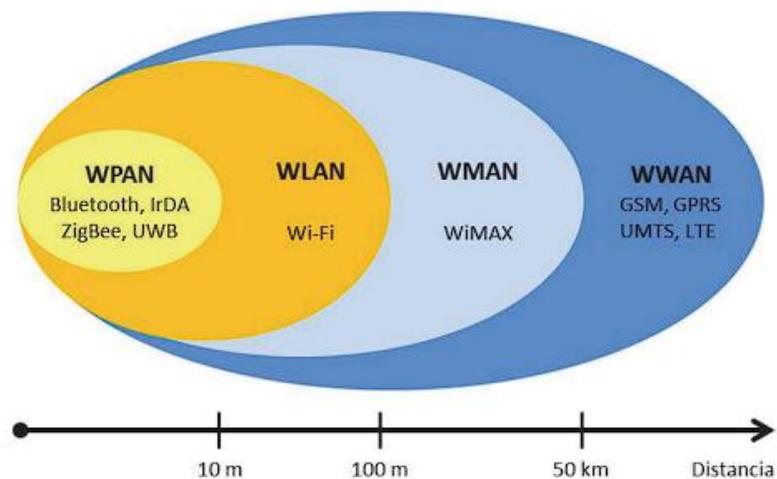
Las redes inalámbricas también pueden clasificarse en 2 segmentos, los cuales son: Redes inalámbricas de corto alcance y redes inalámbricas de largo alcance. Las redes inalámbricas de corto alcance tienen un área reducida o pueden desplegarse en un sector específico, como un edificio o una empresa. Dentro de estas, encontramos a las WLAN y WPAN. Generalmente, estas redes funcionan mediante el uso de espectro electromagnético no licenciado, y las frecuencias que se utilizan comúnmente en este segmento son 2.4 GHz y 5 GHz (Salazar, 2016).

Por otro lado, las redes inalámbricas de largo alcance ya no se limitan a un espacio concreto. En general, este tipo de redes se caracterizan por su despliegue comercial

orientado al servicio, y su rango de cobertura es extremadamente amplio. Aquí podemos encontrar las redes WMAN, que pueden alcanzar una cobertura de ciudades enteras. Pero entre las más utilizadas se encuentra la WWAN, que puede evidenciarse en el uso de enlaces satelitales o conexiones globales (Salazar, 2016).

Figura 7.

Clasificación de redes inalámbricas según su cobertura.



Nota: En la figura se observa la clasificación de las redes inalámbricas, identificando algunas de las tecnologías más utilizadas en cada una de ellas. La figura ha sido recuperada de (Salazar, 2016).

2.2.1 Comunicaciones LPWAN.

Una de las ramas que más ha evolucionado en los últimos años dentro del despliegue de redes inalámbricas es el Internet de las cosas (IoT). Aquí entra en juego uno de los métodos de despliegue de redes conocido como LPWAN (Redes inalámbricas de baja potencia), desempeñando un papel importante cuando se habla de la conexión entre dispositivos.

Estas redes de LPWAN han traído consigo la implementación de tecnologías como SigFox, LoRa, NB-IoT y LTE-M. LPWAN se centra en una comunicación de largo alcance mediante el uso de un ancho de banda bajo, además de estar orientado a tecnologías de bajo consumo de energía a una baja velocidad de datos. En algunos casos,

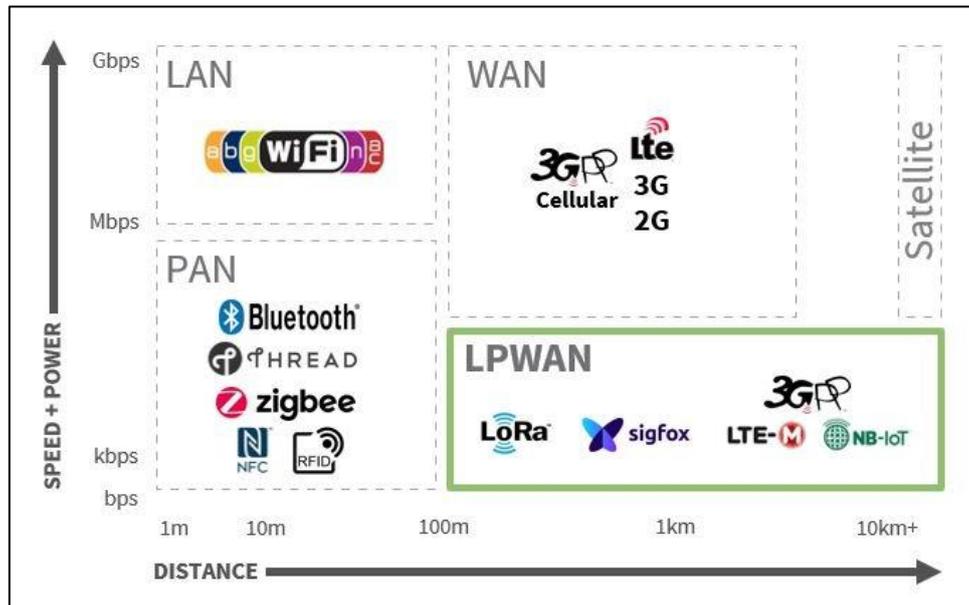
las baterías utilizadas en tecnologías LPWAN pueden durar hasta 10 años sin intervención humana. Por ende, son tecnologías ampliamente utilizadas en el despliegue de redes de monitoreo, que emplean sensores para obtener datos constantemente y luego reenviar estos datos a zonas apartadas del origen (Mane, 2021).

El reto de LPWAN es lograr que los dispositivos conectados entre sí puedan comunicar a largas distancias alrededor del mundo. En algunos casos, tecnologías como ZigBee, Wifi o Bluetooth podrían ayudar en la comunicación y envío de datos de los dispositivos IoT, pero el inconveniente es su alto consumo eléctrico. Esto puede ser problemático en entornos automatizados, ya que los sensores que se utilizan para la recolección de datos trabajan a base de baterías (Calero, 2023).

Entonces, las redes LPWAN son una solución a estos inconvenientes. Generalmente, se caracterizan por tener alcances de cobertura que pueden llegar a varios kilómetros, y sus tasas de datos son relativamente bajas, ya que utilizan el envío de pequeños paquetes de datos (Calero, 2023). Las redes LPWAN ofrecen una gran escalabilidad al proporcionar la posibilidad de conectar cientos de dispositivos a un solo núcleo de red. Además, el espectro que utilizan estas redes no está licenciado, por lo que es de uso libre. Otra de sus características clave es su baja susceptibilidad a interferencias, aunque esta característica puede verse afectada si se utilizan cantidades elevadas de dispositivos (Calero, 2023). De lo anterior se puede comparar las diferentes soluciones de redes inalámbricas y LPWAN, que se puede visualizar en la Figura 8.

Figura 8.

Comparación de LPWAN con otras tecnologías.



Nota: En la figura se muestra una comparación entre LPWAN y otras tecnologías de despliegue de redes como WAN, LAN y redes PAN. En esta comparación, se evidencia el bajo consumo y alcance de LPWAN. La figura fue tomada de (Mane, 2021).

2.3 Tecnología LoRa/LoraWAN

Las redes LoRa/LoRaWAN, (las cuales están estrechamente relacionadas con la implementación de este trabajo de grado y se vinculan con las redes LPWAN). Utilizan términos como LoRa, que se refiere al tipo de protocolo definido en función del modelo OSI, específicamente en su capa física. Por otro lado, el concepto de LoRaWAN hace referencia al protocolo de red implementado por LoRa Alliance. Esta tecnología se fundamenta en los principios de funcionamiento de ALOHA y generalmente utiliza FSK como tipo de modulación en frecuencia, así como CSS como tipo de modulación de espectro ensanchado chirp (Calero, 2023).

Las redes LoRa emplean un enfoque de código abierto, lo que posibilita la configuración de múltiples redes autónomas a un costo reducido. Esta apertura es una de las características que convierte a la tecnología LoRa en una elección preferida para

implementaciones de IoT. La Tabla 2 destaca algunas de las características técnicas de LoRa.

Tabla 2.

Datos técnicos LoRa.

Dato	Información
- Infraestructura de terceros.	- Código abierto.
- Bandas de operación.	- ISM Sub-GHz
- Canales.	- Múltiple SF con 64+8 UL y 8 DL
- Modulación.	- CSS, FSK
- Tasa de datos.	- 0.3-37.5 Kbps
- Rango de comunicaciones.	- 5Km – 15 Km
- Longitud de carga útil.	- +250 Bytes
- Autenticación.	- Clave de autenticación simétrica.
- Encriptación.	- AES 129 Bits

Nota: En la tabla se pueden observar los diferentes datos técnicos generales con los que trabaja la tecnología LoRa, Tabla adaptada de (Shanmuga et al., 2020).

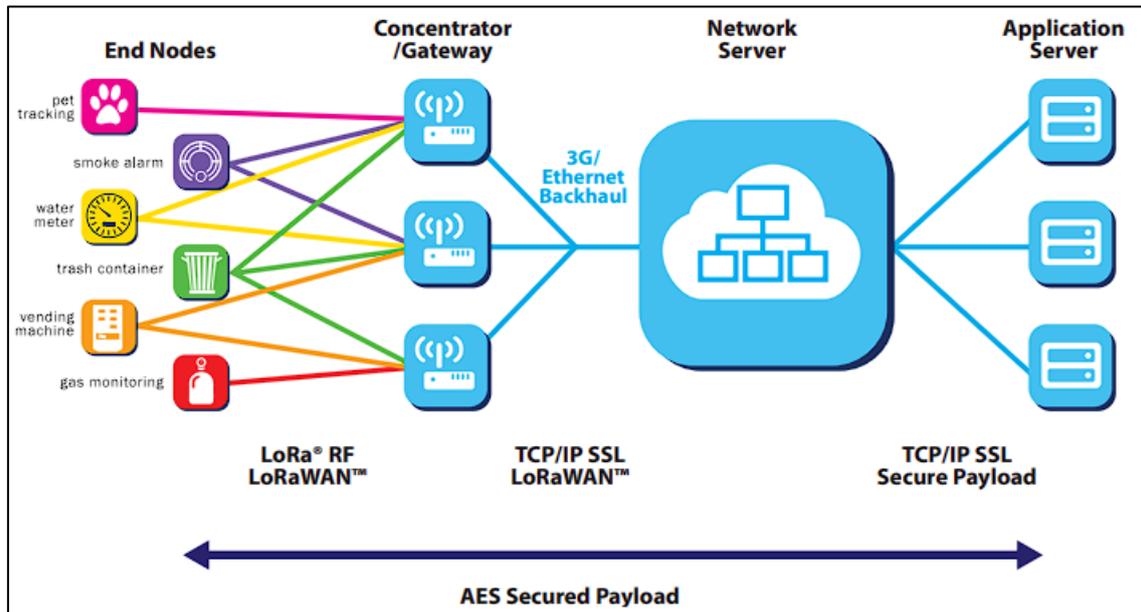
LoRa/LoRaWAN opera en las frecuencias de 868 MHz para la región europea, 915 MHz para la región norteamericana y 433 MHz para la región asiática (Calero, 2023).

2.3.1 Arquitectura de una Red LoRa.

La arquitectura de una red LoRaWAN puede estar compuesta por diferentes elementos que interactúan entre sí. Estos elementos están dispuestos en forma de estrella, donde se conectan diversas puertas de enlace. Cada dispositivo se encarga de traducir los datos que recibe y los envía a un servidor de red, utilizando pasarelas para la recepción de datos. En la Figura 9 se muestra una ilustración gráfica de la arquitectura de LoRaWAN (Baltuille, 2023).

Figura 9.

Arquitectura LoRaWAN.



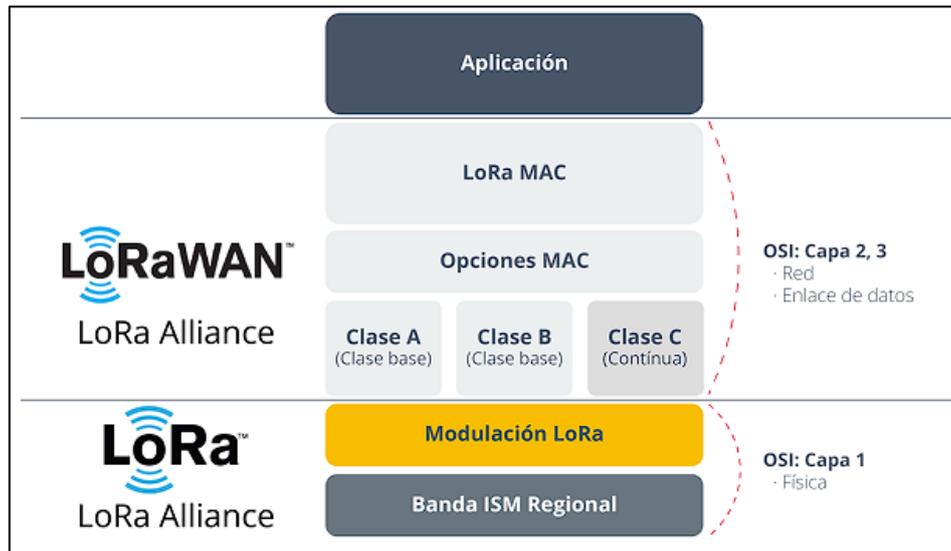
Nota: En la figura se observan las diferentes pasarelas para recibir datos y cómo se distribuyen las diferentes capas tanto del dispositivo que envía la información como en el área de recepción, recuperada de (LoRa Alliance, 2015).

Ahora, en la Figura 10, se puede observar el modelo de referencia OSI, el cual se utiliza para la implementación de LoRaWAN y LoRa. En este modelo, se evidencia que LoRaWAN trabaja sobre las capas de red y enlace de datos, subdividiendo estas en las denominadas LoRa MAC, Opciones MAC y las diferentes clases. Mientras tanto, LoRa trabaja sobre la capa física, dividiéndola en Modulación LoRa y Banda ISM Regional.

En la Figura 10, se aprecia el modelo de capas para LoRaWAN, aquí se destaca que LoRaWAN es un protocolo de comunicaciones a nivel de red, este se encuentra determinado en las capas de red y enlace de datos, las cuales están un nivel arriba de la capa física. Por otro lado, en dicha capa física está el protocolo LoRa, el cual se orienta a la transmisión de señales de radio a grandes distancias.

Figura 10.

Modelo referencia OSI para LoRaWAN.



Nota: En la figura se aprecia la distribución de capas en relación con el modelo de referencia OSI que LoRaWAN utiliza para su implementación, la figura ha sido recuperada de (Baltuille, 2023).

En el apartado de LoRaWAN de la Figura 10, se observa que existen 3 tipos de clases, las cuales pueden llamarse clases de nodo, estas se clasifican así:

- a. **Clase A:** Soportada por casi todos los dispositivos, su función es establecerse como RX (modo escucha) luego de realizar una transmisión hacia algún Gateway, por lo que permite un ahorro de energía.
- b. **Clase B:** Esta clase puede establecer modos de recepción por medio de tiempos configurados con un Gateway.
- c. **Clase C:** Su modo escucha siempre está activo, pero se posiciona en modo de transmisión cuando es estrictamente necesario, el ahorro de energía es bajo.

2.4 Monitoreo ambiental.

Este se refiere al empleo de sensores para medir parámetros específicos relacionados con factores que podrían afectar la calidad de un ecosistema, permitiendo así determinar el índice de contaminación y su comportamiento. La aplicación de

tecnologías como LoRa en el monitoreo de variables ambientales mediante sensores tiene como objetivo principal la supervisión de ecosistemas vulnerables, seguida de la implementación de acciones para mitigar el impacto de la actividad humana sobre ellos (Silvio, 2022).

La implementación de tecnologías para el monitoreo de ecosistemas adquiere gran relevancia, ya que, gracias a los datos precisos recopilados por los sensores, es posible obtener información detallada sobre los factores que influyen en la contaminación o deterioro de dichos ecosistemas. Esto, a su vez, facilita la identificación de alternativas de solución que contribuyan a la recuperación de dichos entornos (AECOC, 2023).

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describe la situación actual de la laguna de Yahuarcocha, con énfasis en los mecanismos implementados para combatir su contaminación. Utilizando la metodología Kanban, se visualizará el estado actual del proyecto, para luego realizar el análisis de los requerimientos del sistema que se espera implementar, lo cual permitirá seleccionar los componentes necesarios para su desarrollo. Posteriormente, se detallará la arquitectura del sistema propuesto en cada una de sus fases, el tipo de comunicación y la integración de todos estos elementos. Como parte de esta implementación, se integrará una simulación que permitirá observar el comportamiento de la comunicación subacuática. Finalmente, se describirá paso a paso la construcción del nodo subacuático, que a partir de ahora se le denominará “Nodo Sensor” y la Boya de Comunicaciones, utilizando diagramas y esquemas para facilitar la comprensión de su funcionamiento.

3.1 Metodología.

Para llevar a cabo el proceso de implementación, es fundamental utilizar una metodología que abarque todos los procesos necesarios para su desarrollo. Al hablar de metodología, nos referimos a un conjunto de procedimientos, técnicas y herramientas que permiten un desarrollo eficiente, siguiendo una estructura y un orden previamente establecidos (Fontoura, 2023).

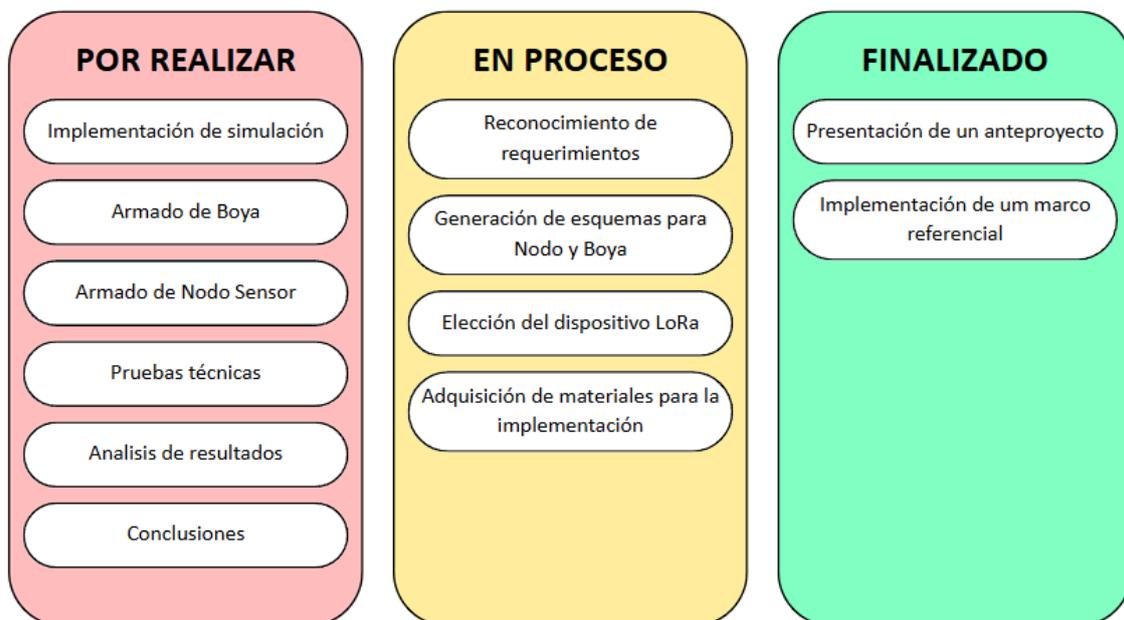
La metodología que se implementará en este trabajo de grado, como se mencionó en el capítulo 1, es la denominada 'KANBAN'. Esta metodología se centra en la mejora continua y la visibilidad del estado de un proyecto o proceso. Utiliza tableros que permiten visualizar el flujo de trabajo, facilitando así el control y seguimiento de la ejecución del proyecto (Martins, 2024), ver figura 11. El tablero KANBAN se organiza según diversos parámetros que permiten ordenar los procesos. Su estructura sigue los siguientes aspectos:

- a. **Columnas:** Aquí se establecen los estados en los que se encuentra un proceso, los cuales se dividen en “Tareas por realizar”, “Tareas en progreso”, “Tareas realizadas”
- b. **Filas:** Las filas se utilizan para distribuir trabajo cuando se realiza por equipos, o en otros casos para establecer una prioridad de tareas, de mayor a menor.
- c. **Tarjetas:** Las tarjetas se posicionan en cada columna y fila, estas llevan una anotación de un proceso que se debe ejecutar, que se encuentra en proceso de ejecución o que ya se ha ejecutado.

La forma en que esto funciona es mediante el recorrido de tarjetas por las diferentes columnas, dependiendo del estado del proceso de cada tarjeta hasta su finalización (Martins, 2024). En el caso este trabajo el tablero Kanban se observa en la figura 11.

Figura 11.

Tablero Kanban



Nota: En la figura se observa el tablero Kanban de los procesos que se encuentran en lista de ejecución, ejecutándose y los que ya se han culminado. Esta información es utilizada para generar un proceso metodológico de este trabajo de grado.

3.2 Situación actual.

En este apartado se detalla el estado actual de la laguna de Yahuarcocha, así como las tecnologías que se están utilizando para recuperar el cuerpo de agua de los altos índices de contaminación. Se describen las características de la laguna, con el objetivo de entender claramente el ambiente en el que se implementará el sistema.

3.2.1 Laguna de Yahuarcocha.

Antes de llevar a cabo el análisis de requerimientos para la implementación de este trabajo de grado, es fundamental conocer las características de la zona donde se realizarán las pruebas del Nodo Sensor. La laguna de Yahuarcocha es un cuerpo de agua situado a aproximadamente 3 km de la ciudad de Ibarra, en la provincia de Imbabura, Ecuador. Con una antigüedad cercana a los 12 mil años, la laguna se encuentra a 2,190 metros sobre el nivel del mar, abarcando una superficie de 2.61 km², con un volumen aproximado de 12.7 millones de metros cúbicos de agua y una profundidad de 8 metros. La temperatura del agua es de aproximadamente 11°C (Geoparque Imbabura, 2018), ver la Tabla 3.

Tabla 3.

Características de la Laguna de Yahuarcocha.

Dato	Característica
- pH.	- 7.9 a 8.5 pH
- Conductividad	- 560 uS/m
- Profundidad	- ≈ 6 metros.
- Temperatura	- ≈ 11°C
- Componentes orgánicos detectados.	- Cianobacterias y Microalgas

Nota: En la tabla se detallan las características específicas de la Laguna de Yahuarcocha del proyecto, adaptada de (Geoparque Imbabura, 2018).

En la Figura 12 se tiene una visualización de la laguna de Yahuarcocha mediante la toma de una foto panorámica desde sus alrededores.

Figura 12.

Laguna de Yahuarcocha.



Nota: En la figura se puede visualizar una fotografía capturada de la laguna de Yahuarcocha.

La contaminación en la laguna de Yahuarcocha ha aumentado en los últimos años debido a la proliferación descontrolada de microorganismos conocidos como cianobacterias. Este crecimiento excesivo es causado por la entrada de grandes cantidades de aguas con materia orgánica, que llegan a la laguna a través de quebradas y acequias cercanas (La Hora, 2023a). En 2022, el Gobierno Autónomo Descentralizado de Ibarra invirtió alrededor de 3 millones de dólares en proyectos destinados a la recuperación de la laguna. Uno de los más importantes es el uso de “Equipos de Ultrasonido”, como se muestra en la Figura 13. Entre las estrategias implementadas para mitigar la contaminación, destacan las siguientes:

Equipos de Ultrasonido: Estos equipos, importados desde Estados Unidos por la empresa Water IQ Technologies, fueron adquiridos por el municipio de Ibarra con una inversión de 390.000 USD por cada uno. Su objetivo es controlar las poblaciones de cianobacterias y microalgas, ya que funcionan mediante ondas ultrasónicas que rompen las vacuolas de gas presentes en estos microorganismos, impidiendo que realicen la fotosíntesis en la superficie del agua. Según el diario La Hora, la parte técnica encargada

de estos equipos estima que la coloración verde de la laguna disminuirá en un plazo de 15 semanas desde su instalación, ver Figura 13 (La Hora, 2022a).

Figura 13.

Equipos de ultrasonido



Nota: En la figura se observa una de las 7 plataformas de ultrasonido que se utilizan en la Laguna de Yahuarcocha con el objetivo de controlar la proliferación de microorganismos, imagen recuperada de (La Hora, 2022b).

Jardines flotantes: Estas estructuras, de 6 x 2 metros, son cultivos de plantas adaptadas a la laguna, cuyo objetivo es absorber los nutrientes que fomentan la proliferación de bacterias, contribuyendo así a la mejora de la calidad del agua (Aayala, 2021b).

3.3 FASE 1: Análisis de los requerimientos.

En la implementación de este trabajo de grado se utilizará la tecnología LoRa, con el objetivo de establecer una comunicación inalámbrica subacuática que permita la transmisión de datos desde el Nodo Sensor hacia la boya. Los requerimientos para su desarrollo se apegan al estándar ISO/IEC/IEEE29148 actualizado al año 2018 (IEEE 29148, 2018). De aquí parten las especificaciones necesarias para la definición, análisis validación y gestión de los requisitos necesarios que se esperan tener en cuenta para el desarrollo del presente proyecto, tomando énfasis apartados como hardware, software y

funcionamiento de todo el sistema en sí. Teniendo en cuenta que este trabajo se centra en una investigación en base a un análisis bibliográfico, los datos referentes a este se presentan en el ANEXO 1.

3.3.1 Nomenclatura de requerimientos.

Antes de empezar con el análisis de los requisitos, se realiza una asignación de abreviaturas que nos permiten una interacción más factible con el entendimiento de este proyecto, aquí se detallan los requerimientos quienes hacen parte del proyecto, los requerimientos que son necesarios para el funcionamiento del sistema en conjunto así como de la arquitectura a implementar (ver tabla 4).

Tabla 4.

Abreviaturas de los requerimientos.

Abreviaturas	Descripción
StSR	- Requerimientos de Stakeholders.
SySR	- Requerimientos del Sistema.
SRSR	- Requerimientos de Hardware y Software.

Nota: En la tabla se detalla la nomenclatura para cada uno de los requerimientos con los que trabaja el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 (IEEE 29148, 2018).

3.3.2 Stakeholders.

Al referirse a un stakeholder (StSR), se hace referencia a un individuo o grupo, que se encuentra involucrado dentro del desarrollo de un proyecto. La lista de los stakeholders que hacen parte del desarrollo del presente proyecto se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5.

Abreviaturas de los requerimientos.

Numero	Stakeholder
1.	- Ing. Fabián Cuzme (Director de trabajo de grado).
2.	- Ing. Jaime Michilena (Asesor de trabajo de grado).
3.	- Sr. Diego Montezuma (Desarrollador de trabajo de grado).

Nota: En la tabla se detallan los stakeholders del proyecto, basados en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 (IEEE 29148, 2018).

Teniendo en cuenta la definición de las nomenclaturas y de los stakeholders que hacen parte del presente proyecto, se da paso a determinar los requerimientos necesarios para la implementación del Nodo Sensor y su Boya de Comunicaciones, para lo cual se determina mediante el apoyo del Ing. Fabián Cuzme, quien se especializa el trabajo investigativo de comunicaciones subacuáticas. Como resultado de esto se establece la prioridad de los requerimientos correspondientes, mediante el uso de la Tabla 6.

Tabla 6.

Prioridad de requerimientos.

Prioridad	Descripción
Alta.	- En este caso, dicho nivel representa una prioridad de gran importancia para que el sistema planteado pueda funcionar de forma correcta.
Media.	- Son requisitos que de igual forma tienen un alto nivel de prioridad, pero que en casos puntuales se puede prescindir de ellos sin que eso signifique una afectación grave al sistema propuesto.
Baja.	- Estos se consideran como requisitos opcionales, que pueden o no ser incluidos ya que no presentan un problema para el funcionamiento del sistema.

Nota: En la tabla se detallan los aspectos de prioridad para la especificación de estos en cada uno de los requerimientos, basados en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 (IEEE 29148, 2018).

3.3.3 Requerimientos Operacionales.

Antes de comenzar con el desarrollo del sistema, es necesario establecer los requerimientos que este debe tener para su correcto funcionamiento, para ello se ha establecido la Tabla 7, en la cual se genera una lista de requerimientos de operación del sistema, los cuales serán de ayuda para la selección del Hardware LoRa que se espera utilizar.

Tabla 7.

Requerimientos Operacionales y de Usuario.

REQUERIMIENTOS OPERACIONALES (StSR)				
Nº	Requerimientos	Prioridad		
		Alta	Media	Baja Prec.

StSR1	El Nodo Sensor y la antena ubicada en la boya requieren estar sumergidos bajo el agua.	X	
StSR2	Debe existir una conexión inalámbrica entre el Nodo Sensor y la boya para transferencia de datos respetando la normativa de bandas libres ISM (902 – 928 MHz) que rige en Ecuador.	X	
StSR3	Tanto el Nodo Sensor como la boya deben estar alimentados con baterías.	X	
StSR4	El sistema debe estar preparado para funcionar a bajas temperaturas.	X	
StSR5	El sistema debe ser hermético y trabajar en condiciones de alta humedad.	X	
REQUERIMIENTOS DE USUARIO (StSR)			
StSR6	Los datos del sistema se deben visualizar vía computador ya sea por conexiones serial o inalámbrica.	X	
StSR7	El sistema debe contar con una interfaz de usuario intuitiva.		X
StSR8	La Boya de Comunicaciones debe enviar los datos a una plataforma de visualización.	X	
StSR9	El sistema debe ser manipulado con el objetivo de mantener una comunicación inalámbrica bajo el agua.	X	StSR1

Nota: En la tabla se detallan los requerimientos operacionales y de usuario que debe tener el proyecto, basados en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 (IEEE 29148, 2018).

3.3.4 Requerimientos del sistema.

Teniendo en cuenta los requerimientos operacionales y de usuario, es esencial conocer cuáles son los requerimientos específicos que el sistema debe tener para su funcionamiento ideal, aquí se toma en cuenta los requerimientos de interfaz, de uso, de rendimiento, de estado/mod y físicos, como se puede visualizar en la Tabla 8.

Tabla 8.

Requerimientos Operacionales y de Usuario.

REQUERIMIENTOS DE INTERFAZ (SySR)					
N°	Requerimientos	Prioridad			Prec.
		Alta	Media	Baja	
SySR1	La placa de la boya debe tener conexión serial para transferencia de datos hacia una computadora.		X		StSR6

SySR2	El sistema debe contar con una interfaz para la visualización de datos recolectados en tiempo real.	X	
SySR3	La transferencia de datos entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones debe ser inalámbrica y trabajar en las bandas de frecuencia libre ISM (902 – 928 MHz).	X	StSR2
REQUERIMIENTOS DE USO (SySR)			
SySR4	La conexión entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones debe ser estable.	X	
SySR5	Los datos se deben transmitir inalámbricamente en tiempo real desde el Nodo Sensor.	X	SySR3
SySR6	El sistema debe recolectar los datos desde el Nodo Sensor y ser visualizados en conexión serial en la Boya de Comunicaciones.	X	StSR6
REQUERIMIENTOS DE RENDIMIENTO (SySR)			
SySR7	La transmisión de los datos debe ser confiable desde el Nodo Sensor a la boya.	X	
SySR8	El envío de datos desde el Nodo Sensor debe empezar cuando se haya establecido conexión entre este y la Boya de Comunicaciones.	X	
SySR9	El funcionamiento de los módulos LoRa debe ser mediante el uso de baterías.	X	StSR3
REQUERIMIENTOS DE MODO Y ESTADO (SySR)			
SySR10	El sistema debe tener 2 modos, uno de operación normal (comunicación inalámbrica entre Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones) y otro de desconexión (cuando el Nodo Sensor no este sumergido en el agua).	X	
SySR11	El sistema debe alertar un estado de fallo de comunicaciones, un estado de batería baja y un estado de alerta por variables fuera de rango.	X	
REQUERIMIENTOS FISICOS (SySR)			
SySR12	El Nodo Sensor debe tener un diseño hermético y resistente a inmersiones en el agua.	X	StSR5
SySR13	El nodo debe tener salida para 2 sensores (pH y turbidez) que estén en contacto permanente con el gua.	X	

SySR14	El sistema debe operar a temperaturas por debajo de los $\pm 11^{\circ}\text{C}$ adecuándose a las condiciones de la laguna.	X	StSR4
SySR15	La Boya de Comunicaciones debe estar flotando en la superficie del agua.	X	
SySR16	La antena LoRa que se encuentra en la Boya de Comunicaciones debe estar sumergida en la superficie del agua.	X	

Nota: En la tabla se detallan los requerimientos del sistema que debe tener el proyecto, basados en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 (IEEE 29148, 2018).

3.3.5 Requerimientos del Hardware y Software.

Para este tipo de requerimientos se establece la Tabla 9, en la cual se encuentra detallado los requerimientos específicos de cada componente del sistema, como pueden ser las placas LoRa a utilizar y los sensores que van a actuar como recolectores de datos, teniendo en cuenta las características que son necesarias para el funcionamiento.

Tabla 9.

Requerimientos de Hardware y Software.

REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE (SRSH)					
N°	Requerimientos	Prioridad			
		Alta	Media	Baja	Prec.
SRSH1	El lenguaje de programación debe ser open source.	X			
SRSH2	El lenguaje de programación debe contar con las librerías necesarias para el funcionamiento de los sensores.	X			SySR13
SRSH3	Se debe hacer uso del puerto serial para la lectura de datos, por lo que el IDE en el que se realiza la programación debe contar con lectura serial.		X		SySR6
SRSH4	El módulo LoRa debe permitir la fácil integración con el lenguaje de programación y el IDE.	X			
REQUERIMIENTOS DE HARDWARE (SRSH)					
SRSH5	El dispositivo LoRa debe manejar una variedad de frecuencias de operación en las bandas libres ISM.	X			StSR2
SRSH6	El hardware del dispositivo debe ser compatible con diferentes tecnologías aparte de LoRa (wifi).		X		

SRSH7	El dispositivo LoRa debe contar con entradas analógicas que permitan integrarse a la conexión de sensores.	X	SySR13
SRSH8	Las antenas del dispositivo LoRa deben tener una alta sensibilidad.	X	
SRSH9	El dispositivo LoRa debe tener un bajo consumo de energía.	X	
SRSH10	El dispositivo debe soportar el procesamiento de varios datos a la vez.	X	SRSH2
SRSH11	El sensor PH debe ser compatible con el dispositivo LoRa (Librerías).	X	
SRSH12	El sensor de Turbidez debe ser compatible con el dispositivo LoRa (Librerías).	X	SRSH2
SRSH13	Los sensores deben estar conectados al dispositivo LoRa en simultaneo sin necesidad de otros módulos.	X	
REQUERIMIENTOS DE DISPONIBILIDAD (SRSH)			
SRSH14	Se requiere la disponibilidad de los componentes en el mercado.	X	
REQUERIMIENTOS DE ALIMENTACIÓN (SRSH)			
SRSH15	Se requiere una fuente de alimentación entre 3 A 5v.	X	StSR3
REQUERIMIENTOS DE DISEÑO (SRSH)			
SRSH16	El Nodo Sensor debe tener una estructura hermética que permita la protección de todos los componentes en un ambiente subacuático.	X	StSR5
SRSH17	El material sobre el que debe estar construida la Boya de Comunicaciones debe tener flotabilidad.	X	
SRSH18	La Boya de Comunicaciones debe tener una parte sumergible que permita posicionar la antena de comunicaciones debajo del agua.	X	SySR16

Nota: En la tabla se detallan los requerimientos de hardware y software así como de diseño que debe tener el proyecto, basados en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 (IEEE 29148, 2018).

3.4 Elección de Hardware y Software.

En este apartado se presenta el proceso de selección de hardware y software que se van a utilizar para la implementación de este trabajo de grado, esto se lo realiza basado en la sección [3.3](#), la cual habla de los requerimientos que debe de tener el sistema para su correcto funcionamiento, para ello en cada uno de los apartados se presenta una tabla de

comparación entre algunas opciones de dispositivos, los cuales mediante una valoración entre 0 y 1 (donde 0 no cumple con el requerimiento planteado y 1 cumple con el requerimiento planteado) se espera tener un resultado final que permita una elección de componentes que obtengan un valor superior.

3.4.1 Elección de Hardware.

En este apartado se realiza la elección de cada uno de los componentes que se van a utilizar en el sistema, entre los cuales tenemos a la placa LoRa, sensor de PH y sensor de turbidez.

3.4.1.1 Elección de placa LoRa.

Antes de realizar la elección de la placa LoRa, se ha establecido que la prioridad para la elección es que la placa sea integrada, puesto que esto facilita en la conexión de sensores y la compatibilidad con las librerías para el uso de sensores en un solo modulo, otro de los parámetros que se toman en cuenta es la frecuencia de operación que debe estar en MHz, así como la alta sensibilidad de antenas de recepción, lo que es crucial al momento de interactuar en un medio denso como el agua, teniendo en cuenta esto se ha optado por las placas que se enlistan en la Tabla 9.

Tabla 10.

Comparativa de requerimientos de placa LoRa.

Hardware	Requerimientos					Valor
	StSR4	SySR1	SRSH5	SRSH7	SRSH8	
RYLR896	1	1	1	0	1	4
RYLR998	1	1	1	0	1	4
Wifi LoRa 32 V3	1	1	1	1	1	5

1: Cumple
0: No cumple

Nota: En la tabla se realiza una comparativa de requerimientos entre las 3 placas LoRa seleccionadas, con el objetivo de seleccionar la de mayor puntaje, basados en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 (IEEE 29148, 2018).

En este caso se puede concluir que el módulo LoRa 32 V3 es el que tiene una puntuación más alta en cuanto a la compatibilidad de requisitos necesarios para el funcionamiento del sistema planteado, por ello en la Tabla 11 se especifican una comparación más detallada de las características de cada uno de los módulos LoRa.

Tabla 11.

Comparación entre RYLR896, RYLR998 Y LoRa32v3.

	RYLR896	RYLR998	LoRa 32 V3
- Conexión integrada	Necesita Placa Externa	Necesita Placa Externa	Integrado con ESP32
- Frecuencias	862 a 915 MHz	820 a 960 MHz	863 – 928 MHz, 470 – 510 MHz.
- Voltaje.	2 a 3.3 V	1.8 a 3.6V	3.7 V
- Consumo de energía.	43mA tx	140 mA tx	4,6 mA
- Potencia de Tx	-4 a 15 dBm	0 a 22 dBm	21 ±1 dBm.
- Sensibilidad	-148 dBm	-129 dBm	-134 dBm
- Tecnologías de comunicación.	LoRa	LoRa	Bluetooth, Wifi (802.11 b/g/n) encima de 150Mbps, LoRa
- Temperatura	-40 a 85 °C	-40 a 85 °C	-20 a 70 °C

Nota: En la tabla se expresa una comparación de las diferentes características con las que cuenta cada módulo LoRa, entre los cuales está el RYLR896 (REYAX, 2019), el RYLR998 (REYAX, 2024) y el LoRa 32 V3 (Heltec, 2022).

Una vez analizadas las características de cada uno de estos módulos, se elaborará una tabla comparativa que detalle las ventajas y desventajas de cada opción en relación con su uso en la implementación del Nodo Sensor y la comunicación inalámbrica con la boya. Ver Tabla 12.

Tabla 12.

Ventajas y desventajas de módulos REYLR 998, 896 y Wifi LoRa 32 V3.

Ventajas	Desventajas
RYLR896	
- Maneja frecuencias entre 862 a 915 MHz.	- Necesita de un módulo externo para recepción de datos.
- Voltaje de operación bajo.	- Solo cuenta con tecnología LoRa, a diferencia del LoRa32V3.

- Consumo bajo de energía en transmisión.
- Bajas temperaturas de operación.
- Alta sensibilidad de recepción y potencia de transmisión hasta 15 dBm

RYLR892

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Maneja frecuencias entre 820 a 960 MHz. - Voltaje de operación bajo. - Bajas temperaturas de operación. - Alta sensibilidad de recepción (aunque menor que el RYLR892) y potencia de transmisión hasta 22 dBm | <ul style="list-style-type: none"> - Necesita de un módulo externo para recepción de datos. - En comparación al módulo RYLR892 y LoRa32V3, consume más energía en transmisión. - Solo cuenta con tecnología LoRa, a diferencia del LoRa32V3. |
|--|---|

Heltec Wifi LoRa 32 V3

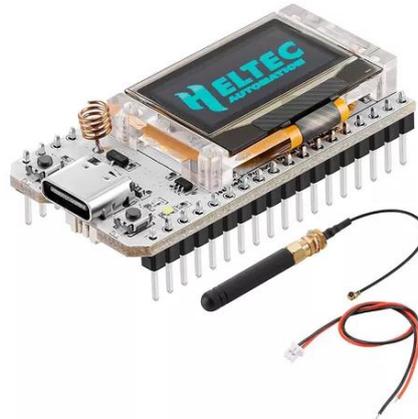
- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Integrado con un ESP32 por lo que no es necesario un módulo externo. - Maneja 2 rangos de frecuencias que van desde los 863 – 928 MHz, 470 – 510 MHz. - Solo cuenta con tecnología 3 tecnologías de comunicación: LoRa, Wifi y Bluetooth. - Bajas temperaturas de operación. - Alta sensibilidad de recepción (mayor que RYLR998 y menor que RYLR892) - Bajo consumo de energía en comparación a los RYLR | <ul style="list-style-type: none"> - Voltaje de operación más elevado que los módulos RYLR. |
|--|--|

Nota: En la tabla se expresa un desglose de las ventajas y desventajas de cada uno de los módulos.

Para llevar a cabo la implementación del nodo de comunicación inalámbrica subacuática, es necesario realizar un análisis de la tecnología LoRa que se plantea utilizar. En este caso, el trabajo de grado se centra en el dispositivo Wifi LoRa 32 V3 / HTITWB32LA V3, una placa diseñada por Heltec Automation y lanzada en el año 2017. (Heltec, 2022). El modelo general de la placa se lo puede observar en la figura 14.

Figura 14.

Wifi LoRa 32 V3.



Nota: En la figura se puede observar la placa Wifi LoRa 32 V3 / HTITWB32LA V3 en su diseño general, imagen recuperada de (Amazon, 2022).

Es una placa diseñada para el desarrollo en el ámbito del Internet de las cosas (IoT), que integra tecnologías como Wifi, Bluetooth y LoRa basadas en ESP32, siendo adecuada para trabajar con las interfaces de Arduino IDE. (Heltec, 2022). Algunas de las características de esta placa se especifican en la tabla 13.

Tabla 13.

Datos técnicos de placa Heltec Wifi LoRa 32 V3 / HTITWB32LA V3.

Dato	Información
- Microcontrolador.	- ESP32-S3.
- Chip LoRa.	- SX1262
- Conexión de datos.	- Tipo C
- Crystal.	- Temperatura de alta precisión, oscilador compensado.
- Consumo de energía.	- Por debajo de los 10uA.
- Adaptación.	- Mejor adaptación de impedancia en circuitos de radio frecuencia.
- Frecuencias.	- EU868, IN865, US915, AU915, AS923, KR920 y redes LPW que operan en 863 – 928 MHz, 470 – 510 MHz.
- Potencia de Tx.	- 21 +/- 1 dBm.
- Sensibilidad.	- -134 dBm
- Conector de batería.	- SH1.25-2
- Tecnologías de comunicación.	- Bluetooth, Wifi (802.11 b/g/n) encima de 150Mbps, LoRa.
- Temperatura de operación.	- -20 a 70 °C
- ROM.	- 384KB.

- SRAM. - 512KB.
- RTC SRAM. - 16KB.
- SiP Flash. - 8MB.
- Voltaje de batería. - 3.7V.

Nota: En la tabla se pueden observar los datos técnicos de la placa Wifi LoRa 32 v3, información adaptada de (Heltec, 2022).

La placa utiliza un chip LoRa SX1262, reconocido como un transceptor de radio, diseñado específicamente para aplicaciones inalámbricas a largas distancias. Este chip permite transmisiones de más de 22 dBm de potencia y es compatible con modulación LoRa y FHSS, lo que facilita el uso de aplicaciones LPWAN. Además, también admite modulaciones (GFSK) y se adhiere al estándar LoRaWAN. En la tabla 14 se pueden observar algunas especificaciones técnicas detalladas del chip. (Semtech, 2021).

Tabla 14.

Chip LoRa SX1262.

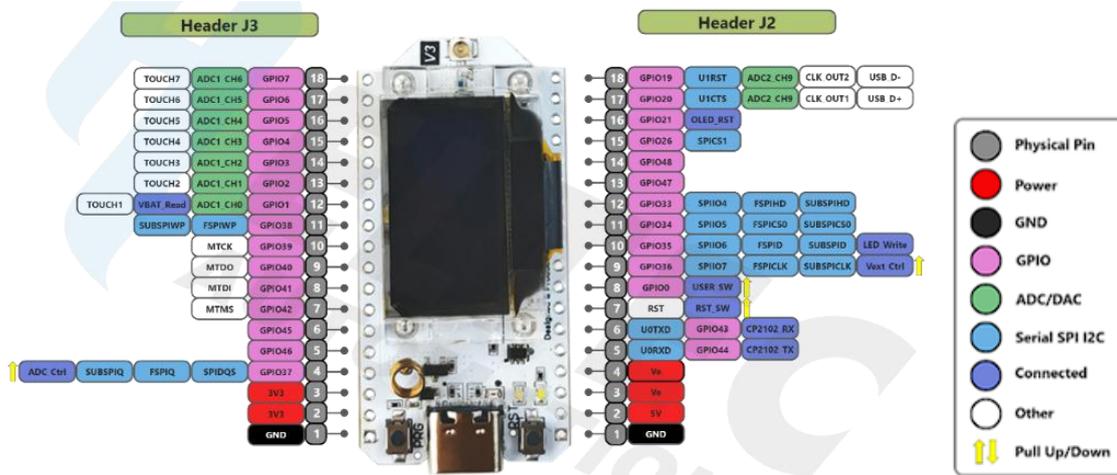
Dato	Información
- Potencia de trabajo.	- +22 dBm.
- Corriente.	- 4,6 mA
- Velocidad de bits programable.	- 62,5 Kbps LoRa y 300 Kbps FSK.
- Modulación.	- FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa y FHSS.
- Sensibilidad.	- -148 dBm.

Nota: En la tabla se pueden observar los diferentes datos técnicos generales del chip LoRa SX1262, Información adaptada de (Semtech, 2021).

En la figura 15 se muestra el esquema general de la distribución de pines de la placa Wifi LoRa 32 V3. Al estar basada en el microcontrolador ESP32, conserva una estructura adaptada a las especificaciones de transmisión de datos de LoRa descritas en las tablas 5 y 6. Este esquema es útil para realizar las conexiones necesarias tanto de sensores como de alimentación del módulo, facilitando así la transferencia de datos posteriormente.

Figura 15.

Wifi LoRa 32 V3 – Asignación de pines.



Nota: En la figura se observa el grafico de cada uno de los pines con los que cuenta la placa Wifi LoRa 32 v3, imagen recuperada de (Heltec, 2022).

3.4.1.2 Elección de sensor de PH.

La elección del sensor de PH se basa en la compatibilidad que este tenga con las librerías que funcionan con la placa LoRa wifi 32 v3, puesto que en este caso al trabajar con un integrado ESP32, es necesario un tipo de librería específico, la comparación entre sensores se visualiza en la Tabla 16.

Tabla 15.

Comparativa de requerimientos de sensor de PH.

Hardware	Requerimientos					Valor
	SRSH2	SRSH7	SRSH11	SRSH14	SRSH15	
- PH-4502	1	1	1	1	1	5
- SEN0169	1	1	0	1	0	3

1: Cumple
0: No cumple

Nota: En la tabla se realiza una comparativa de requerimientos entre 2 sensores de PH seleccionados, con el objetivo de seleccionar la de mayor puntaje, basados en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 (IEEE 29148, 2018).

En la Tabla 16 se visualizan las especificaciones de cada uno de los sensores seleccionados, aquí se observa la diferencia entre el PH-4502 y el SEN0169.

Tabla 16.

Comparación entre PH-4502 y SEN0169.

Dato	PH-4502	SEN0169
- Voltaje.	- 5V.	- 5.5V
- Corriente.	- 5 a 10 mA	- x
- Temperatura de operación.	- -10 a 50 °C.	- 0 a 60 °C
- Peso.	- 25g.	- x
- Conexión de sonda.	- BNC.	- BCN
- Rango de medición	- 0 a 14 pH	- 0 a 14 pH
- Precisión	- +- 0,1 pH	- +- 0,1 pH
- Tamaño de modulo PH-4502	- 43mm x 32mm	- 42 x 32mm

Nota: En la tabla se observa la información técnica comparativa entre el sensor PH-4502 y el sensor SEN0169, información recuperada de (Sawers, 2022).

Para llevar a cabo el censado de variables ambientales del agua, se utiliza el sensor pH-4502 (ver figura 16), que permite medir valores de pH desde 0 hasta 14 mediante una sonda de electrodo (E201). Esta sonda se conecta al pH-4502 a través de un conector BCN. Gracias al módulo LoRa 32 V3, que incluye una integración con ESP32, es posible utilizar la plataforma Arduino para la programación necesaria. Los datos técnicos del sensor pH se presentan en la Tabla 16.

Figura 16.

Kit sensor pH-4502.



Nota: En la figura se observa el kit sensor pH-4502 el cual contiene el módulo de conexión y la sonda electrodo E201, imagen recupera de (UNIT Electronics, 2024).

3.4.1.3 Elección de sensor de turbidez.

Otro de los dispositivos de toma de datos que se utilizarán es el sensor de turbidez de agua, para su elección se toma en cuenta la compatibilidad de librerías con el módulo LoRa wifi 32 v3, ver tabla 17.

Tabla 17.

Comparativa de requerimientos de sensor de turbidez.

Hardware	Requerimientos					Valor
	SRSH2	SRSH7	SRSH12	SRSH14	SRSH15	
- KS0414	1	1	1	1	1	5
- CUS52D	0	1	0	1	0	2

1: Cumple
0: No cumple

Nota: En la tabla se realiza una comparativa de requerimientos entre 2 sensores de turbidez seleccionados, con el objetivo de seleccionar la de mayor puntaje, basados en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 (IEEE 29148, 2018).

Las características de cada uno de los sensores de turbidez seleccionados se pueden visualizar en la Tabla 18.

Tabla 18.

Sensor de turbidez de agua KS0414 y CUS52D.

Dato	KS0414	CUS52D
- Voltaje.	- 5V.	- Conexión M12
- Corriente.	- 40 mA	- x
- Temperatura de operación.	- -5 a 90 °C.	- -20 a 85 °C.
- Peso.	- 30g.	- x
- Tamaño de modulo PH-4502	- 38mm x 28mm	- 320 x 40 mm

Nota: En la tabla se observa la información técnica de los sensores de turbidez de agua KS0414 y CUS52D, información recuperada de (DFRobot, 2024).

Este sensor permite detectar la calidad del agua mediante la medición de sus niveles de opacidad. Para ello, utiliza luz para identificar partículas suspendidas en el agua y, posteriormente, mide la tasa de dispersión de esta luz, se puede apreciar en la Figura 17.

Figura 17.

Sensor de turbidez de agua KS0414.



Nota: En la figura se observa el sensor de turbidez de agua KS0414, imagen recuperada de (DFRobot, 2024).

3.4.2 Elección de Software.

En este apartado se realiza la elección del lenguaje de programación, así como el entorno de trabajo que dará la posibilidad de establecer todos los parámetros necesarios para el funcionamiento el sistema, en este caso la elección del software está basada en la compatibilidad de librerías y utilidades para el módulo LoRa Wifi 32 V3, así como sus respectivos sensores. Este se selecciona de acuerdo con los requerimientos planteados en la sección [3.3](#), ver la Tabla 19.

Tabla 19.

Comparativa de requerimientos de software de desarrollo.

Software	Requerimientos				Valor
	SRSH1	SRSH2	SRSH3	SRSH4	
- ARDUINO IDE	1	1	1	1	5
- PYTHON	1	0	1	0	2

1: Cumple
0: No cumple

Nota: En la tabla se realiza una comparativa de requerimientos entre 2 opciones de desarrollo para la programación de las placas LoRa wifi 32 V3, con el objetivo de seleccionar la de mayor puntaje, basados en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 (IEEE 29148, 2018).

Dada la tabla anterior, el entorno de desarrollo seleccionado es Arduino IDE, ya que es compatible con el ESP32, uno de los módulos integrados en la placa LoRa Wifi 32 V3. Esto permite la interacción con los sensores a través de la conexión a los pines del propio módulo, además de facilitar el uso de las librerías de Arduino, que proporcionan compatibilidad con cada uno de los sensores seleccionados.

3.5 FASE 2: Diseño del sistema.

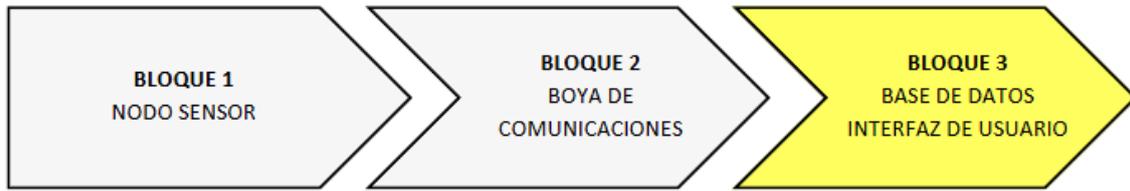
En este apartado se presentan los modelos de cada uno de los dispositivos del sistema, mediante diagramas de bloques que permiten visualizar gráficamente el proceso de comunicación en cada una de las fases del proyecto. Se presentan diagramas de flujo de los diferentes códigos de programación utilizados en las placas Heltec Wifi LoRa 32 V3, tanto para el Nodo Sensor como para la Boya de Comunicaciones. También se establece un diagrama de secuencia que permite entender el proceso general de todo el sistema. Se finaliza con la representación de la arquitectura de cada uno de los dispositivos (Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones) así como del sistema completos.

3.5.1 Diagrama de bloques del sistema.

Para el inicio del diseño planteado se presenta una visualización simple y estructurada de cómo funciona el sistema planteado, para ellos se hace uso de diagramas de bloques que muestran las partes más importantes del sistema distribuidas en bloques de funcionamiento en un proceso general que ocurre desde que el sensor captura una variable ambiental bajo el agua hasta que esta se muestra en la interfaz de usuario, para esto se generan 3 diagramas, entre los cuales se establece un diagrama general que abarca todas las fases del sistema, el cual se puede visualizar en la Figura 18, un diagrama de bloques para el Nodo Sensor (ver figura 19) y un tercer diagrama para la Boya de Comunicaciones (ver figura 20).

Figura 18.

Diagrama de bloques del sistema.



Nota: En la figura se visualiza el diagrama de bloques general, demostrando las 3 fases en las que se divide el sistema.

El sistema se compone de 3 bloques que integran su funcionamiento, se inicia en el Bloque 1 (Nodo Sensor) el cual representa al sistema que se encuentra sumergido en el agua, quien se encarga de la captura de datos desde los sensores y posterior envío hacia el Bloque 2 (Boya de Comunicaciones) mediante la comunicación LoRa. Una vez que la Boya captura estos datos provenientes desde el Nodo Sensor, se utilizara la comunicación Wifi en la banda 2.4 GHz para la conexión hacia la base de datos Firebase, la cual comprende el Bloque 3, donde se almacenan los datos y son posteriormente visualizados en una interfaz de usuario (página web). Los bloques se estructuran de la siguiente forma:

- 1. Bloque 1 (Nodo Sensor):** En este bloque se lleva a cabo la captura de datos a través de los sensores instalados en el Nodo Sensor, los cuales están en contacto con el agua y miden variables ambientales como el pH y la turbidez. El proceso incluye la recopilación de los datos proporcionados por los sensores y su posterior envío a través de la banda ISM de 915 MHz mediante el módulo LoRa (ver figura 19). Para una mejor comprensión del funcionamiento de este bloque, se presenta un desglose detallado en la sección [3.5.1.1](#).
- 2. Bloque 2 (Boya de Comunicaciones):** En este bloque se gestionan los procesos de recepción de datos provenientes del Nodo Sensor a través de la comunicación LoRa, así como el procesamiento de la información recolectada para su posterior

envío al bloque de Comunicación Wifi (ver figura 20). La estructura completa de este bloque se detalla en la sección [3.5.1.2](#).

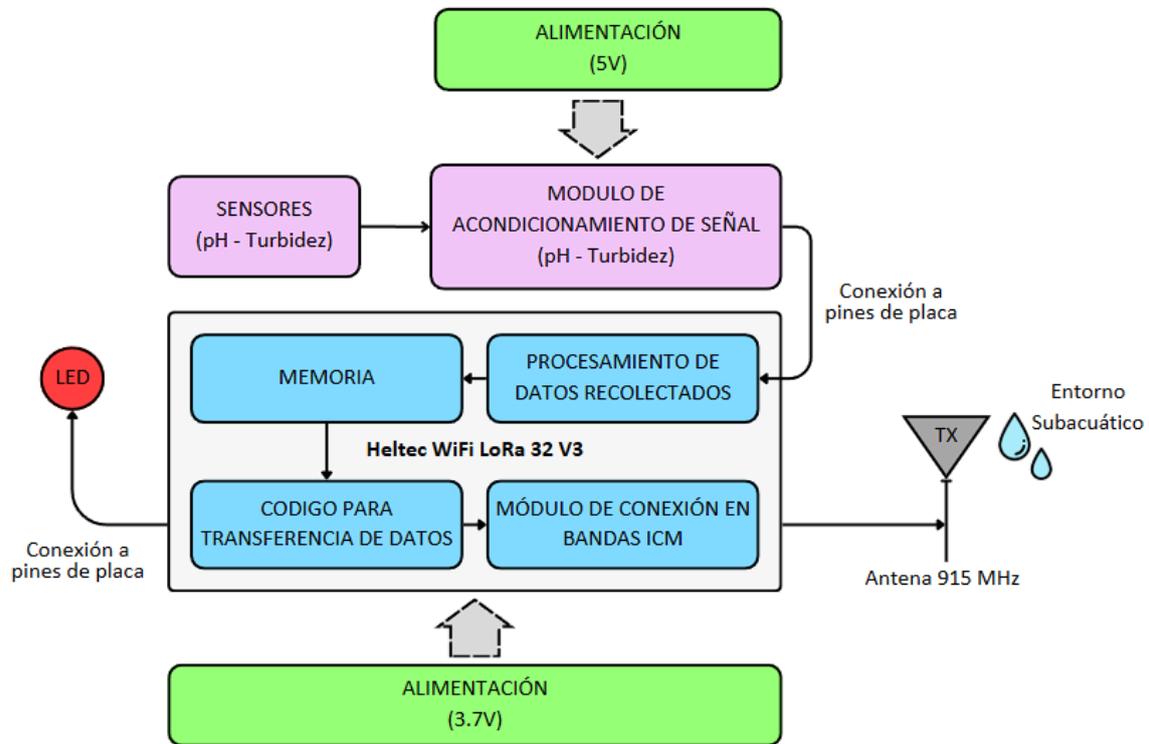
- 3. Bloque 3 (Base de datos e Interfaz de Usuario):** En este bloque, los datos recolectados en el Bloque 2 se envían a Firebase, estableciendo el proceso de almacenamiento de la información proveniente de la Boya de Comunicaciones. Este bloque permite tanto la visualización en tiempo real como el almacenamiento histórico de los datos en la base de datos. Posteriormente, se emplea el protocolo WebSocket para la lectura de datos en tiempo real, proporcionando una interfaz web desarrollada en HTML, JavaScript y CSS. Además, el usuario puede visualizar el comportamiento de los datos a través de gráficos.

3.5.1.1 Diagrama de Bloques de Nodo Sensor.

El Nodo Sensor es una parte fundamental del sistema, puesto que este es el que debe estar sumergido en el agua, realizando la recolección de los datos (variables ambientales) y generando el posterior envío de estos hacia la Boya de Comunicaciones en la superficie del agua por medio de comunicación LoRa. En el diagrama de bloques que se puede visualizar en la figura 19, tenemos el funcionamiento bloque a bloque de las diferentes etapas que comprenden al Nodo Sensor para su respectivo funcionamiento. bloques:

Figura 19.

Diagrama de bloques de Nodo Sensor.



Nota: En la figura se visualiza el diagrama de bloques que demuestra el funcionamiento de las diferentes fases por las que atraviesa el sistema del Nodo Sensor.

Como se puede visualizar en la figura 19, todos los bloques trabajan en sincronía para llegar a un objetivo en común, el cual es la recolección de un dato y su posterior envío por comunicación LoRa. Cada uno de los bloques que componen al Nodo Sensor se explican en la siguiente lista:

- 1. Bloque de Sensores (pH - Turbidez):** Este es el bloque encargado de la captura de variables ambientales, aquí es donde el sistema del Nodo Sensor entra en contacto con el agua para obtener los datos que capturan cada una de sus sondas.
- 2. Bloque de Modulo de Acondicionamiento de Señal:** Este demuestra que el dato capturado por el Bloque de Sensores se traslada por medio de una conexión alámbrica (conexión por pines para Turbidez y conexión BNC para pH). Representa cada uno de los acondicionadores de señal que hacen de

intermediarios permitiendo adaptar la señal que viene desde las sondas para que esta pueda ser correctamente interpretada por la placa.

3. **Bloque de Alimentación (5V):** Este bloque es enteramente utilizado por el Bloque de Modulo de Acondicionamiento de Señal, ya que representa la alimentación de voltaje que utilizan estos módulos tanto de pH como de Turbidez.
4. **Bloque Heltec Wifi LoRa 32 V3:** Este representa a la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, la cual es la encargada de recepción, interpretación, procesamiento y envío de los datos recolectados.
5. **Bloque de Procesamiento de Datos Recolectados:** Este bloque representa la toma de los datos que vienen desde los sensores para realizar su interpretación y después pasarlos hacia el bloque de memoria.
6. **Bloque de Memoria:** Aquí se realiza el almacenamiento de los datos recolectados en diferentes variables de memoria (SRAM) para ser utilizados posteriormente.
7. **Bloque de Código Para Transferencia de Datos:** En este bloque, se estructura una cadena de texto que integra todos los datos almacenados en memoria, correspondientes a los valores recolectados. El objetivo es generar un único mensaje para su posterior envío al Bloque del Módulo de Conexión en Bandas ISM.
8. **Bloque de Modulo de Conexión en Bandas ISM:** En este bloque se configuran los parámetros de transmisión LoRa, como la frecuencia, el ancho de banda, la potencia, el spreading factor, la tasa de codificación (coding rate), el preámbulo, entre otros (ver sección [3.5.4](#)). Su función es establecer las configuraciones necesarias para la transmisión inalámbrica de datos.
9. **Bloque Alimentación 3.7V:** Este bloque representa de forma exclusiva la alimentación de la placa Heltec LoRa Wifi 32 V3, en este caso se hace uso 3.7V

para su funcionamiento, debido a las especificaciones de la placa que se visualizan en la Tabla 13.

10. Bloque Tx: Este bloque representa la antena física que se encuentra en contacto con el agua y por donde se realiza el envío de los datos estructurados en el Bloque de Código Para Transferencia de Datos.

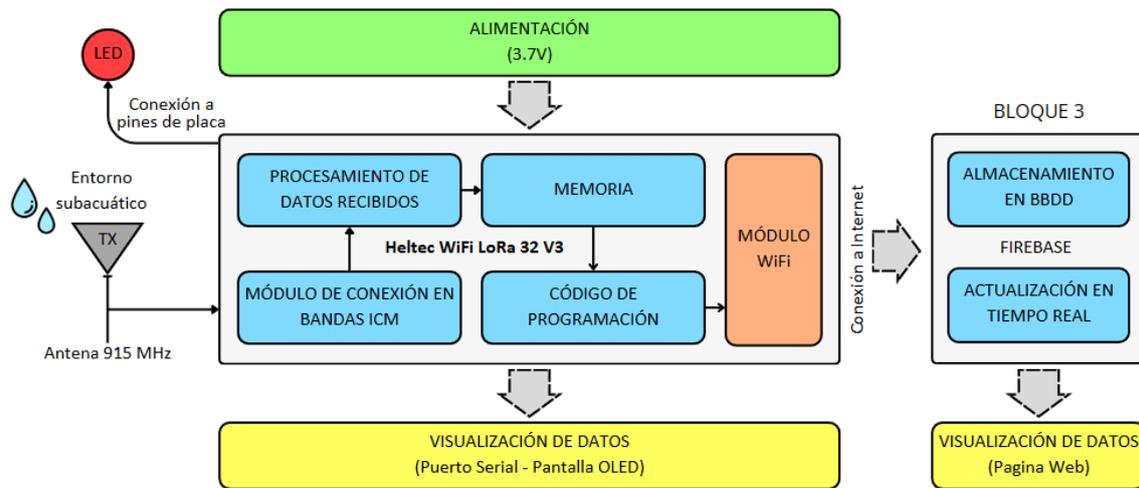
11. Bloque LED: Este bloque está conectado de forma alámbrica hacia la placa Heltec LoRa Wifi 32 V3 y su función es indicar que un mensaje ha sido enviado por el Bloque Tx.

3.5.1.2 Diagrama de Bloques de Boya de Comunicaciones y Base de Datos.

La Boya de Comunicaciones, junto con el Nodo Sensor, constituye el núcleo del sistema. En este caso, la Boya de Comunicaciones es responsable de recibir los datos enviados desde el Nodo Sensor a través de la comunicación LoRa. Una vez capturados, la boya también establece una conexión a Internet mediante una red Wifi independiente, permitiendo transferir los datos recopilados por LoRa hacia una base de datos en Firebase para posteriormente ser visualizados en una interfaz de usuario. El diagrama de bloques mostrado en la Figura 20 representa las diferentes etapas del sistema, detallando el funcionamiento de la Boya de Comunicaciones en cada uno de sus procesos y la conexión hacia la Bas de Datos.

Figura 20.

Diagrama de Bloques de Boya de Comunicaciones y Bas de Datos.



Nota: En la figura se visualiza el diagrama de bloques que demuestra el funcionamiento de las diferentes fases por las que atraviesa el sistema de la Boya de Comunicaciones y su posterior envío de información a Firebase.

Como se observa en la Figura 20, cada bloque representa un conjunto de funciones que interactúan entre sí para cumplir un objetivo: recibir una cadena de texto con los datos enviados desde el Nodo Sensor y almacenarlos en una base de datos para su posterior visualización. A continuación, se describe cada uno de los bloques que conforman la Boya de Comunicaciones y la Base de datos e Interfaz de Usuario:

- **Boya de Comunicaciones.**

1. **Bloque Alimentación 3.3V:** Este bloque representa de forma exclusiva la alimentación de la placa Heltec LoRa Wifi 32 V3, en este caso se hace uso 3.3V para su funcionamiento, debido a las especificaciones de la placa que se visualizan en la Tabla 13.
2. **Bloque Heltec Wifi LoRa 32 V3:** Este representa a la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, la cual para este caso es la encargada de recepción, interpretación y envío de datos para la visualización final del usuario.

3. **Bloque Rx:** Este bloque representa la antena física que se encuentra en contacto con el agua, se encarga de la captura de datos mediante la conexión LoRa, posteriormente se envía hacia el bloque de conexión en bandas ISM.
4. **Bloque de Modulo de Conexión en Bandas ISM:** En este bloque se configuran los parámetros de recepción LoRa los cuales se deben establecer de acuerdo con los especificados en la sección [3.5.4](#). Su función es establecer las configuraciones necesarias para la recibir los datos enviados desde el Nodo Sensor.
5. **Bloque de Procesamiento de Datos:** En este bloque se realiza una toma de los datos que provienen desde el Bloque de Módulo de Conexión en Bandas ISM, aquí se realizar la interpretación y posteriormente envío de dichos datos (cadena de texto) ya procesados hacia el Bloque de Memoria.
6. **Bloque de Memoria:** Aquí se realiza el almacenamiento de la cadena de texto proveniente del Bloque de Procesamiento de Datos en una variable de memoria (SRAM) para ser utilizada posteriormente.
7. **Bloque de Código de Programación:** En este bloque se toma la cadena de texto almacenada en memoria y se discriminan todos los datos para ser separados en diferentes variables, Una vez que se obtiene estos datos por separado, se hace un envío hacia el Bloque de Visualización de Datos y de igual forma se envía hacia el Bloque de Modulo Wifi.
8. **Bloque LED:** Este bloque está conectado de forma alámbrica hacia la placa Heltec LoRa Wifi 32 V3 y su función es indicar cada que un mensaje ha sido recibido por el Bloque Rx.
9. **Bloque de Visualización de Datos (Serial, OLED):** Aquí se muestran los datos recibidos. Para ello, se utiliza el puerto serial para imprimir configuraciones y la pantalla OLED integrada en la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, permitiendo la

primera forma de visualización de usuario final en la Boya de Comunicaciones sin necesidad de conexión serial.

10. Bloque de Modulo Wifi: Este bloque incluye todas las configuraciones necesarias para que la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3 se conecte a una red Wifi independiente. Aquí se establece una conexión continua desde la Boya de Comunicaciones hacia Internet, con el propósito de transmitir los datos provenientes del Bloque Código de Programación hacia el Bloque Firebase.

- **Base de datos e Interfaz de Usuario.**

11. Bloque Firebase: Este es un bloque externo a la Boya de Comunicaciones, pero se integra en el sistema, ya que representa el almacenamiento los datos provenientes de la boya. Este bloque maneja dos versiones de datos: un historial, que se actualiza a medida que los datos llegan a Firebase, y una actualización en tiempo real de las variables del sistema.

12. Bloque de Almacenamiento en BDD: Este bloque gestiona el almacenamiento secuencial de los datos actualizados en Firebase, creando un historial de todas las actualizaciones registradas de manera consecutiva.

13. Bloque de Actualización en Tiempo Real: Este bloque se encarga de la actualización de datos en tiempo real, ya que Firebase permite reemplazar el dato almacenado por el más reciente. Esto es posible gracias a la funcionalidad de Realtime Database.

14. Bloque de Visualización de Datos (Pagina Web): Este es el último bloque, donde se representa la interfaz final del usuario. En este proceso, los datos se obtienen desde Firebase mediante WebSocket y se presentan en una página web en HTML, permitiendo la visualización tanto de los datos en tiempo real como de gráficos que muestran su comportamiento.

3.5.2 Diagramas de flujo y de secuencia.

En este apartado se presentan los diagramas correspondientes a cada uno de los bloques que conforman el sistema. Específicamente, se incluyen los diagramas de flujo que representan el proceso seguido por el código de programación para el funcionamiento del sistema, con un enfoque en los módulos Heltec Wifi LoRa 32 V3, presentes tanto en el Nodo Sensor como en la Boya de Comunicaciones, el proceso de los diagramas de flujo se aprecia en las Figura 21 a 24.

Asimismo, se presenta un diagrama de secuencia que ilustra el proceso completo del sistema, desde la captura de datos de las variables ambientales por parte de los sensores hasta su visualización en la interfaz de usuario. Todo este procedimiento se expresa en función de la secuencia de operaciones que garantizan el correcto funcionamiento del sistema, el proceso del diagrama de secuencia se visualiza en la Figura 25.

3.5.2.1 Diagrama de Flujo de Nodo Sensor.

El diagrama de flujo presentado en la Figura 21 representa la programación utilizada en un módulo Heltec LoRa Wifi 32 V3 para el Nodo Sensor. El proceso comienza con la configuración inicial del sistema, donde se establecen los parámetros de comunicación, como la frecuencia de operación (915 MHz), la potencia de transmisión, el ancho de banda, el factor de propagación, la tasa de codificación y la longitud del preámbulo de LoRa. Estos parámetros se detallan en la sección [3.5.4](#).

Asimismo, se asignan los pines del ESP32 para el control del LED y la lectura de los sensores de pH y turbidez. También se declaran variables esenciales para el funcionamiento del sistema, incluyendo el número de transmisiones, el estado del módulo LoRa y el contador de paquetes. Tras completar esta configuración, se inicializa el

microcontrolador Heltec ESP32 LoRa, definiendo los eventos de transmisión, como `OnTxDone()` y `OnTxTimeout()`.

A continuación, el módulo LoRa se inicializa con los parámetros de comunicación previamente configurados. Se define el pin 5 como salida (Output) y, tras un retraso de 500 ms, el LED se apaga. Luego, el sistema verifica si el módulo LoRa está disponible para la transmisión de datos. Si el módulo está ocupado, se genera una interrupción con `OnTxTimeout()`, se libera el recurso y se repite la comprobación. Una vez que el módulo está disponible, se introduce un retraso de 2500 ms para compensar el tiempo de lectura del paquete en el receptor antes de enviar uno nuevo.

En este punto, los datos de los sensores se reciben y almacenan en variables. Además, se inicia un contador de paquetes, el cual incrementa en uno con cada transmisión hasta alcanzar 100, momento en el que se reinicia a 0. Posteriormente, se construye una cadena de texto que agrupa los datos recopilados en un solo paquete, el cual se almacena en la variable `txpacket`.

Una vez preparado el paquete, se determina su longitud y se envía a través del módulo LoRa utilizando la función `Radio.send()`. Durante este proceso, el módulo LoRa se marca como ocupado para evitar interferencias con otras operaciones. Tras la transmisión, el sistema verifica si el envío fue exitoso.

Si la transmisión se completa correctamente, se activa la función `OnTxDone()`, encargada de gestionar las interrupciones y encender el LED como indicador de éxito. El proceso continúa en la Figura 22, donde el paquete enviado es recibido.

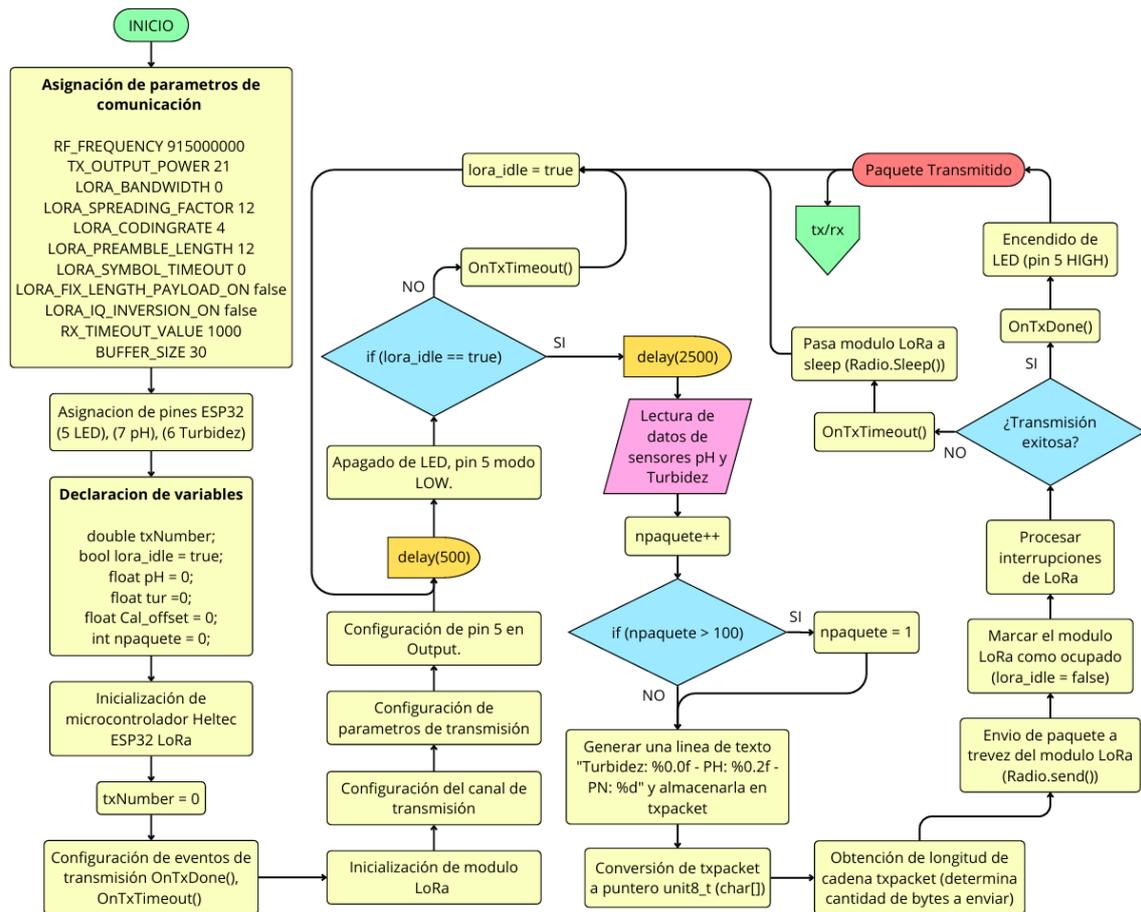
Si la transmisión falla y ocurre un timeout, se ejecuta la función `OnTxTimeout()`, poniendo el módulo en modo sleep para ahorro de energía. Luego, el sistema reintenta el envío de un nuevo paquete.

Este diagrama de flujo ilustra un ciclo eficiente de adquisición y transmisión de datos, asegurando que la información de los sensores se envíe de manera confiable a través de LoRa. Además, el sistema implementa mecanismos de optimización energética y una correcta gestión de intentos fallidos, garantizando un funcionamiento continuo y estable.

El diagrama es un ciclo constante de envío de paquetes, pero se establece una finalización del mismo cuando el paquete ha sido transmitido, por ende se genera un conector externo denominado (tx/rx) el cual se utiliza como referencia en la Figura 23 para visualizar en qué momento el paquete es capturado por el receptor.

Figura 21.

Diagrama de flujo de código para Nodo Sensor.



Nota: En la figura se visualiza el diagrama de flujo que demuestra las etapas de Código que se utilizan en la placa Heltec LoRa Wifi 32 V3 para el Nodo Sensor.

3.5.2.2 Diagrama de Flujo de Boya de Comunicaciones.

La Figura 22 muestra el diagrama de flujo de la programación de la placa Heltec LoRa Wifi 32 V3, utilizada en la Boya de Comunicaciones. Este diagrama incluye el uso de los módulos de comunicación LoRa y Wifi, el envío de datos a Firebase y la sincronización con un servidor NTP para obtener la hora.

El proceso inicia con la configuración de los parámetros de comunicación LoRa, estableciendo la frecuencia de operación (915 MHz), la potencia de transmisión, el ancho de banda, el factor de propagación y otros parámetros esenciales para la transmisión y recepción de datos, los cuales se detallan en la sección [3.5.4](#). Luego, se asignan los pines del ESP32, definiendo el pin 5 para el control del LED. Posteriormente, se configuran los parámetros de conexión Wifi, estableciendo el SSID y la contraseña de la red a la que se conectará el módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3. Luego de esto se establecen las credenciales para la autenticación en Firebase, especificando el host y la clave de autenticación. También se configura el servidor NTP para la sincronización horaria y se declaran las variables necesarias para el proceso, incluyendo cadenas de texto para almacenar datos como rxPacket, turbidez, pH y hora, además de variables numéricas para mediciones y control.

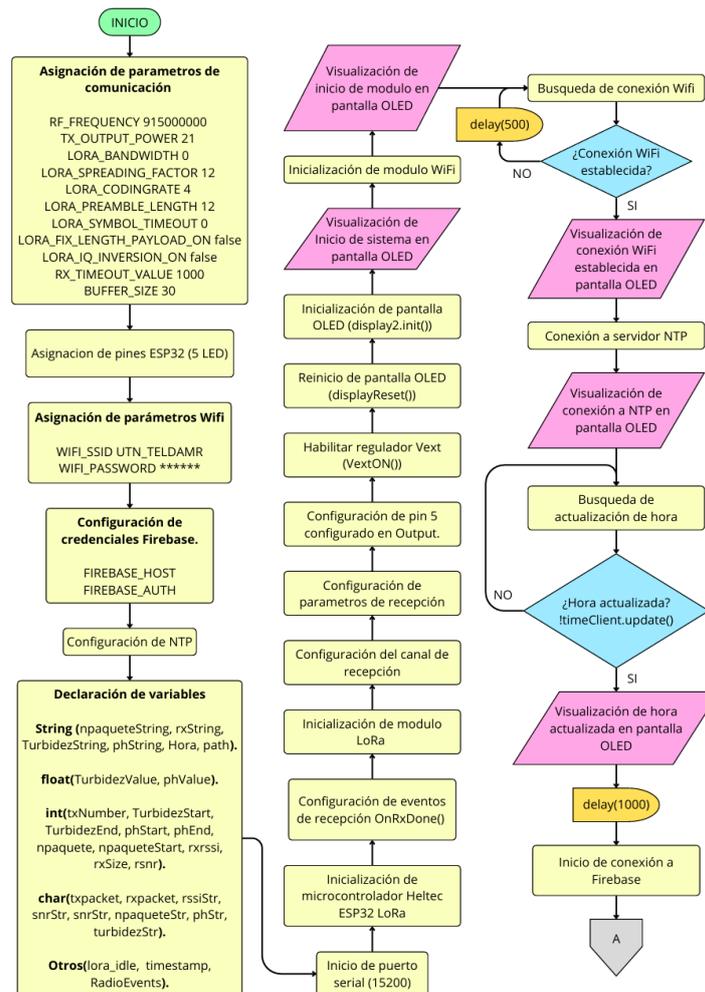
El siguiente paso en el flujo es la inicialización del puerto serial y de los módulos de hardware y de la comunicación LoRa. Luego, se establecen los eventos para la recepción de datos mediante la función OnRxDone(). Posteriormente, se configura el canal de recepción con los parámetros previamente definidos, se asigna el pin 5 como salida (Output) para el control del LED indicador y se habilita el regulador Vext, encargado del suministro de energía para ciertos periféricos del ESP32. Finalmente, se reinicia la pantalla OLED, indicando la inicialización del sistema y se inicia el módulo Wifi mostrando un mensaje en la pantalla.

A continuación, se realiza la búsqueda de conexión Wifi. Si la conexión falla, se genera un retraso de 500 ms antes de reintentarlo. En caso de éxito, el estado de la conexión se muestra en la pantalla OLED y se establece la comunicación con el servidor NTP para obtener la hora. Si la sincronización horaria es exitosa, se indica esto en la pantalla OLED; de lo contrario, el proceso se repite hasta lograr la actualización.

Finalmente, el sistema introduce un retraso de 1 segundos antes de proceder con la conexión a Firebase, iniciando la transmisión en tiempo real de datos como pH, turbidez, RSSI, SNR, número de paquete y timestamp. El diagrama en la Figura 22 muestra la continuidad del proceso, cuya siguiente etapa se detalla en la Figura 23.

Figura 22.

Diagrama de flujo de código para Boya de Comunicaciones – Diagrama A.



Nota: En la figura se visualiza el diagrama de flujo que demuestra las etapas de código que se utilizan en la placa Heltec LoRa Wifi 32 V3 para la Boya de Comunicaciones – Diagrama A.

El proceso continuo en la Figura 23, aquí se inicia con la autenticación del ESP32 en Firebase. Si la conexión falla, se muestra un mensaje de error en la consola serial, lo que indica que el dispositivo no pudo establecer comunicación con la base de datos en la nube y se vuelve a intentar. En caso de éxito, se muestra un mensaje en la pantalla OLED confirmando la conexión exitosa. Luego se genera un delay de 1 segundos antes de pasar el sistema a modo de recepción de datos a través del módulo LoRa y se imprime en pantalla esta información, luego de un delay de 1 segundo se realiza una comprobación del módulo LoRa.

Cuando el módulo LoRa se encuentra ocupado, se activa una interrupción mediante la función `Radio.IrqProcess()` y se repite el proceso hasta que el módulo LoRa este libre. Si el módulo está libre, la variable `lora_idle` se marca como falsa, y se imprime en la consola serial que el dispositivo ha entrado en modo de escucha `Radio.Rx(0)`. Posteriormente, se envía una señal baja hacia el pin 5 que controla el LED para que este sea apagado.

Cuando se reciben datos, se ejecuta una función denominada `OnRxDone()`, estableciendo que el módulo LoRa ha recibido datos, estos se separan en distintas variables, como `TurbidezValue`, `phValue` y `npaquete`, permitiendo su almacenamiento y posterior análisis. Además, se guardan parámetros de señal, como `rss` y `rsnr`, que representan la potencia y la relación señal/ruido. Luego, el módulo LoRa entra en modo "sleep" para optimizar el consumo energético mientras se procesan los datos y seguidamente se libera el módulo LoRa.

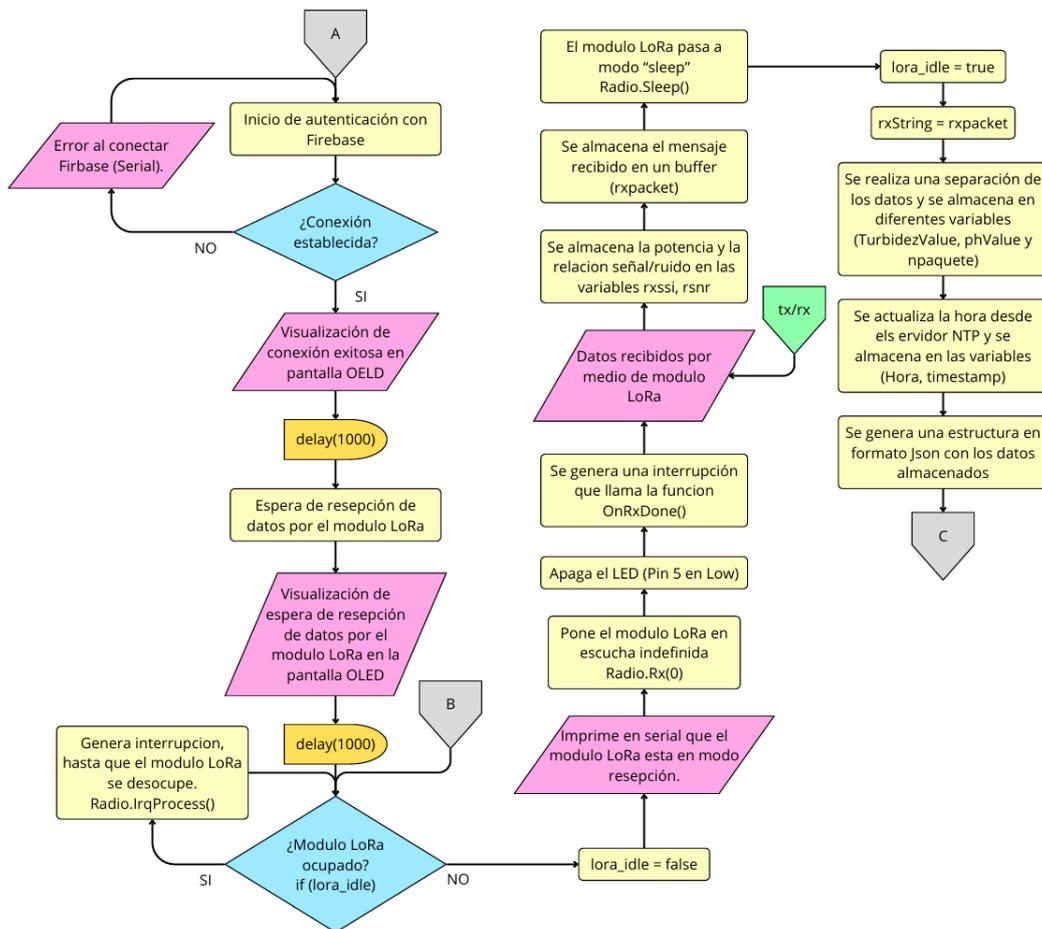
Los datos que se reciben se almacenan directamente en el buffer que para este caso es una variable `rxpacket`, y este se pasa a modo String mediante la variable `rxString`,

los datos que vienen dados en una cadena de texto, se separan y se almacenan en diferentes variables establecidas para cada uno de ellos, obteniendo los valores específicos de cada dato en su respectiva variable. Luego de esto se actualiza la Hora desde el servidor NTP y se almacena en una variable para obtener un timestamp de la llegada del paquete, este se actualiza en la llegada de cada uno de los paquetes.

Por último se genera una estructura JSON con todos los datos del paquete, agregando los ya mencionados parámetros de conexión para ser enviada hacia Firebase con el objetivo de almacenar y actualizar los datos en tiempo real, al final del diagrama de la Figura 23 se establece un conector C, el cual continua su proceso de conexión hacia Firebase en el diagrama de la Figura 24.

Figura 23.

Diagrama de flujo de la Boya de Comunicaciones – Diagrama B.



Nota: En la figura se visualiza el diagrama de flujo que demuestra las etapas de código que se utilizan en la placa Heltec LoRa Wifi 32 V3 para la Boya de Comunicaciones – Diagrama B.

Para enviar la información a Firebase, se genera una estructura en formato JSON con los datos almacenados y, posteriormente, se realiza el envío mediante la conexión Wifi previamente establecida. Si el envío de datos falla, se registra un error en la consola serial. Por otro lado, si el envío es exitoso, se confirma tanto en la consola serial como en la pantalla OLED.

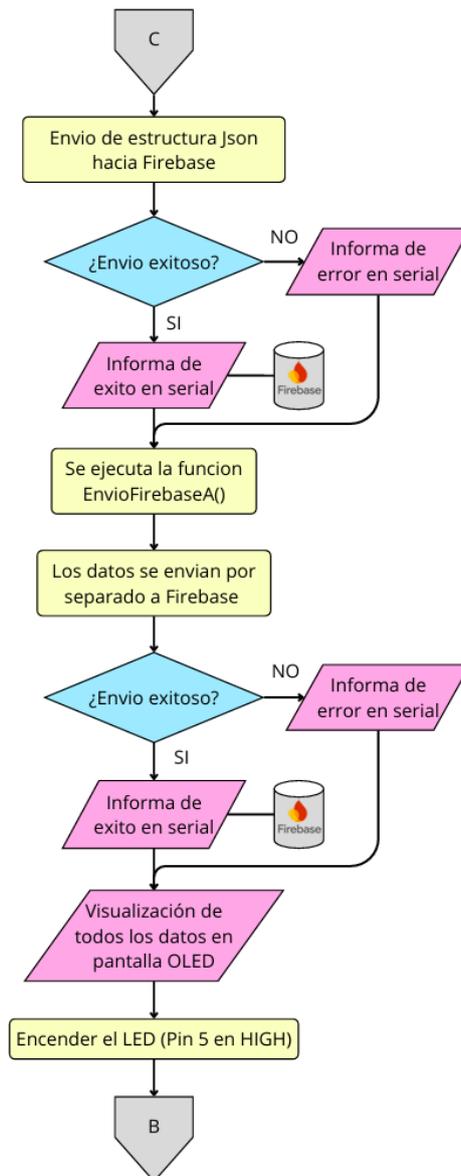
Luego, se ejecuta la función `EnvioFirebaseAQ()`, la cual permite el envío individual de datos con el propósito de actualizar variables en Firebase y visualizarlas en tiempo real. De igual manera, si el envío falla, se registra un error en la consola serial, mientras que, si es exitoso, la confirmación se muestra tanto en la consola serial como en la pantalla OLED.

Al finalizar el proceso de envío, se enciende un LED en el pin 5 como indicación visual de recepción de datos, permitiendo al usuario tener una referencia clara del estado del sistema.

El diagrama incluye un conector externo al final, que permite retornar el proceso a la Figura 23, donde el módulo LoRa vuelve al modo de escucha indefinida con `Radio.Rx(0)`, preparándose para recibir nuevos paquetes de datos.

Figura 24.

Diagrama de flujo de la Boya de Comunicaciones – Diagrama C.



Nota: En la figura se visualiza el diagrama de flujo que demuestra las etapas de código que se utilizan en la placa Heltec LoRa Wifi 32 V3 para el envío de datos desde la Boya de Comunicaciones hacia Firebase – Diagrama C.

3.5.2.3 Diagrama de Secuencia del Sistema.

El diagrama de secuencia mostrado en la Figura 25 ilustra el proceso completo de funcionamiento del sistema, evidenciando cómo interactúan sus componentes para cumplir el objetivo de monitoreo de variables ambientales mediante la comunicación LoRa.

Como primer paso, el sistema se inicia tanto en el Nodo Sensor como en la Boya de Comunicaciones. En esta etapa, se configuran los parámetros de comunicación, se enciende el hardware y se ejecutan los procesos necesarios para el arranque del sistema.

Una vez iniciado el sistema, el Nodo Sensor procede a la lectura de los datos provenientes de los sensores en contacto con el agua. Estos datos, recolectados por el módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3, se almacenan en la memoria Flash mediante variables, para luego generar un paquete de datos con la estructura indicada en la Figura 32. Dicho paquete contiene toda la información en una cadena de texto.

Antes de transmitir esta cadena de datos, si es la primera vez que se inicia el sistema, este enviará un paquete de comprobación para verificar la disponibilidad del módulo receptor. Si el receptor responde positivamente, el paquete será transmitido. Este proceso de verificación se repetirá cada diez paquetes transmitidos. Luego de una transmisión exitosa, se ejecuta una función que libera el módulo de comunicación LoRa para la siguiente transmisión y se enciende un LED indicador. Finalmente, el Nodo Sensor esperará tres segundos antes de iniciar una nueva transmisión de datos.

En cuanto a la Boya de Comunicaciones, tras la inicialización del sistema, se solicita la conexión a la red Wifi. El módulo intentará conectarse automáticamente cada vez que se inicie. Una vez establecida la conexión, se enviará una petición al servidor NTP para sincronizar la hora actual.

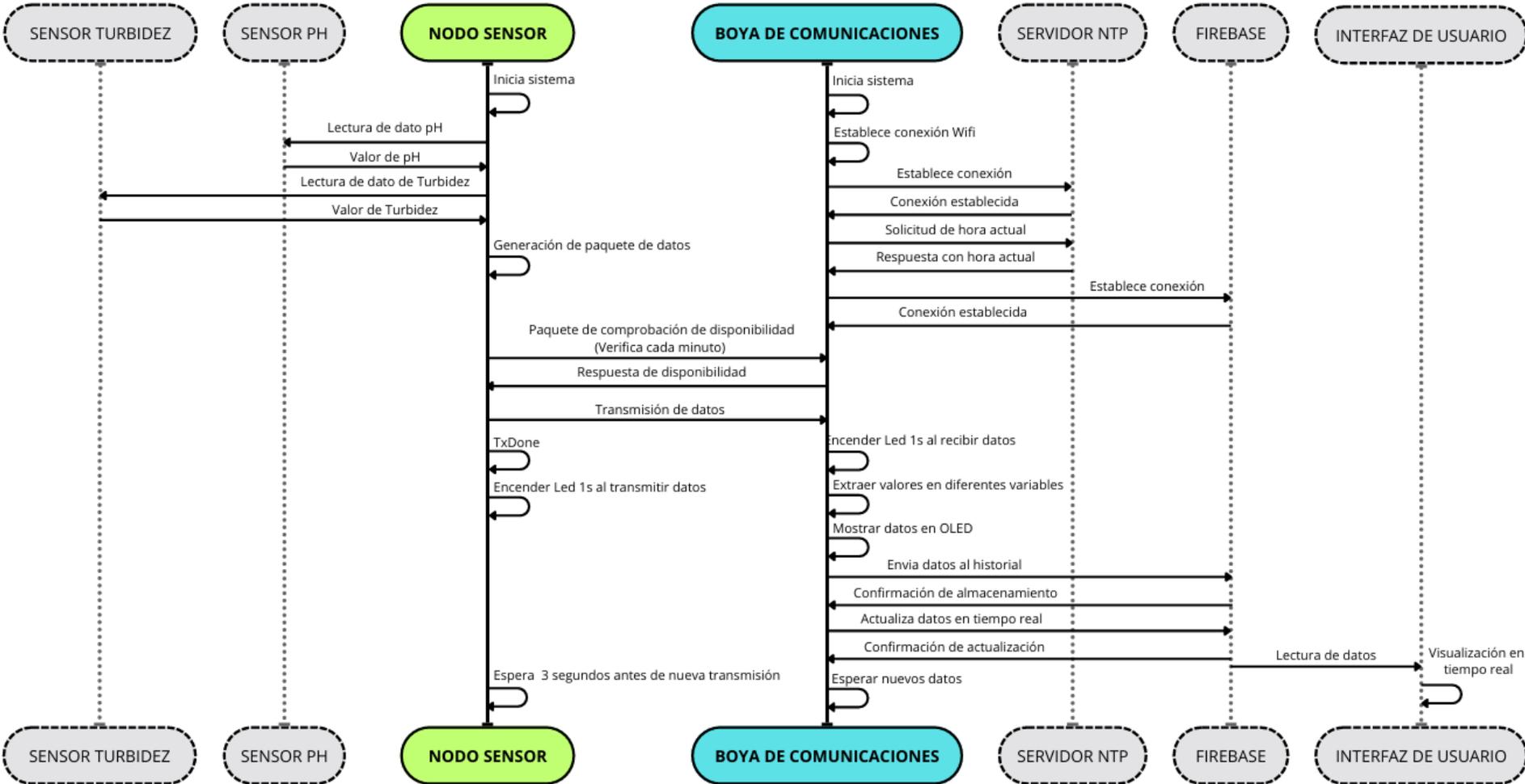
Posteriormente, la Boya de Comunicaciones generará una solicitud de conexión a Firebase. Una vez establecida la conexión, el sistema quedará a la espera de paquetes recibidos a través del módulo LoRa. Cuando un paquete es capturado, el módulo receptor enciende un LED indicador y almacena la cadena de texto en la memoria Flash. Luego, extrae los valores individualmente y los almacena en variables separadas, al mismo tiempo que los muestra en la pantalla OLED.

Finalmente, una vez que los valores han sido organizados en variables separadas, se envían a Firebase tanto para su almacenamiento en el historial de datos como para la actualización en tiempo real. Completado este proceso, el sistema entra en modo de espera para recibir nuevos paquetes.

En cuanto a la Interfaz de Usuario, al estar basada en una página web en HTML, se realiza una petición a Firebase para obtener los datos. Estos se interpretan visualmente a través de gráficos históricos y también se pueden visualizar en tiempo real conforme van llegando desde el sistema.

Figura 25.

Diagrama de secuencia del sistema.



3.5.3 Arquitectura.

Como estructura fundamental del sistema a emplear, este apartado define la base del diseño tanto del Nodo Sensor como de la Boya de Comunicaciones, proporcionando una visión clara de la distribución de los componentes de cada sistema y su integración en el funcionamiento global. Para una mejor comprensión, este apartado se divide en tres secciones principales: [3.5.3.1](#), [3.5.3.2](#) y [3.5.3.3](#). Cada una de estas secciones aborda aspectos específicos de la arquitectura del sistema, permitiendo una visualización detallada de su estructura y operación.

3.5.3.1 Arquitectura del Nodo Sensor.

Teniendo en cuenta el dispositivo de hardware (Heltec Wifi LoRa 32 V3) que se utilizará para la implementación del Nodo Sensor y su Boya de Comunicaciones respectiva, se presenta la arquitectura a través de un diagrama de bloques de la estructura interna. En la Figura 26 se muestra una representación gráfica de los componentes que interactúan entre sí para permitir que el sistema pueda recopilar datos mediante sensores, procesarlos adecuadamente y luego enviarlos mediante comunicación LoRa.

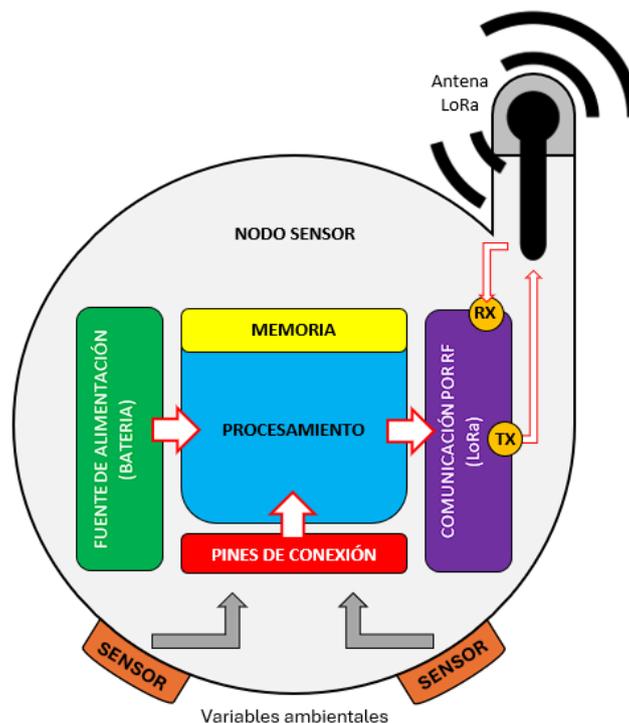
Para este proceso, como paso inicial, se inicia con la implementación de 2 bloques de sensores que permiten recopilar datos ambientales de la laguna del entorno subacuático. Aquí entran en juego los sensores de pH y Turbidez de agua. Una vez que los sensores capturan estos datos, se envían a través de una conexión física a los pines analógicos de la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3 y se almacenan en la memoria Flash de este para la posterior construcción del paquete de datos a ser transmitido. Esta placa debe estar alimentada por una batería que proporcione la energía suficiente para su correcto funcionamiento, dicho consumo de energía se especifica en la Tabla 13 para la placa integrada, en la Tabla 16 para el sensor de turbidez y en la Tabla 18 para el sensor de pH.

Cuando los datos ingresan al módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3, se utilizan un script de programación basado en Arduino (ver sección [3.6.1](#)) para su procesamiento antes de ser enviados al módulo de transmisión LoRa. Este módulo de transmisión utiliza una antena que permite el envío de los datos a través de frecuencias que se basan en EU868, IN865, US915, AU915, AS923, KR920, o redes LPW que operan en los rangos de frecuencia de 863 a 928 MHz y 470 a 510 MHz. Estos detalles se especifican en la Tabla 13.

El proceso descrito anteriormente es llevado a cabo por el Nodo Sensor, encargado de recopilar los datos ambientales en el entorno subacuático. Una vez que estos datos son transmitidos por la antena, el objetivo es enviarlos a otro módulo LoRa ubicado en una boya en la superficie del agua, el cual posee características similares (consultar la sección [3.5.3](#) y la Figura 28 para más detalles).

Figura 26.

Arquitectura de Nodo Sensor.



Nota: En la figura se puede visualizar la arquitectura en la que se basa el dispositivo subacuático para la toma de datos a partir de las variables ambientales en entornos subacuáticos.

3.5.3.2 Arquitectura de Boya de Comunicaciones.

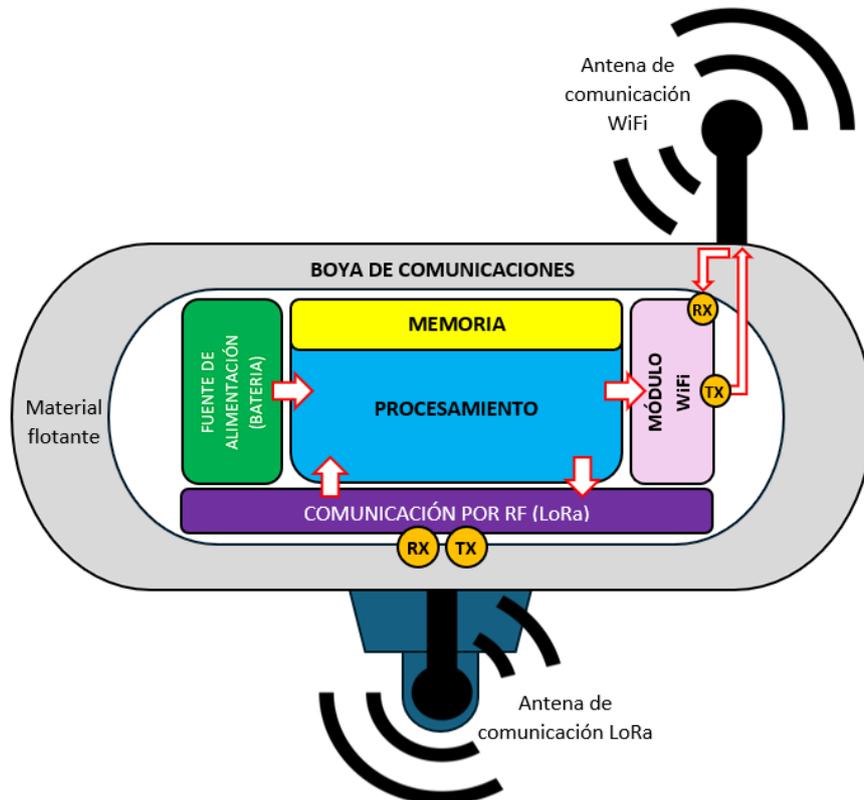
Uno de los elementos esenciales de este trabajo es el equipo de recepción de los datos que provienen del Nodo Sensor. Para ello, en la figura 27 se muestra la arquitectura de una Boya de Comunicaciones que comparte un sistema de bloques similar puesto que se está utilizando el mismo dispositivo Heltec Wifi LoRa 32 V3. En este caso, la distribución cambia en cuanto al posicionamiento de las antenas, ya que se necesita una antena de recepción (Rx) sumergida en la superficie del agua. Esta antena se encarga de captar las ondas electromagnéticas provenientes del Nodo Sensor, las cuales transportan la señal con los datos recolectados por sus sensores.

Al recolectar estas señales, los datos son procesados por el dispositivo a través de un script de programación en Arduino (ver sección [3.6.1](#)) y se almacenan en la memoria Flash, primero como cadena de texto y luego como valores individuales para luego ser trasladados hacia el módulo Wifi con el fin de ser enviados hacia la base de datos de almacenamiento (Firebase).

Como se puede observar en la figura 27, se ha eliminado el bloque de conexión de pines y se ha establecido una conexión directa hacia el bloque de comunicación (RF). Esto se ha hecho de esta manera porque la boya no cuenta con sensores de monitoreo; en cambio, los datos que recibe son capturados a través de su antena, actuando como intermediario entre Firebase y el Nodo Sensor.

Figura 27.

Arquitectura de boya de comunicación.



Nota: En la figura se puede visualizar la arquitectura de la boya de recepción de datos, encargada de la comunicación con el Nodo Sensor.

3.5.3.3 Arquitectura del sistema.

La arquitectura general del sistema se puede observar en la Figura 28, donde se representan todos los elementos que interactúan para lograr la transmisión de datos desde el entorno subacuático hasta la interfaz de usuario. En esta configuración, el Nodo Sensor se encuentra completamente sumergido en el agua, y sus sensores son los encargados de capturar las variables ambientales, como el pH y la turbidez. Posteriormente, se establece una comunicación LoRa en la banda de 915 MHz con la Boya de Comunicaciones, que recibe los datos provenientes de este nodo.

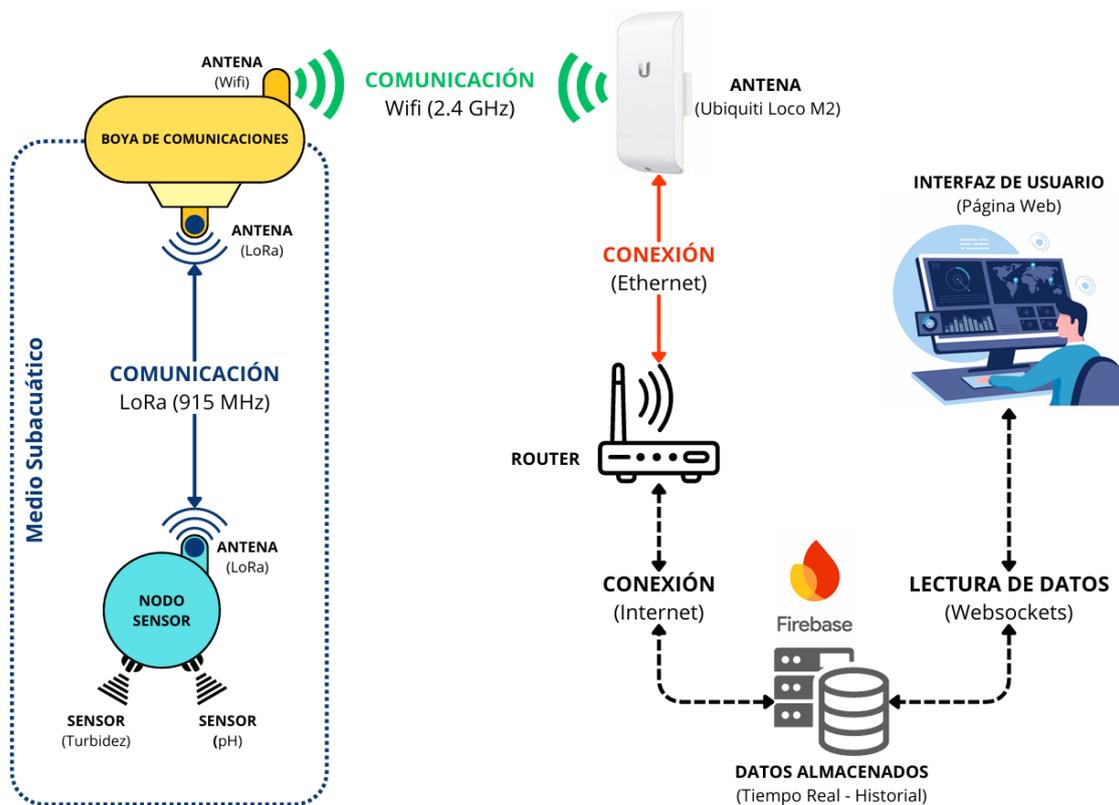
Una vez que los datos llegan a la Boya de Comunicaciones, se utiliza el módulo Wifi integrado en la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3 para transmitirlos en la banda de 2.4 GHz hacia una red Wifi privada. Esta red es desplegada mediante una antena Ubiquiti

Nano Loco M2, que permite una cobertura Wifi de largo alcance. La antena está conectada directamente a un Router en tierra, el cual proporciona acceso a Internet.

Gracias a esta conexión, los datos pueden ser enviados desde la Boya de Comunicaciones hacia Firebase, donde se almacenan para su posterior análisis o visualización en tiempo real a través de una interfaz web desarrollada en HTML.

Figura 28.

Arquitectura del sistema.



Nota: En la figura se puede visualizar la arquitectura del sistema completo en el que se visualiza todas las fases que integran al mismo.

3.5.4 Parámetros de comunicación.

Antes de programar los módulos Heltec Wifi LoRa 32 V3, es fundamental comprender los parámetros que influyen en la comunicación LoRa, ya que su configuración impacta directamente en la propagación de la señal. Aspectos como el alcance, la velocidad de transmisión y la tasa de transferencia de datos dependen de estos

ajustes, pero también influyen en la robustez de la señal, la sensibilidad del receptor y el consumo energético.

En este análisis, se revisarán uno a uno estos parámetros, considerando que su ajuste no solo afecta la transmisión en un medio de operación convencional como el aire, sino que también puede tener un impacto aún mayor en un entorno subacuático, donde las condiciones de propagación son más desafiantes.

Los parámetros de comunicación que se tienen en cuenta en este trabajo son: La frecuencia de transmisión, la potencia de transmisión, el ancho de banda, el factor de expansión de la señal, la tasa de codificación, longitud del preámbulo, tiempo de espera en la recepción y payload.

3.5.4.1 Frecuencia.

Como se indica en la Tabla 13, el módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3 puede operar en las bandas de frecuencia 863–928 MHz y 470–510 MHz. Para la implementación en este trabajo de grado, se utiliza la banda de 902–928 MHz, ya que es la permitida en Ecuador (Región 2) según el Plan Nacional de Frecuencias (Arcotel, 2021).

La frecuencia 915MHz es una frecuencia central dentro de la banda de 902–928 MHz. Como se muestra en la Figura 29, la frecuencia de 915MHz pertenece a la banda UHF (Ultra High Frequency), una de las nueve bandas del espectro radioeléctrico. Sin embargo, su longitud de onda no es milimétrica, sino aproximadamente 32.8 cm, lo que la ubica en el rango de las ondas decimétricas.

Figura 29.

Bandas de frecuencia – Espectro Radioeléctrico.

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica correspondiente
4	VLF	3 a 30 kHz	Ondas miriamétricas
5	LF	30 a 300 kHz	Ondas kilométricas
6	MF	300 a 3000 kHz	Ondas hectométricas
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas
9	UHF	300 a 3000 MHz	Ondas decimétricas
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas
12		300 a 3000 GHz	Ondas decimilimétricas

Nota: En la figura se puede visualizar la nomenclatura de las bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico, tomada de (Arcotel, 2021).

Los dispositivos LoRa permiten la transmisión de datos utilizando bandas ISM, las cuales operan en frecuencias UHF. Estas bandas son utilizadas por diversas tecnologías, como la telefonía móvil, Wifi y Bluetooth. LoRa se caracteriza por su capacidad de transmitir datos a largas distancias. Al operar en el rango de MHz, puede compensar de manera eficiente una baja relación señal/ruido (SNR) y aprovechar el ancho de banda disponible en estas frecuencias para la transmisión de datos (Vargas, 2022).

Como se muestra en la Figura 32, tecnologías como Wifi también operan en la banda UHF, la cual abarca desde 300 MHz hasta 3 GHz. En particular, Wifi utiliza la frecuencia de 2.4 GHz. A pesar de pertenecer a la misma banda, Wifi tiene un alcance relativamente corto, generalmente alrededor de 30 metros desde el punto de origen, mientras que LoRa puede alcanzar varios kilómetros, dependiendo de la configuración.

Esto se debe a que, a mayor frecuencia, la longitud de onda es más corta y la señal es más susceptible a la absorción por la Tierra y otros obstáculos cercanos (AIPD, 2005).

En consecuencia, una frecuencia más alta como 2.4 GHz (Wifi) será más afectada por la absorción en comparación con una frecuencia más baja como 915 MHz (LoRa), lo que permite que LoRa tenga un mayor alcance en la propagación de su señal.

Según AIPD, (2005) el uso de frecuencias más bajas reduce la pérdida de señal y aumenta su alcance, mientras que frecuencias más altas presentan una mayor absorción. Por ello, este estudio se centra en analizar el comportamiento de la tecnología LoRa en un entorno subacuático, considerando su eficiencia en la transmisión de datos a largas distancias en entornos al aire libre.

También es importante considerar que, a medida que aumenta la frecuencia, también lo hace el ancho de banda disponible, lo que permite la transmisión de grandes volúmenes de datos de manera simultánea. Por el contrario, a frecuencias más bajas, el ancho de banda es más limitado, lo que restringe la cantidad de datos que pueden enviarse. Saunders & Aragón, (2007) señala que los nuevos sistemas han incrementado el uso de frecuencias más altas debido a la disponibilidad de mayores anchos de banda. Sin embargo, esto también conlleva una reducción en la distancia de propagación de la señal..

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, se utiliza la frecuencia de 915 MHz, que tiene una longitud de onda aproximada de 0.328 m. Esta longitud de onda se puede calcular mediante la fórmula correspondiente (Fawwaz T & Ravaioli, 2015), como se muestra en la ecuación 11. Esta es la frecuencia en la que opera la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, cumpliendo con las normativas de la CMT ecuatoriana (Región 2).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (11)$$

Donde,

- c = Velocidad de la luz en el vacío.
- f = Frecuencia en Hz.

3.5.4.2 Potencia.

Según AIPD, (2005) un aumento en la potencia de salida dará como resultado una mayor distancia de propagación de la señal. Para el caso de este trabajo de grado, se toma en cuenta la potencia máxima a la que puede trabajar el módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3, el cual según la Tabla 13, nos dice que su máximo de potencia es de 21 dBm.

Según Vargas, (2022) a mayor potencia de transmisión, mayor será el alcance de la señal, pero trae consigo una desventaja que es un mayor consumo de energía. Si se toma en cuenta esto, debido a que se está trabajando en un ambiente subacuático con altos índices de pérdida en la señal, la mejor opción es utilizar la máxima potencia a la que puede trabajar el módulo (21 dBm) con el objetivo que la señal pueda tener un mayor alcance y evaluar cual es la distancia que esta puede alcanzar bajo el agua, aunque esto represente un mayor consumo de energía.

3.5.4.3 Ancho de banda.

El ancho de banda está relacionado estrictamente con la tasa de transferencia de datos, puesto que un mayor ancho de banda permite mayores tasas de datos, pero disminuye la sensibilidad del receptor, por el contrario, con un menor ancho de banda, la tasa de datos será menor, pero aumentara el alcance de la señal (Vargas, 2022).

Según el datasheet del módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3, los anchos de banda más comúnmente utilizados son 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz, siendo 125 kHz el más equilibrado (Heltec, 2022). Con base en esto, se presenta una comparación de los distintos factores que varían según el ancho de banda, la cual se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20.

Factores de comunicación según el Ancho de Banda.

Ancho de Banda	Tasa de Datos	Sensibilidad Rx	Alcance	Consumo de Energía
125 kHz	Baja	Alta	Alto	Bajo
250 kHz	Media	Media	Medio	Medio
500 kHz	Alta	Baja	Bajo	Alto

Nota: En la tabla se realiza una comparativa de los factores que se afectan dependiendo del ancho de banda utilizado.

Tras analizar los datos comparativos de la Tabla 20, se concluye que un ancho de banda de 125 kHz es el más adecuado para la comunicación subacuática, ya que ofrece una alta sensibilidad en la recepción, mayor alcance y un menor consumo de energía. En contraste, anchos de banda mayores reducen el alcance de la señal, lo que resulta inconveniente en un medio subacuático propenso a pérdidas. La única desventaja es su baja tasa de transmisión de datos, lo que limita la cantidad de información que se puede transferir.

3.5.4.4 Spreading Factor.

Este es uno de los parámetros que LoRa utiliza para determinar la tasa de transmisión de datos, influyendo en factores como el alcance de la señal y su resistencia a las interferencias. Representa el número de chips (símbolos de modulación) empleados en la codificación de cada bit de información. Concretamente, el Spreading Factor (SF) también conocido en español como Factor de Dispersión define la cantidad de chips que representan un bit de datos transmitidos. A medida que el SF aumenta, los datos recibidos son menos susceptibles a corrupción, mejorando la robustez de la comunicación (Vargas, 2022).

Según Correa Rubio, (2021) el Spreading Factor (SF) representa la relación entre la tasa de generación de chips, donde 2^{SF} chips conforman un símbolo (ver ecuación 12).

El SF puede tomar seis valores distintos, desde SF7 hasta SF12. En este caso, SF12 es el valor más alto, lo que genera una mayor duración del símbolo, aumentando así la sensibilidad del receptor (ver Tabla 21) y permitiendo la recepción de señales más débiles. Esto favorece una propagación a mayor distancia y una mejor resistencia al ruido.

$$\text{Chips por Bit} = 2^{SF} \quad (12)$$

Donde,

- SF = Spreading Factor.

SF12 transmite datos de forma más lenta debido a la cantidad de chips por bit. Según la ecuación 12, la cantidad de chips para SF12 es $2^{12} = 4096$ Chips por bit, mientras que para SF7 es $2^7 = 128$ Chips por bit. Esto confirma que un mayor Spreading Factor reduce la velocidad de transmisión. El propio datasheet del módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3 presenta tres valores comunes de SF, donde se puede comprobar que un aumento en el SF incrementa la sensibilidad del receptor, permitiendo así un mayor alcance de la señal (ver Tabla 21).

Tabla 21.

Sensibilidad por valor SF.

Ancho de Banda	Spreading Factor	Sensibilidad
125 kHz	SF12	-137 dBm
125 kHz	SF10	-130 dBm
125 kHz	SF7	-124 dBm

Nota: En la tabla se especifica la sensibilidad del receptor para un ancho de banda de 125 kHz mediante 3 valores de Spreading Factor, adaptada de (Heltec, 2022).

Tomando en cuenta lo anterior, se ha optado por un Spreading Factor de valor SF12, ya que en este trabajo se busca que la señal transmitida sea robusta y alcance la máxima distancia posible, además de mejorar la sensibilidad en la recepción para capturar

señales más débiles. Dado que se opera en un entorno subacuático, esta elección es adecuada, aunque implique un mayor tiempo de transmisión de datos. Cabe resaltar que el uso de SF12 también aumenta el consumo de energía, ya que los módulos de transmisión y recepción permanecen habilitados por más tiempo.

Dado el SF12 y tomando en cuenta el ancho de banda de 125kHz explicado en la sección [3.5.4.3](#), es posible realizar el cálculo de la Tasa de Símbolos (R_s) que representa la cantidad de símbolos por segundo transmitidos, generalmente representada en baudios donde 1 baudio (Bd) es equivalente a 1 símbolo por segundo, para lo cual se hace uso de la ecuación 13 (Haxhibeqiri et al., 2018). Esta ecuación es esencial para el cálculo del Bitrate, que se expresa en la ecuación 15. El cálculo para cada uno de los valores de Spreading Factor se puede visualizar en la Tabla 22.

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (13)$$

Donde,

- BW = Ancho de banda.
- SF = Spreading Factor.

Por ejemplo, para un valor de SF12 con un ancho de banda de 125kHz, el resultado de la Tasa de Símbolo esta dado por 31 Bd., lo cual se puede visualizar en el siguiente calculo.

$$R_s = \frac{125kHz}{2^{12}}$$

$$R_s = 30.52 \text{ Bd.}$$

3.5.4.5 Coding Rate.

Otro factor que afecta la transmisión de datos es el denominado Coding Rate (CR), o Tasa de Codificación de Errores en español. Este valor introduce redundancia en la

transmisión, lo que permite corregir errores sin necesidad de realizar una retransmisión y se define en la ecuación 14 (Correa Rubio, 2021). Los valores van de 4/5 hasta 4/8 y se usan para proteger la señal contra ráfagas de interferencias.

$$CR = \frac{N}{M} \quad (14)$$

Donde,

- N = Longitud de bloque de datos (4).
- M = Longitud de palabra clave (5 - 8).

Si se utiliza un valor de CR más alto, como 4/8, significa que el paquete de datos emplea más bits para la corrección de errores. Esto hace que la comunicación sea más robusta frente a interferencias y ruido, pero como desventaja, reduce la tasa de transmisión de datos (Haxhibeqiri et al., 2018).

Los valores de N/M están directamente relacionados con la cantidad de bits utilizados tanto para la corrección de errores como para los datos. Por ejemplo, un Coding Rate de 4/5 emplea 4 bits para datos y 1 bit para corrección de errores, mientras que un Coding Rate de 4/8 asigna 4 bits a la corrección de errores y 4 bits a los datos.

Teniendo en cuenta que la señal es más susceptible a corromperse por la atenuación, interferencias y ruido del medio subacuático, se espera que una configuración con mayor corrección de errores permite que la señal sea más robusta y que los datos sean menos susceptibles a corrupción. Por ello, la configuración en este caso es $CR = 4/8$. Una vez definidos el Bandwidth (BW), el Spreading Factor (SF) y el Coding Rate (CR), es posible calcular el Bitrate (R_b), como se muestra en la ecuación 15 (Correa Rubio, 2021).

$$R_b = SF * R_s * CR \quad (15)$$

Donde,

- SF = Spreading Factor.
- R_s = Tasa de símbolo (Bd)
- CR = Coding Rate.
- BW = Ancho de Banda.

Dada la ecuación 14, correspondiente a la tasa de símbolos, y la ecuación 15, correspondiente al bitrate, se elabora la Tabla 22 con los cálculos correspondientes para cada Spreading Factor (SF) considerando un Coding Rate de 4/8, el cálculo se presenta a continuación.

$$R_b = SF * R_s * CR$$

$$R_b = 12 * 30.52 * 4/8$$

$$R_b = 183.12 \text{ bps}$$

Tabla 22.

Tasa de bit y Tasa de símbolo.

Spreading Factor	Tasa de símbolo (Bd)	Bitrate (bps)
7SF	976.5	3417.7
8SF	488.3	1953.1
9SF	244.1	1098.7
10SF	122.1	610.5
11SF	61	335.7
12SF	30.52	183.12

Nota: En la tabla se especifica la Tasa de símbolo y la Tasa de bit para valores de Spreading Factor SF7, SF10 y SF12 con un Coding Rate de 4/8.

3.5.4.6 Preamble Length.

El Preamble Length (Longitud del Preámbulo) en LoRa se define como una secuencia de símbolos utilizada al inicio de cada transmisión de datos. Este preámbulo es

programable desde 6 hasta 65,532 símbolos e incluye 4 símbolos estáticos al final, lo que permite que su longitud total alcance hasta 65,536 símbolos (Correa Rubio, 2021). Se puede definir entonces a este preámbulo con la ecuación 16.

$$\text{Preamble Length} = N_p + 4.25 \quad (16)$$

Donde,

- N_p = Numero de símbolos configurados.

Según Correa Rubio, (2021) el Preamble Length se utiliza en el proceso de sincronización entre el receptor y el transmisor antes de la transmisión de los datos útiles. Esto permite que el receptor detecte la señal LoRa de manera efectiva.

Un preámbulo más largo mejora la detección de paquetes en entornos con altos niveles de ruido e interferencias, aumentando la fiabilidad de la comunicación. Por otro lado, un preámbulo más corto reduce el tiempo de transmisión, pero en condiciones ruidosas es más probable que el paquete no sea detectado. El datasheet del chip SX1262 recomienda utilizar un Preamble Length de 12 símbolos para obtener un rendimiento óptimo y garantizar un buen desempeño en largas distancias o ambientes ruidosos. Esto resulta en una transmisión de 16.25 símbolos, según la ecuación 16 (Semtech, 2021).

3.5.4.7 Rx Timeout y Buffer Size.

Estos parámetros no afectan directamente la propagación de la señal, pero sí influyen en la eficiencia del sistema. El Rx Timeout define el tiempo que el receptor esperará por un paquete antes de considerar que no llegará. Si el tiempo expira sin recibir ningún paquete, el módulo puede seguir esperando otro paquete o pasar a modo de bajo consumo, dependiendo de la programación. Esto permite reducir el consumo de energía y evita que el receptor permanezca esperando indefinidamente (Semtech, 2021).

Por otro lado, el Buffer Size determina el tamaño de la carga útil (payload). Un tamaño mayor permite transmitir más datos en un solo paquete. Sin embargo, si se recibe un paquete que excede el valor de Buffer Size, este se perderá. Generalmente, se utiliza un tamaño de 32 bytes (Semtech, 2021), pero en este caso dicho valor puede variar.

En este trabajo, los datos transmitidos desde el Nodo Sensor hacia la Boya de Comunicaciones se envían en una sola cadena de texto. Esta cadena debe contener la información de los dos sensores junto con un identificador de paquete. Para ello, se estructura con el siguiente formato: “B: %0.0f -TS: %llu -Turbidez: %0.0f -PH: %0.2f -PN: %d”.

Teniendo en cuenta esta estructura, se estima un tamaño total de 60 bytes, ya que cada carácter ocupa 1 byte. La cadena fija, incluyendo espacios y símbolos estáticos que representa 33 bytes. Los valores dinámicos como el formato %0.0f (Turbidez) corresponde a un número entero sin decimales que puede ir de 0 a 100, por lo que se asignan 3 bytes. El formato %0.2f (PH) incluye dos decimales y su parte entera varía entre 0 y 99, por lo que ocupa 5 bytes, considerando también el punto decimal, el formato %d (PN) es un número entero entre 0 y 99, es decir 2 bytes, el caso de %llu (TS) es una marca de tiempo que ocupa 13 bytes. Por último la marca %0.0f (B) es un entero que va entre 0 a 99 ocupando 2 bytes.

La suma de estos elementos da como resultado una cadena de 59 bytes máximo. La implementación de este formato se puede verificar en el Fragmento de Código 4 de la sección [3.6.1.1](#).

3.5.4.8 Modulación LoRa.

La tecnología LoRa (Long Range Modulation) emplea una modulación basada en Chirp Spread Spectrum (CSS), la cual codifica los datos mediante chirps (barridos de frecuencia). Estas señales pueden ser detectadas incluso si están por debajo del nivel de

ruido, lo que permite una comunicación robusta en entornos ruidosos. La modulación CSS proporciona un alcance de comunicación mayor en comparación con FSK (modulación por desplazamiento de frecuencia), sin incrementar significativamente el consumo de energía (Vargas, 2022). Esto la hace ideal para aplicaciones de IoT y redes de baja potencia y largo alcance (LPWAN).

LoRa es una modulación de espectro ensanchado diseñada para operar de manera eficiente en entornos con alto ruido, desvanecimiento multitrayecto y efecto Doppler. Una de sus principales ventajas es el uso del Spreading Factor (SF), que permite ajustar la tasa de transmisión sin modificar el ancho de banda (Jiménez Ballart, 2018).

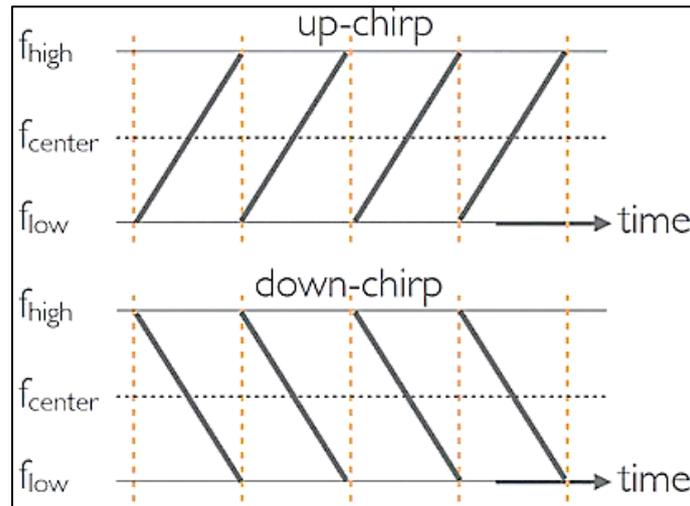
El proceso de modulación en LoRa se basa en la técnica de chirps, que consiste en modular un mensaje con una señal cuya frecuencia varía de manera continua. En este contexto, un chirp puede ser:

- **Up-chirp:** Señal cuya frecuencia aumenta linealmente en el tiempo.
- **Down-chirp:** Señal cuya frecuencia disminuye linealmente en el tiempo.

La información digital se codifica mediante desplazamientos de fase en los chirps, lo que proporciona una transmisión resistente al ruido y a las interferencias. Se basa en tres aspectos fundamentales: el Spreading Factor (SF), el Ancho de Banda (BW) y la Tasa de Codificación de Errores (Coding Rate, CR). Cada uno de estos parámetros influye directamente en la tasa de transferencia de datos y en la robustez de la señal transmitida (Beltrán, 2023). En la Figura 30, se presenta gráficamente los chirps ascendentes y descendentes, ilustrando cómo varía la frecuencia en el tiempo durante la modulación.

Figura 30.

Pulsos de Chrips.



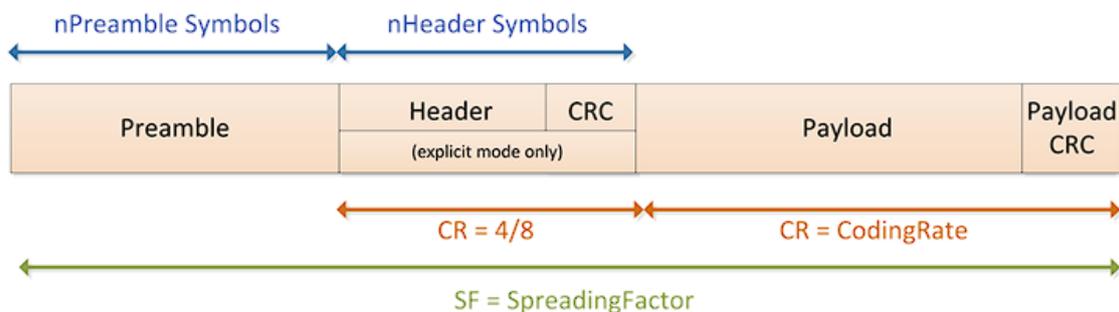
Nota: En la figura se puede visualizar el modo ascendente y descendente de los pulsos de chirp, tomada de (Beltrán, 2023).

3.5.4.9 Formato de paquete LoRa.

LoRa cuenta con dos tipos de formatos de paquetes: implícito y explícito. En el caso del formato de paquete explícito, se incluye un encabezado que contiene información sobre la cantidad de bytes, la velocidad de codificación y, si corresponde, la presencia de una comprobación de redundancia cíclica (CRC) para garantizar la integridad de la carga útil (Semtech, 2021). Dicho paquete se puede visualizar en la figura 31.

Figura 31.

Formato de paquete LoRa.



Nota: En la figura se puede visualizar la configuración de un paquete LoRa, en el cual se visualiza las partes que lo conforman, tomada de (Semtech, 2021).

Como se muestra en la Figura 31, el paquete comienza con el preámbulo, cuya función es establecer la sincronización con el receptor. Por defecto, el preámbulo consta de 12 símbolos, aunque, como se explicó en la sección [3.5.4](#), este valor es programable, permitiendo su ampliación o reducción según las necesidades de la comunicación. El receptor realiza la detección del preámbulo de forma periódica, por lo que es fundamental que conozca su longitud para una correcta recepción del paquete (Semtech, 2021).

El preámbulo es seguido por un encabezado, que contiene información sobre la carga útil que le precede. La carga útil (payload) es un campo de longitud variable que contiene los datos codificados a una tasa de error, la cual puede estar definida en el encabezado en el modo explícito o ser programada manualmente por el usuario en el modo implícito. (Semtech, 2021).

El paquete puede finalizar con un campo CRC opcional, dependiendo del modo de operación seleccionado. En el caso del modo explícito (modo predeterminado), el encabezado proporciona información sobre la carga útil, incluyendo la longitud del payload en bytes, la velocidad de codificación para la corrección de errores en la recepción y la presencia o ausencia de un CRC opcional de 16 bits. Además, este encabezado se transmite con la máxima corrección de errores (código 4/8) y cuenta con su propio CRC, lo que permite descartar encabezados no válidos (Semtech, 2021).

En el modo implícito, el encabezado se elimina del paquete, ya que la longitud de la carga útil, la tasa de codificación de errores y la presencia del CRC opcional deben configurarse manualmente tanto en la transmisión como en la recepción (Semtech, 2021).

En este trabajo se utiliza el modo explícito, lo que significa que el paquete incluirá un encabezado con información sobre el tamaño del payload, la tasa de codificación de errores y la presencia de CRC. A partir de esto, se establece que el paquete utilizado tiene la siguiente estructura:

- **Preámbulo:** 12 símbolos.
- **Cabecera:** Tamaño de payload, Tasa de codificación 4/8 y CRC en payload.
- **Payload:** 59 bytes.
- **CRC:** Activado por defecto en modo explícito.

Un receptor LoRa que opere en la misma frecuencia y tenga configuraciones compatibles con el transmisor podrá recibir los datos sin necesidad de conocer de antemano el tamaño del mensaje. Para calcular el tamaño del paquete, primero es necesario determinar la cantidad de símbolos en el preámbulo. Dado que cada símbolo equivale al valor del Spreading Factor (SF) en bits, se tiene que $1 \text{ símbolo} = SF \text{ bits}$. Por lo tanto, si el preámbulo consta de 12 símbolos, la cantidad de bits transmitidos en el preámbulo se obtiene multiplicando el número de símbolos por el Spreading Factor: $12 \times SF \text{ bits}$. Dado que 1 byte equivale a 8 bits, el tamaño del preámbulo en bytes se puede calcular mediante la ecuación 17.

$$\text{Tamaño Preambulo (bytes)} \approx \frac{N_{\text{Preambulo}} * SF}{8} \quad (17)$$

Donde,

- $N_{\text{Preambulo}}$ = Valor de preámbulo asignado.

De la ecuación 17 se puede realizar el cálculo para un preámbulo de 12 símbolos con un SF12. El resultado se lo puede visualizar a continuación:

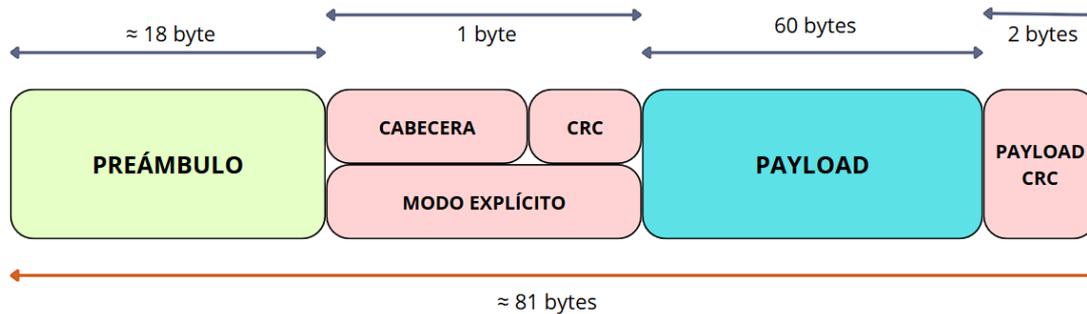
$$\text{Tamaño Preambulo (bytes)} \approx \frac{12 * 12}{8}$$

$$\text{Tamaño Preambulo (bytes)} \approx 18 \text{ bytes}$$

Cabe destacar que el valor es aproximado, ya que el preámbulo es una secuencia de símbolos. Conociendo el tamaño del preámbulo, la estructura final del paquete se puede visualizar en la Figura 32.

Figura 32.

Tamaño de paquete LoRa.



Nota: En la figura se puede visualizar la configuración de un paquete LoRa, en el cual se visualiza las partes que lo conforman así como el tamaño en bytes de cada una de las partes que componen el paquete, adaptada de (Semtech, 2021).

3.5.5 Librerías.

Como se mencionó anteriormente en la Tabla 19, el software que mejor se adapta al desarrollo del sistema y que ofrece mayor compatibilidad con los requerimientos del módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3 es Arduino IDE. Este entorno de desarrollo está basado en los lenguajes de programación C y C++ y se caracteriza por ser de código abierto (Open Source), lo que facilita su personalización y amplia compatibilidad con diversas bibliotecas y hardware (Arduino, n.d.).

En el caso del código de programación utilizado para la implementación del Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones, se toma en cuenta las especificaciones de instalación de librerías correspondientes que se establecen en la Web del fabricante, www.heltec.org. Aquí se da a conocer un enlace a GitHub en el cual se hace referencia al uso de la biblioteca Heltec_ESP32, que contiene ejemplos relacionados a LoRa/LoRaWAN y sus códigos relacionados (Richard3366, 2024).

A continuación, se describen las librerías utilizadas para el desarrollo del código, las cuales son esenciales para el funcionamiento de los diferentes módulos del sistema. La siguiente lista detalla cada una de ellas:

➤ **LoRaWan_APP.h:**

Es una de las librerías más importantes utilizadas en este trabajo, puesto que es compatible con el chip SX1262 del cual se habla en la Tabla 14 y es el que usa la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3 que se utiliza en el presente trabajo (DigitalConcepts, 2025). Esta librería permite implementar la pila LoRaWAN, por lo que es posible configurar comunicaciones en redes LoRa de largo alcance.

Es compatible con múltiples configuraciones de frecuencia según la región. En el caso de Ecuador, que pertenece a la Región 2, se utiliza la banda US915, lo que permite operar a una frecuencia de 915 MHz. En términos generales, la inclusión de esta librería facilita la configuración del módulo LoRaWAN (Aaron, 2024).

Para este trabajo, se emplea la función `Radio.Send()`, encargada del envío de datos a través del módulo LoRa. Esta función permite prescindir del protocolo LoRaWAN, resultando más adecuada para comunicaciones P2P (punto a punto). Dado que en este caso se requiere una conexión directa entre dos módulos LoRa, la opción más eficiente es el uso de `Radio.Send()` (Richard3366, 2024).

➤ **Arduino.h:**

Esta librería es una parte fundamental del Arduino Core y generalmente se incluye por defecto en el entorno de desarrollo. Su función principal es proporcionar herramientas esenciales para la programación en Arduino, permitiendo la interacción con los pines del microcontrolador. Entre sus funcionalidades más importantes se encuentra `pinMode(pin, mode)`, que permite configurar un pin como entrada o salida. También incluye

`digitalWrite(pin, value)`, utilizada para enviar una señal alta (HIGH) o baja (LOW) a un pin digital. Además, ofrece `analogRead(pin)`, que permite la lectura de valores analógicos, fundamental para la obtención de datos de sensores. Finalmente, la función `millis()` proporciona una marca de tiempo en milisegundos desde que el microcontrolador comenzó a ejecutarse, lo que resulta útil para medir intervalos de tiempo.

➤ **pins_arduino.h:**

Esta librería define la configuración de los pines de un microcontrolador según la placa utilizada. En este caso, especifica la asignación de pines GPIO, PWM, ADC, SPI, I2C, entre otros (oddlama, 2025).

➤ **SSD1306Wire.h:**

Esta librería es fundamental para el control de la pantalla OLED en la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, ya que permite la impresión de texto, imágenes y gráficos en la pantalla integrada del microcontrolador. Para su funcionamiento, primero se debe inicializar la pantalla con la función `display.init()`. Luego, es posible mostrar texto en una ubicación específica utilizando `display.drawString(x, y, "texto")`. Finalmente, para que los cambios sean visibles, es necesario actualizar la pantalla con `display.display()`. Gracias a esta librería, es posible visualizar información en tiempo real, facilitando la interacción con el sistema (Pronin, 2024).

➤ **WiFi.h:**

Esta librería permite gestionar la conectividad Wifi en módulos ESP32, facilitando la conexión a redes inalámbricas, la creación de puntos de acceso y la comunicación con otros dispositivos a través de la red. Gracias a su implementación, es posible establecer una conexión a una red Wifi mediante la función `WiFi.begin(ssid, password)`, donde se especifican el nombre y la contraseña de la red. Además, con

WiFi.status(), se puede obtener el estado actual de la conexión, lo que permite verificar si el dispositivo está correctamente conectado. Esta librería es esencial para el desarrollo de aplicaciones que requieran conectividad inalámbrica en el ESP32 (Arduino, 2018).

➤ **FirestoreESP32.h:**

Esta librería permite la integración de los módulos ESP32 con Firebase Realtime Database, facilitando la lectura y escritura de datos en la base de datos en tiempo real. Gracias a esta implementación, el ESP32 puede enviar y recibir información de manera eficiente. Para establecer la conexión con Firebase, se utiliza la función Firebase.begin(), mientras que para actualizar un valor en la base de datos, se emplea Firebase.SetString(). Por otro lado, si se requiere obtener un valor almacenado, se puede utilizar Firebase.getInt(). Esta librería es esencial en proyectos que requieren almacenamiento y sincronización de datos en la nube (Mobizt, 2025).

➤ **NTPClient.h:**

Esta librería permite la sincronización de la hora en el ESP32 utilizando un servidor Network Time Protocol (NTP). Para su correcto funcionamiento, es necesario que el microcontrolador tenga conexión a Internet, ya que obtiene la hora directamente desde un servidor en línea. La función timeClient.update() se encarga de actualizar la hora desde el servidor NTP, mientras que timeClient.getFormattedTime() devuelve la hora en un formato estándar HH:MM:SS. Fundamental en aplicaciones que requieren una referencia horaria precisa y actualizada en tiempo real (Weinberg Fabrice, 2022).

➤ **WiFiUdp.h:**

Esta librería permite la comunicación en redes Wifi a través del protocolo UDP, facilitando el intercambio de datos sin necesidad de una conexión establecida previamente, como ocurre en TCP. Se utiliza en conjunto con la librería NTPClient.h para obtener la hora a través del protocolo NTP, permitiendo que el ESP32 sincronice su reloj con servidores de tiempo en Internet (Arduino, 2024).

Las librerías mencionadas anteriormente son las utilizadas en los códigos de programación del sistema. Sin embargo, no todas se emplean tanto en el Nodo Sensor como en la Boya de Comunicaciones. Cada una de estas librerías forma parte del sistema en su conjunto, pero solo se utilizan aquellas que son necesarias en cada código de programación correspondiente a los módulos Heltec Wifi LoRa 32 V3 de cada dispositivo (ver sección [3.6.1.1](#) y [3.6.1.2](#)).

3.5.6 Diseño de conexión de circuito.

Para empezar con la construcción del Nodo Sensor y la correspondiente Boya de Comunicaciones, es necesario generar los esquemas de conexión, los cuales proporcionan una visualización concreta de cómo se van a estructurar las conexiones entre el módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3 y los sensores para la recolección y envío de datos entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones, para ello en este apartado se visualiza de forma gráfica los esquemas de conexión de dichos dispositivos que interactúan entre sí.

3.5.6.1 Alimentación.

Para el caso del uso de batería, se han tomado como referencia los valores indicados en las hojas de datos (datasheets) de cada uno de los módulos utilizados en la construcción tanto del Nodo Sensor como de la Boya de Comunicaciones. Estos datos se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23.*Consumo de energía de dispositivos.*

Dispositivo	Voltaje (V)	Consumo (mA)
LED (Rojo)	1.9	(1-3) 2.17
Sensor pH	5	7.5
Sensor Turbidez	5	40
MT3608	in:3.7 – out: 5	59.38
Heltec Wifi LoRa 32 V3	3.7	ESP32: 80 Modulo Wifi: 150 LoRa (1-3): 39.33

Nota: En la tabla se especifica el consumo de cada uno de los dispositivos electrónicos que se utilizan para la construcción del Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones, aquí se da el voltaje en el que trabaja y su consumo en Amperios.

Para realizar un cálculo estimado de la duración de la batería, se utilizarán los datos mostrados en la Tabla 23, considerando el uso de una batería de 3.7 V y 1500 mAh. Se procede a sumar el consumo total del dispositivo que se desea evaluar, en este caso, el Nodo Sensor.

El módulo MT3608 abarca tanto el consumo de los sensores como el correspondiente a su propio funcionamiento. Este consumo se estima en 59.38 mA, resultado de la suma del consumo individual de cada sensor y el funcionamiento del módulo considerando una eficiencia del 85% en la conversión de 3.7V a 5V.

De igual forma, el consumo del LED está considerado bajo un patrón de parpadeo, es decir, el valor de 2.17 mA corresponde a un tiempo de 3 segundos con un ciclo de 1 segundo encendido y 2 segundos apagado.

Para la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, se consideran los consumos del ESP32 y del módulo LoRa. Este último se evalúa bajo una configuración de ciclo de 3 segundos, donde permanece 1 segundo en transmisión y 2 segundos en modo de suspensión (Sleep).

$$\text{Consumo Total} = 59.38mA + 2.17mA + 39.33mA + 80mA$$

$$\text{Consumo Total} = 180.88\text{mA}$$

El consumo total estimado del sistema es de 180.88 mA. Con este valor, al dividir la capacidad de la batería (1500 mAh) entre el consumo total, se obtiene una estimación de la duración de la batería para el sistema.

$$\text{Duración de Batería} = 1500\text{mAh}/180.88\text{mA}$$

$$\text{Duración de Batería} = 8.29\text{h} \approx 8\text{h}17\text{m}$$

Esto da como resultado una autonomía aproximada de 8 horas y 17 minutos, es decir, ese sería el tiempo durante el cual el Nodo Sensor podría estar enviando datos continuamente hacia la Boya de Comunicaciones. Esta estimación resulta útil para la planificación de las pruebas de transmisión, ya que, como se explicó anteriormente, se requiere un envío constante de datos para su realización, cabe resaltar que el tiempo podría variar ya que el estimado se realiza con datos de consumo constantes.

En un escenario en el que el módulo de transmisión no opere de forma continua, el uso del modo de suspensión (sleep) de la placa permitiría extender significativamente la autonomía de la batería. Por ejemplo, si se configurara una transmisión de datos cada 10 minutos, la duración de la batería aumentaría de forma considerable.

3.5.6.2 Esquema de conexiones de Nodo Sensor.

El Nodo Sensor es uno de los elementos principales para el funcionamiento del sistema, puesto que este es el que se encarga de recolectar las variables ambientales tanto de PH como de turbidez de agua, esto con el objetivo de enviar los datos desde el fondo del agua hacia la superficie donde se encuentra la Boya de Comunicaciones, todo mediante una comunicación inalámbrica.

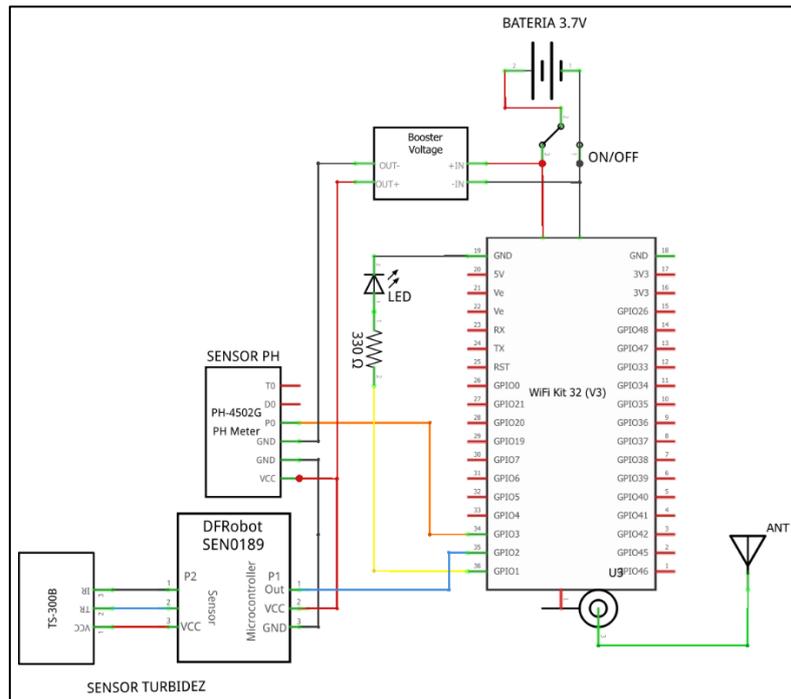
El diagrama de conexiones se observa en la figura 33, aquí se detalla el uso de los módulos acondicionadores tanto de pH como de turbidez de agua, estos son los que se encuentran conectados directamente a la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, la cual se encarga de interpretar los datos recolectados mediante los pines analógicos 6 (Sensor Turbidez) y 5 (sensor PH), para posteriormente ser enviados a través de la comunicación LoRa, que se encuentra trabajando en las bandas libres ISM (915 MHz).

Se hace uso de un LED indicador, el cual parpadeará al momento que el módulo LoRa haga uso de su interfaz de comunicación para el envío de un mensaje en texto plano, este se encuentra conectado directamente al pin 7 de la placa con el uso de una resistencia de 330Ω para su protección, ver figura 33.

Cabe destacar que la placa Wifi LoRa V3 contiene una conexión externa para baterías de 3.7V como se especifica en la Tabla 13, la cual será utilizada para la conexión de la fuente de alimentación (batería 3.7V), pero en el proceso se tiene en cuenta que esta batería no es suficiente para la alimentación de los sensores, puesto que estos trabajan 5V, para lo cual se ha optado por el uso de un elevador de voltaje que permita alimentar tanto los sensores como el módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3 al mismo tiempo utilizando una sola batería, posteriormente los sensores se conecten directamente a la placa LoRa Wifi V3 únicamente con el uso de su salida de datos hacia los pines 6 y 7 de dicha placa, correspondientes a cada uno de dichos sensores.

Figura 33.

Esquema de conexión de Nodo Sensor.



Nota: En la figura se puede visualizar el diagrama de conexiones del Nodo Sensor, en él se detallan los pines que se están utilizando para el funcionamiento del dispositivo.

El esquema en la figura 33 plantea las conexiones que se llevan a cabo entre los diferentes dispositivos, tanto sensores, baterías, leds, resistencias y antena con la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, este nos proporciona un vistazo a la conexión pin a pin de cada uno de estos elementos, mientras que en la Figura 34 se hace una representación gráfica de dichos módulos, aquí se puede tener una idea más precisa de como estos se encuentran conectados.

Comenzando por la conexión de una batería de 3.7V que alimente a la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, con el uso de un interruptor que permite el encendido y apagado de esta fuente de alimentación y del Nodo Sensor, seguidamente se hace uso de un módulo MT3608 que se encarga de elevar el voltaje de entrada a 5V con el objetivo de alimentar los sensores. La antena de comunicaciones que trabaja en las bandas ISM se encuentra conectada directamente a la placa mediante una interface U.FL (IPEX). De igual forma

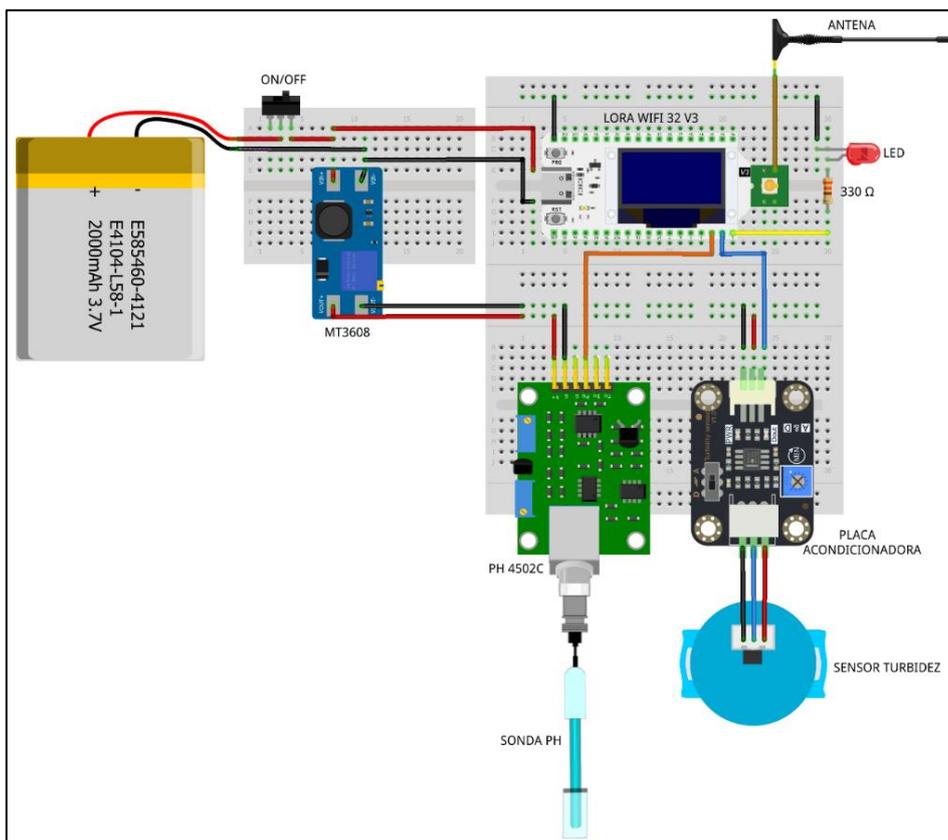
se realiza la conexión de un LED para la visualización de funcionamiento, el cual se encuentra conectado a través de una resistencia de 330 Ω hacia el pin 5 de la placa.

En la parte inferior del diagrama mostrado en la Figura 34, se observan los dos módulos acondicionadores: el módulo del sensor de pH, ubicado en el lado izquierdo y representado en color verde, y el módulo acondicionador de turbidez del agua, situado a la derecha y representado en color negro.

En el módulo de pH, se realiza la conexión de una sonda encargada de recolectar los datos del agua para interpretarlos como valores de pH. Esta sonda está conectada mediante una interfaz BNC. Por otro lado, el sensor de turbidez del agua está conectado directamente a la placa acondicionadora mediante el uso de pines de conexión, como se muestra en la Figura 34.

Figura 34.

Esquema de conexión de dispositivos de Nodo Sensor.



Nota: En la figura se puede visualizar los diferentes módulos utilizados para el funcionamiento del Nodo Sensor.

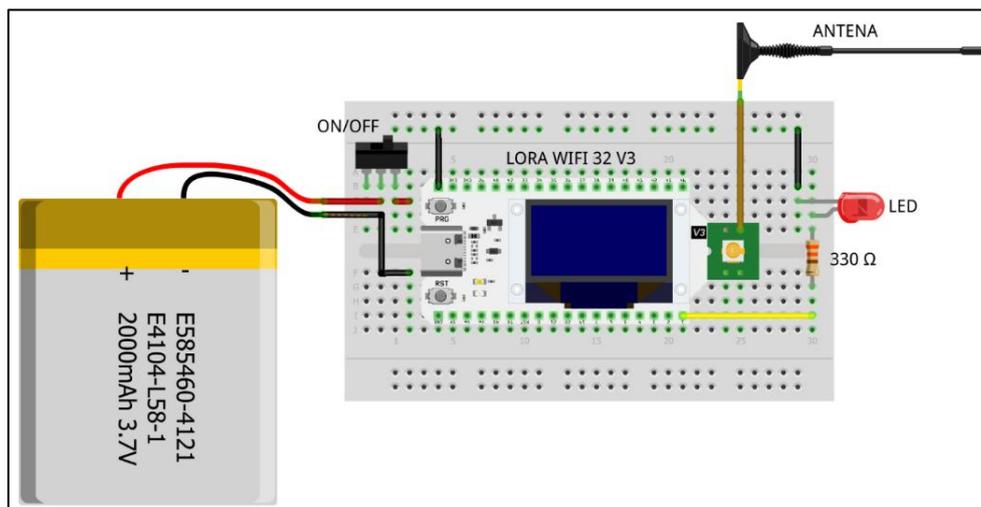
3.5.6.3 Esquema de conexiones de Boya de Comunicaciones.

En el caso de la Boya de Comunicaciones, se está utilizando un esquema similar al del Nodo Sensor, pero sin conexiones de sensores, puesto que este módulo en la boya es el encargado de recibir los datos que vienen por medio de comunicación inalámbrica desde dicho nodo y poder ser visualizados en sí, para ello este módulo hace uso de una pantalla OLED integrada en la misma placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, pero también puede ser visualizado pro medio de comunicación serial gracias a su conector tipo C, ver la figura 35.

En este caso se cuenta con la misma distribución de conexiones de antena, la cual hace uso del conector U.FL (IPEX) integrado en la misma placa, pero en este caso se utiliza la antena a modo de recepción de datos. De igual forma se hace uso de un LED para visualizar la llegada de datos y el funcionamiento de la Boya de Comunicaciones. La batería que alimenta esta placa no hace uso de un módulo elevador de voltaje ya que en este caso solo se necesita de 3.7V para el funcionamiento a diferencia del Nodo Sensor.

Figura 35.

Esquema de conexión de dispositivos de Boya de Comunicaciones.



Nota: En la figura se puede visualizar el módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3, al cual se conecta un LED indicador de funcionamiento, su respectiva antena que trabaja en las bandas ISM y la fuente de alimentación del sistema que compone a la Boya de Comunicaciones.

3.5.7 Diseño de PCB.

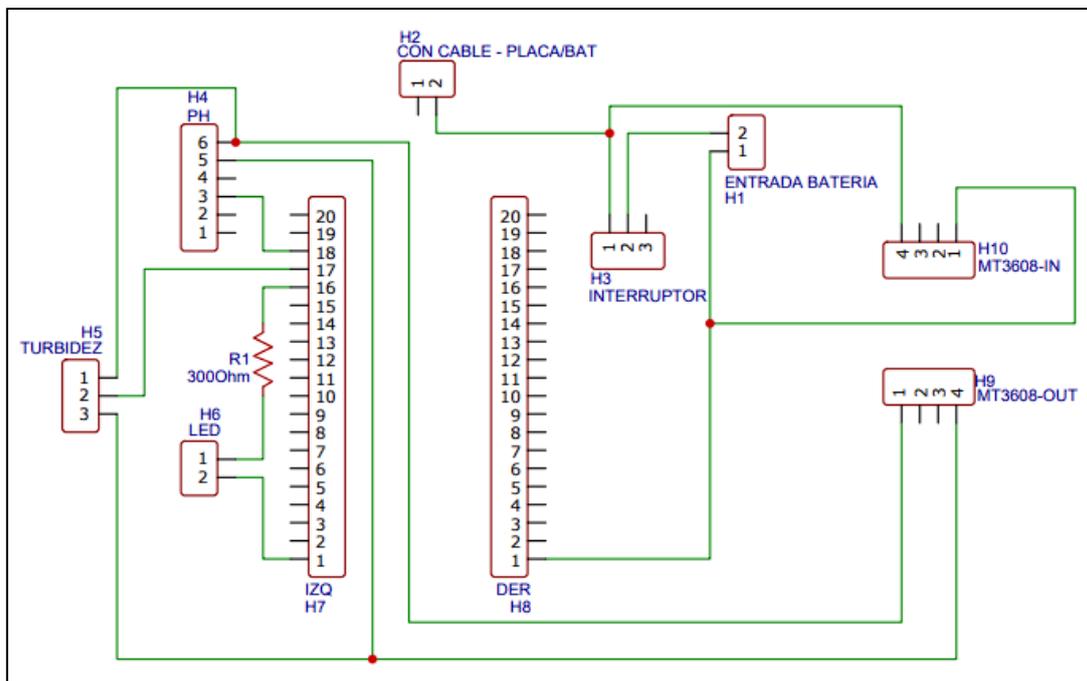
De los diagramas que se han visualizado tanto en la figura 34 y 35, se da pie para la construcción de un PCB (Placa de circuito impreso), en la cual se van a interconectar todos los dispositivos electrónicos a los que se han hecho mención en el anterior apartado, para ello se ha hecho uso del software en línea EasyEDA, el cual permite realizar diseños de PCB en línea.

3.5.7.1 Diseño de PCB para Nodo Sensor.

En este caso para realizar el diseño del PCB, se ha optado por una distribución de regletas hembra, las cuales irán soldadas a la placa, con el objetivo de que los dispositivos electrónicos puedan ser extraídos o colocados sin que necesariamente se encuentren soldados. En la figura 36 se visualiza el diagrama que utilizó para la distribución de estos pines en la placa.

Figura 36.

Diagrama de conexiones para diseño de PCB de Nodo Sensor.

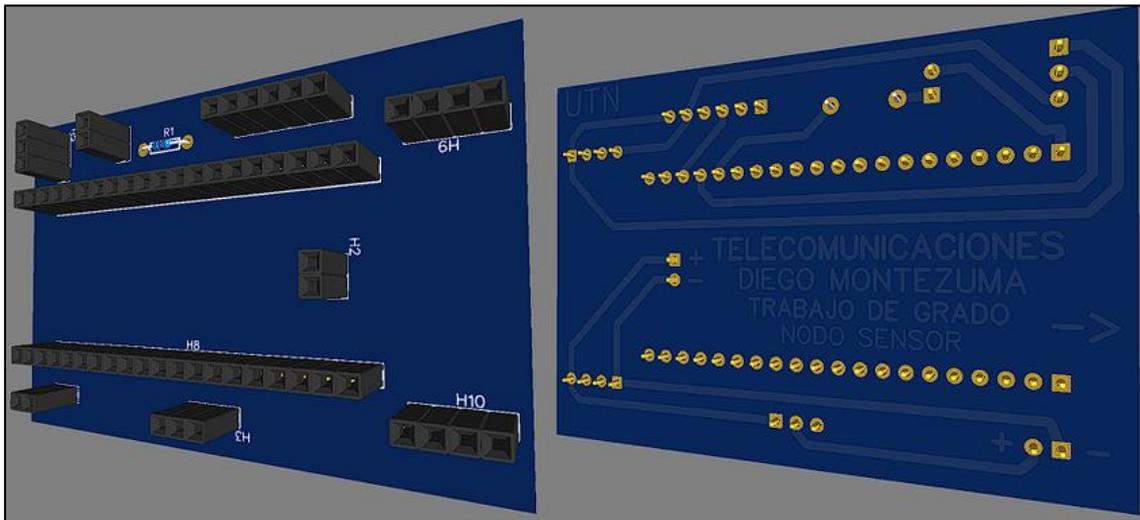


Nota: En la figura se puede visualizar el diagrama de conexiones que se está utilizando para generar PCB, aquí se estructuran los diferentes pines de salida que se necesitan para la conexión de cada componente en el Nodo Sensor.

En la figura 37, se aprecia una visualización en 3D de cómo se estructura la PCB, como se puede observar se hace uso de regletas hembra para la conexión. También se proporciona una visualización de las pistas que se han generado para la conexión de los diferentes modulo en el circuito.

Figura 37.

Modelado 3D de PCB para Nodo Sensor.

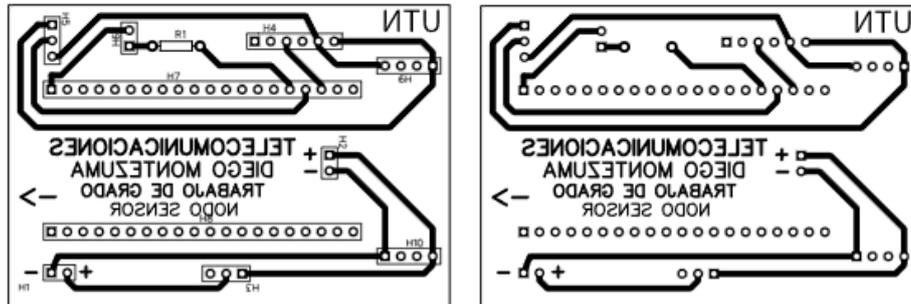


Nota: En la figura se puede visualizar el diseño en 3D del PCB que se utiliza para la conexión de componentes en el Nodo Sensor, este ayuda a tener una visualización del resultado final de la placa.

Una vez que se tiene el diagrama final para la impresión del PCB, se genera el respectivo modelo en negativo para realizar dicho proceso, en este caso el circuito que se ha utilizado para el PCB es el que se aprecia en la figura 38, aquí se nos muestra 2 tipos de circuito, el primero al lado izquierdo es un esquema con todas las regletas de conexión, así como una resistencia, mientras que el que se encuentra en la derecha hace referencia las pistas que se deben imprimir en la placa.

Figura 38.

Hoja de impresión PCB para Nodo Sensor.



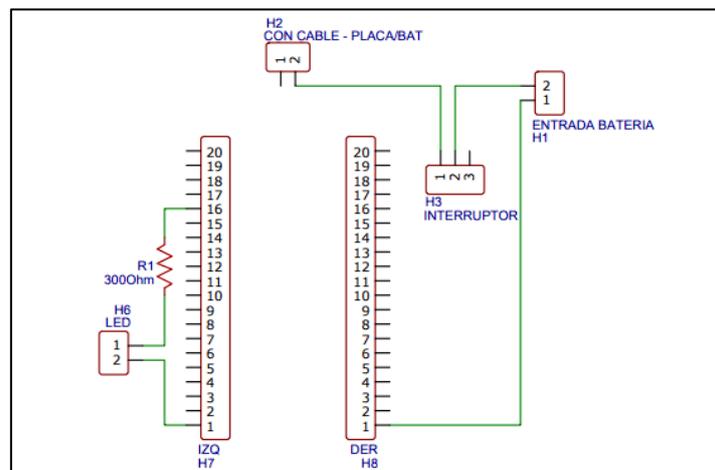
Nota: En la figura se visualiza el circuito que se ha utilizado para la construcción de la PCB, el cual contiene todas las conexiones necesarias para el funcionamiento del Nodo Sensor.

3.5.7.2 Diseño de PCB para Boya de Comunicaciones.

El diseño de PCB para la Boya de comunicaciones sigue los mismos parámetros del modelo anteriormente realizado para el Nodo Sensor, se ha optado por una distribución de regletas hembra, las cuales irán soldadas a la placa, con el objetivo de que los dispositivos electrónicos puedan ser extraídos o colocados sin que necesariamente se encuentren soldados. En la figura 39 se visualiza el diagrama que utilizado para la distribución de estos pines en la placa.

Figura 39.

Diagrama de conexiones para diseño de PCB de Boya de Comunicaciones.

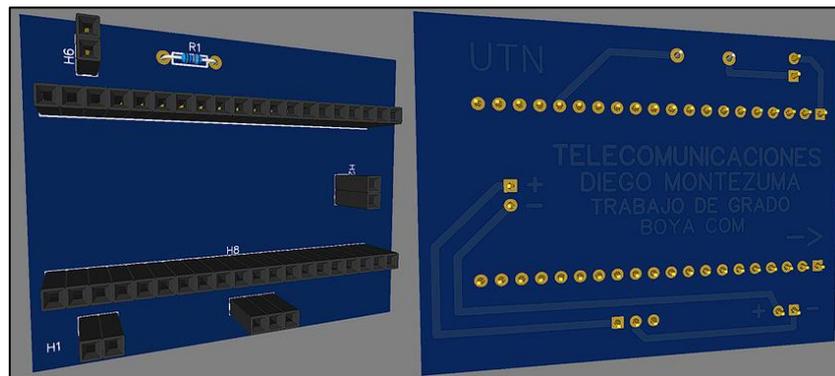


Nota: En la figura se puede visualizar el diagrama de conexiones que se está utilizando para generar PCB, aquí se estructuran los diferentes pines de salida que se necesitan para la conexión de cada componente en la Boya de Comunicaciones.

En la figura 40, se aprecia la visualización en 3D de la estructura del PCB para la Boya de Comunicaciones, aquí se observa el uso de regletas hembra para la conexión. También se proporciona una visualización de las pistas que se han generado para la conexión de los diferentes modulo en el circuito.

Figura 40.

Modelo 3D de PCB para Boya de Comunicaciones.

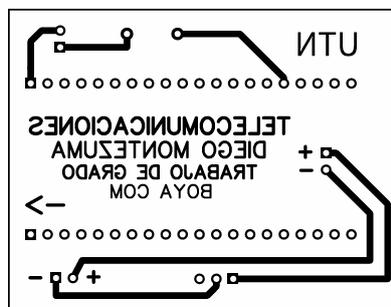


Nota: En la figura se puede visualizar el diseño en 3D del PCB que se utiliza para la conexión de componentes en la Boya de Comunicaciones, este ayuda a tener una visualización del resultado final de la placa.

Al igual que en el Nodo Sensor una vez que se tiene el diagrama final para la impresión del PCB, se genera el respectivo modelo en negativo para realizar dicho proceso (ver Figura 41). El diseño hace referencia las pistas que se deben imprimir en la placa que se va a utilizar en la Boya de Comunicaciones.

Figura 41.

Modelo 3D de PCB para Boya de Comunicaciones.



Nota: En la figura se visualiza el circuito que se ha utilizado para la construcción de la PCB, el cual contiene todas las conexiones necesarias para el funcionamiento de la Boya de Comunicaciones.

3.5.8 Diseño de modulo hermético para Nodo Sensor en 3D.

Para la construcción del Nodo Sensor, el cual debe estar sumergido en el agua, se ha realizado un modelo en 3D, que permita contener la PCB y que esta cuente con una protección hermética en condiciones subacuáticas. El modelo tiene una forma esférica, la cual permite distribuir de manera uniforme la presión que el agua ejerce en la superficie, lo que evita la generación de presión en puntos específicos. El modelo general se lo puede apreciar en la Figura 42.

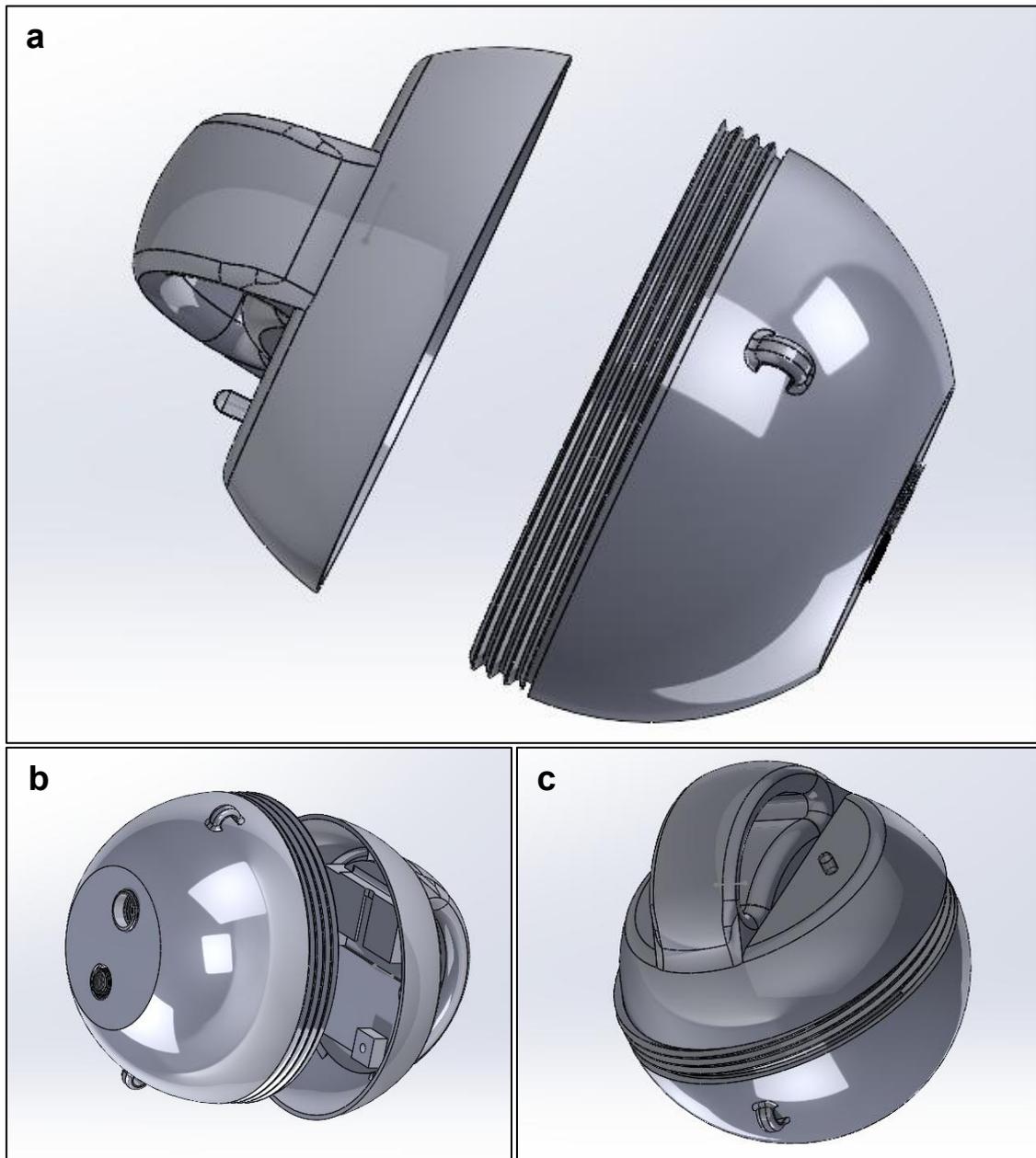
El módulo está diseñado para ser fabricado mediante impresión 3D utilizando Ácido Poliláctico (PLA), uno de los materiales más comúnmente empleados en esta tecnología. En este caso, la impresión conforma la estructura física del dispositivo. El PLA es ideal para la impresión de estructuras grandes, gracias a su deformación y su buena adhesión entre capas, lo que contribuye en el cuidado de la integridad de la estructura (Polygenis, 2019).

Es de destacar que el PLA se emplea únicamente para la estructura del Nodo Sensor, puesto que dicha carcasa será posteriormente recubierta con resina poliéster. Este material es utilizado en la industria náutica, puesto que contiene una alta resistencia a la humedad y la corrosión. Por esta razón, es una opción preferencial para la construcción de cascos y componentes de embarcaciones que están en contacto directo con el agua (FM, 2024).

El recubrimiento con resina poliéster es ideal para el Nodo Sensor, ya que corrige las limitaciones del PLA. Debido a que este contiene una estructura porosa, que podría permitir la filtración de agua; sin embargo, al aplicar un recubrimiento de resinae, se evita la filtración de cualquier tipo de líquido, proporcionando al dispositivo una mayor hermeticidad.

Figura 42.

Modelado en 3D de Nodo Sensor.



Nota: En la figura se observa el modelado en 3D de la esfera que contendrá la placa electrónica del Nodo Sensor, dividida en 3 segmentos (a: se muestra las 2 cubiertas separadas, b: se muestra la cubierta inferior y el interior de la esfera, c: se observa la esfera unida) con el objetivo de ser sumergida dentro del agua y permitir la lectura de variables ambientales a través de sus sensores.

Como se aprecia en la figura 42, la esfera ha sido dividida en 2 secciones, la capa superior y la capa inferior, las cuales se conectan mediante una rosca en la mitad de esta, que permite la unión de estas 2 secciones como una esfera sólida. Esto se lo ha realizado

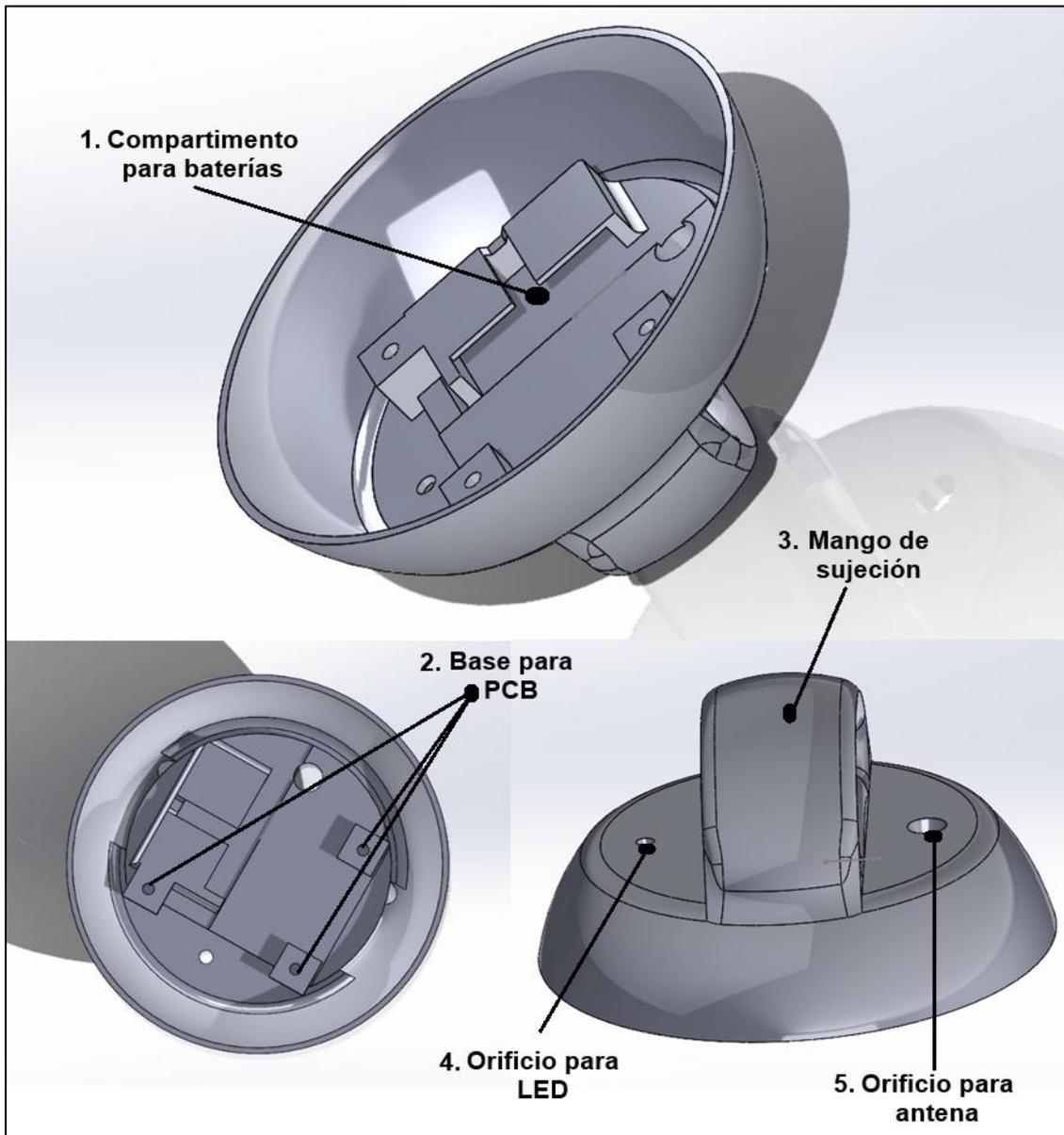
de esta forma con el objetivo de poder interactuar con los elementos electrónicos que se encuentran dentro de la esfera, ya que esto da la facilidad para poder acceder a estos en caso de ser necesario, así como para su respectiva instalación.

La parte superior contiene un número de 5 secciones, que se han tomado en cuenta para el modelado de esta cubierta, dichas secciones se detallan a continuación:

- 1. Compartimento para baterías:** Este compartimento ha sido pensado para la instalación de baterías de polímero de litio planas, como se puede verificar en la Figura 43, dicho compartimento tiene una abertura en forma de T para la fácil colocación de estas.
- 2. Base para PCB:** La base de PCB es un apartado justo encima del compartimento de la batería, en la Figura 43 se puede visualizar que existen orificios, los cuales son pensados para la sujeción del PCB mediante el uso de tornillos.
- 3. Mango de sujeción:** Este se encuentra en la parte superior de este compartimento, se lo ha diseñado con el objetivo de sujetar la esfera por medio de cuerdas exteriores que permitan sostener la esfera bajo el agua, así como la posterior extracción de la misma.
- 4. Orificio para LED:** Este orificio se complementa con un módulo acrílico, el cual se puede apreciar en la Figura 43, con el objetivo de que el LED indicador de funcionamiento pueda visualizarse.
- 5. Orificio para antena:** Este orificio al igual que el LED, es pensado para la instalación de la antena que viene desde la placa LoRa Wifi 32 V3, su estructura es pensada para que contenga una capsula acrílica, la cual se puede visualizar en la Figura 43.

Figura 43.

Cubierta superior de Nodo Sensor.



Nota: En la figura se observa la cubierta superior de la esfera (nodos sensor), aquí se detalla las partes principales de este modelo.

La segunda sección de la esfera es la cubierta inferior en la cual se espera establecer los sensores, en la Figura 44 se aprecia el modelado de esta sección que contiene 5 apartados, los cuales se especifican a continuación:

- 1. Argollas de sujeción:** Estas son estructuras exteriores a la esfera, las cuales contienen orificios en forma de argolla que están pensados para la sujeción de

bolsas de peso externos, permitiendo así que la esfera pueda sumergirse en el agua, ver figura 44.

2. **Rosca inferior:** Ya que la esfera se encuentra dividida en 2 cubierta, inferior y superior, la rosca a la que se hace referencia, es la que permite el sellado hermético entre estas 2 secciones, ver figura 44.
3. **Cilindro protector:** Este cilindro es pensado para cubrir los sensores de las cavidades que se encuentran alrededor de este, en las cuales también es posible agregar peso para que el Nodo Sensor pueda sumergirse en el agua, ver figura 44.
4. **Orificio para sensor PH:** El orificio de sensor PH contiene una rosca que permite acoplar un módulo que a su vez está sujeto a la sonda de PH, este módulos e lo puede visualizar en la figura 37 (ver figura 44).
5. **Orificio para sensor turbidez:** El orificio de sensor de turbidez contiene una rosca que permite acoplar un módulo que a su vez contiene dentro el sensor de turbidez, este módulo se lo puede visualizar en la figura 45 (ver figura 44).

Figura 44.

Cubierta inferior de Nodo Sensor.

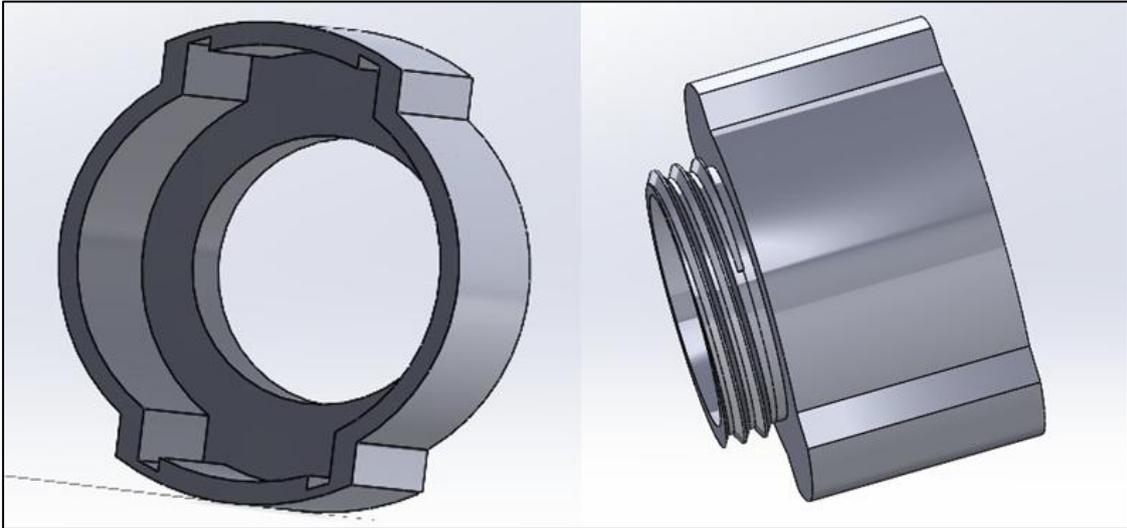


Nota: En la figura se observa la cubierta inferior de la esfera (Nodo Sensor), aquí se detallan todas las partes principales del modelo en cuestión.

En la figura 36 se observa el módulo diseñado para el sensor de turbidez, cabe resaltar que en este módulo el sensor debe estar en el interior, así mismo este contiene una rosca que permite al sensor ser acoplado en el orificio del sensor de turbidez que se especificó en la figura 45.

Figura 45.

Cubierta de sensor de turbidez.

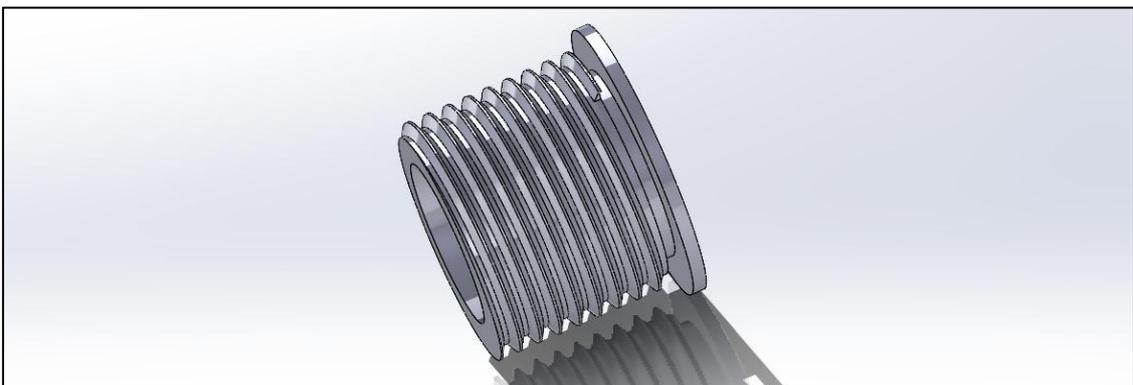


Nota: En la figura se puede visualizar el modelo en 3D de la cubierta para el sensor de turbidez de agua, esta cuenta con una rosca para acoplarse a la cubierta inferior del Nodo Sensor.

En la figura 46 se observa el módulo diseñado para el sensor de PH, este contiene una rosca que permite al sensor ser acoplado en el orificio del sensor de PH que se especificó en la figura 44. En este caso, el módulo estará sujetando a la sonda de PH, ya que esta deberá pasar por su interior atravesando la pared de la esfera.

Figura 46.

Sujetador de sonda PH.

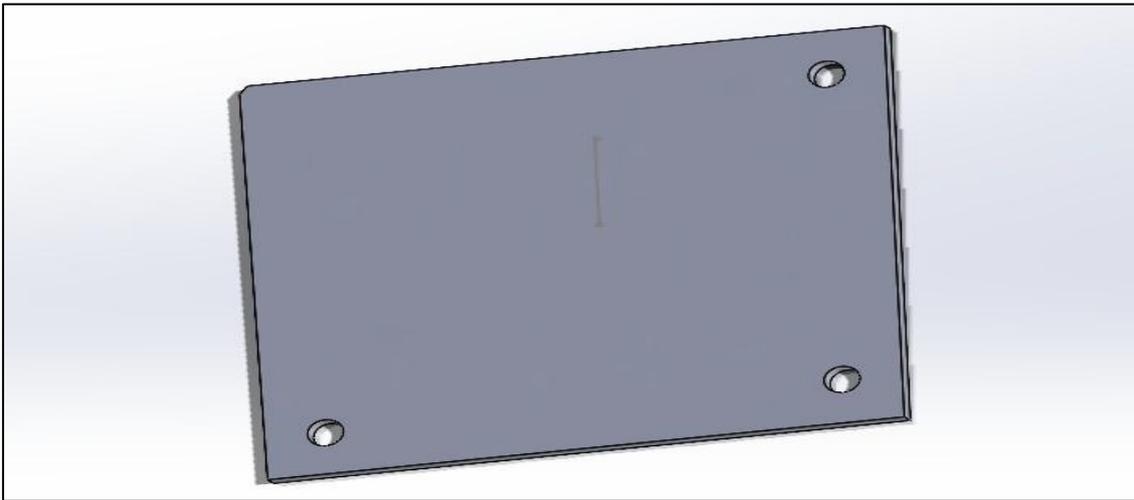


Nota: En la figura se observa el modelo en 3D del módulo que sujeta la sonda del sensor del PH, esta cuenta con una rosca que permite acoplar a la cubierta inferior del Nodo Sensor.

Otra de las secciones que se ha pensado es una placa de sujeción para el PCB, la cual se puede visualizar en la figura 47, en este caso el PCB deberá estar sujeto a esta placa, y esta a su vez estará sujeta a la base de PCB mostrada en la figura 44.

Figura 47.

Base de sujeción para PCB.



Nota: En la figura se observa el modelo en 3D de la plataforma en la cual se acoplará la placa electrónica, esta contiene orificios para ser instalada en la cubierta superior del Nodo Sensor.

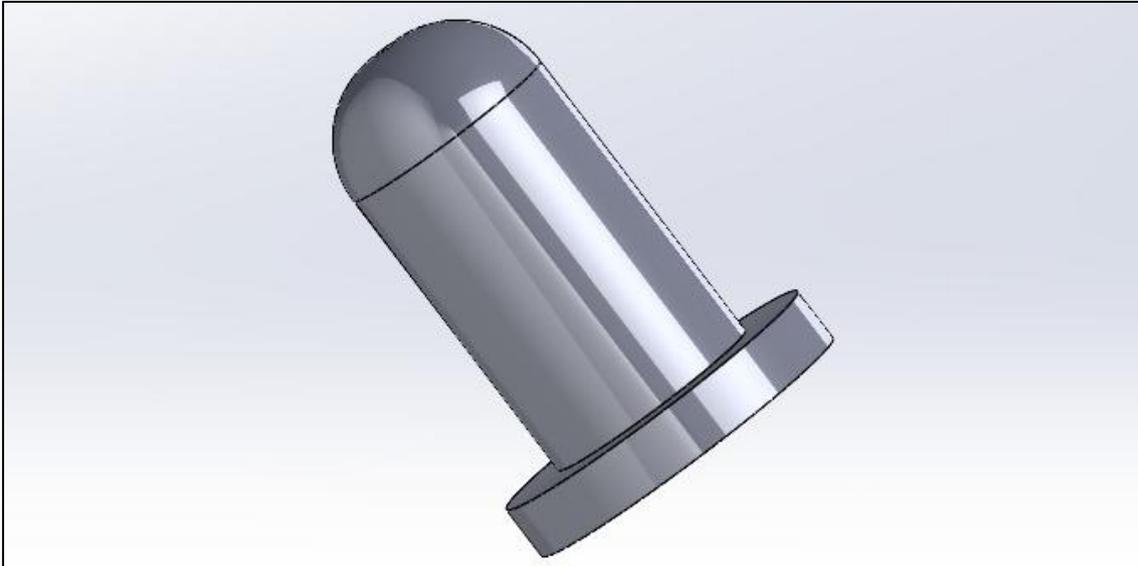
Por último, en la figura 48 se visualiza el modelo de cúpula a utilizar para los orificios tanto de LED como de antena especificados en la figura 43, estos son pensados para ser cubiertas impresas en Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), el cual es una especie de termoplástico utilizado en diferentes sectores industriales, destacando su uso en la parte eléctrica gracias a sus propiedades de aislamiento, también es muy utilizado en la fabricación de carcasas para teléfonos y computadoras. Tiene una alta resistencia a impactos y un cierto grado de flexibilidad (Hanger, 2024).

Este cuenta con un valor de permitividad relativa (ϵ_3) de 2.5 y una tangente de pérdida ($\tan\delta$) de 0.004 (Chletsou et al., 2022). Por ende, la atenuación de las ondas electromagnéticas es mínima y el material es adecuado para la construcción de carcasas de dispositivos de comunicación, ya que las señales de radiofrecuencia pueden atravesar

su estructura con una menor atenuación en comparación a otros materiales más conductivos.

Figura 48.

Cubierta de antena y LED.



Nota: En la figura se observa el modelo en 3D del módulo cilíndrico que termina en forma de cúpula, el cual está diseñado para actuar de cobertura tanto para la antena como para el LED indicador en la cubierta superior del Nodo Sensor.

3.6 FASE 3: Implementación.

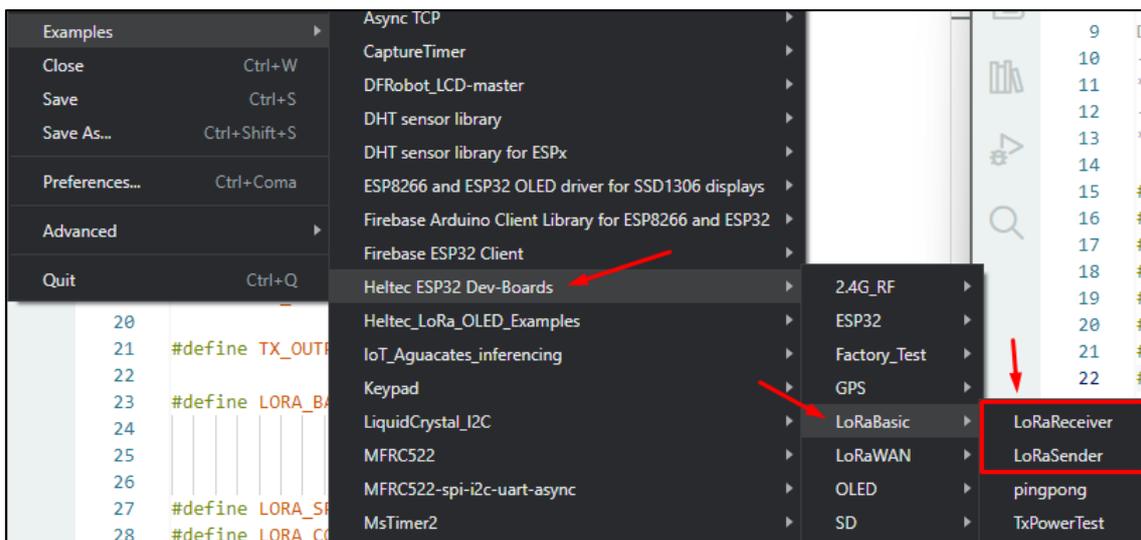
La fase de implementación abarca todo el proceso de construcción del sistema, incluyendo la programación de los módulos Heltec Wifi LoRa 32 V3 conforme a los aspectos definidos en la [Fase 2](#). Además, se lleva a cabo el ensamblaje de los dispositivos físicos, lo que implica la integración de las placas electrónicas con sus respectivos módulos y el ensamblaje de carcasas herméticas para su protección en el entorno operativo. Finalmente, se crea la base de datos en Firebase y se desarrolla una página web para la visualización de los datos.

3.6.1 Programación del sistema.

Para el caso de este trabajo de grado, se hace uso del código base que se encuentra en el ejemplo de la librería Heltec ESP32 Dev-Boards, denominado LoRaBasic, aquí se hace referencia a LoRaReceiver y LoRaSender (ver Figura 49). Estos son ejemplos bases configurados para una transferencia de un “Hello World” mediante el uso de la comunicación LoRa. Partiendo de esta base se genera el código correspondiente a los dispositivos (Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones), cabe resaltar que en este apartado se presentan las partes más importantes de los códigos de programación. El código completo se encuentra en un repositorio de GitHub, al cual se puede acceder mediante el ANEXO 2.

Figura 49.

Ejemplos de librería Heltec ESP32 Dev-Boards.



Nota: En la figura se puede visualizar el uso de la librería Heltec ESP32 Dev-Boards, con la selección de 2 ejemplos de comunicación para envío y recepción de datos.

3.6.1.1 Código de programación para Nodo Sensor.

La programación de la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, comienza con la inclusión de Librerías, en este caso se está utilizando la librería LoRaWan_App.h, Arduino.h y pins_arduino.h cuyo funcionamiento ya se ha establecido en la sección 3.5.5, en el cuadro

de código que se visualiza a continuación se presenta la inclusión de estas en el código de programación.

Fragmento de código 1.

```
1 #include "LoRaWan_APP.h"
2 #include "Arduino.h"
3 #include "pins_arduino.h"
4 ...
5 ;omitido!
6 ...
```

Una de las partes más importantes en la programación de las placas que se están utilizando en los 2 sistemas, es la definición de los parámetros de comunicación, los cuales ya se han explicado en la sección 3.5.4 en este fragmento de código se especifica la frecuencia a la que el sistema va a trabajar, en este caso 915MHz, también la potencia que se establece en 21 dBm, el ancho de banda que se establece como opción 0 (125kHz).

Mas abajo se definen el mayor Spreading Factor en un SF12 y posteriormente el Codingrate en la opción 4, la cual nos permite una relación de 4/8. El preámbulo del paquete se define como 12 mientras que el tiempo de espera en símbolos para la recepción se establece en 0, es decir que el módulo va a esperar indefinidamente o hasta que ocurra un evento de interrupción. Si visualizamos la definición “LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON” se establece con un valor “false”, puesto que se está utilizando un tamaño de carga útil variable (ver sección 3.5.4).

La definición “LORA_IQ_INVERSION_ON” también se establece en “false” impidiendo que el espectro de señal LoRa se invierta. El tiempo de espera para la recepción de paquetes se establece en 1 segundo y el tamaño de buffer en bytes para payload se establece en 30 (ver sección 3.5.4).

En el caso del Nodo Sensor se establecen 3 definiciones extra, las cuales se pueden visualizar al final del fragmento de código, aquí se define el pin 5 (Digital) de la placa para el uso del LED indicador, el pin 7 (Analógico) de la placa para la conexión de datos

del sensor de pH y el pin 6 (Analógico) de la placa para la conexión de datos del sensor de Turbidez.

Fragmento de código 2.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 #define RF_FREQUENCY          915000000 // Hz
5 #define TX_OUTPUT_POWER      21        // dBm
6 #define LORA_BANDWIDTH       0         // 0: 125 kHz
7                                 // 1: 250 kHz
8                                 // 2: 500 kHz
9                                 // 3: Reserved
10 #define LORA_SPREADING_FACTOR 12       // [SF7..SF12]
11 #define LORA_CODINGRATE       4        // 1: 4/5
12                                 // 2: 4/6
13                                 // 3: 4/7
14                                 // 4: 4/8
15 #define LORA_PREAMBLE_LENGTH 12       // Tx and Rx
16 #define LORA_SYMBOL_TIMEOUT  0        // Symbols
17 #define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
18 #define LORA_IQ_INVERSION_ON  false
19 #define RX_TIMEOUT_VALUE      1000
20 #define BUFFER_SIZE           30      // Payload Size
21
22 #define LED_PIN 5
23 #define PH_PIN 7
24 #define T_PIN 6
25 ...
26 ;omitido!
27 ...
```

El apartado void setup() contiene el código que especifica el arranque de los diferentes parámetros de configuración del sistema, dicho fragmento de código se ejecuta cada vez que el sistema se encienda. En este caso se comienza con la inicialización del puerto serial a 115200 baudios (Bd). El fragmento “Mcu.begin(HELTEC_BOARD, SLOW_CLK_TPYE)” inicializa el controlador MCU con una configuración específica para el módulo Heltec ESP32 LoRa, donde se indica el tipo de placa a utilizar así como la configuración del tipo de reloj.

La variable txNumber que se iguala a 0, simplemente se utilizara como variable de control en el conteo de la transmisión de paquetes, posterior a esto se encuentra la definición de 2 eventos “OnTxDone y OnTxTimeout” que se ejecutan como interrupción

cuando un paquete se ha transmitido y cuando hay un fallo en la transmisión respectivamente.

La función `Radio.Init()` inicializa el módulo de radio con la estructura correspondiente a los eventos configurados. Mas adelante se ejecutan los parámetros de comunicación que se definieron anteriormente en el código, esto se lo hace mediante `Radio.SetChannel ()` donde se llama a la frecuencia y `Radio.SetTxConfig()` donde se configuran el resto de los parámetros. Finalmente se establece el pin definido para el LED (5) en modo de salida.

Fragmento de código 3.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 void setup() {
5     Serial.begin(115200);
6     Mcu.begin(HELTEC_BOARD,SLOW_CLK_TPYE);
7
8     txNumber=0;
9
10    RadioEvents.TxDone = OnTxDone;
11    RadioEvents.TxTimeout = OnTxTimeout;
12
13    Radio.Init( &RadioEvents );
14    Radio.SetChannel( RF_FREQUENCY );
15    Radio.SetTxConfig(MODEM_LORA,TX_OUTPUT_POWER,0,LORA_BANDWIDTH,
16                      LORA_SPREADING_FACTOR,LORA_CODINGRATE,
17                      LORA_PREAMBLE_LENGTH,LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
18                      true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, 3000 );
19
20    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
21 }
22 ...
23 ;omitido!
24 ...
```

En el apartado `void loop()` se establece el conjunto de funciones y códigos que interactúan para lograr la transmisión de un paquete de datos, se inicia con una función “`LEDOff()`” la cual genera un apagado en el Led indicador y se abre una condición `if(lora_idle == true)`, la cual se encarga de comprobar si el módulo LoRa se encuentra

libre para la transmisión, de ser así se ejecuta una espera de 2.5 segundos con el objetivo de esperar que el receptor pueda leer cada paquete de datos.

Las funciones PH() y TURBIDEZ() están creadas específicamente para la lectura de los sensores, donde el dato obtenido se almacena en las variables “tur, pH”, seguidamente se genera un contador “npaquete++” que se encarga del conteo de paquetes transmitidos.

La parte más importante del envío de datos es el “sprintf” que se muestra en el código a continuación, aquí se establece la cadena de texto en la cual se ingresan los valores tanto del sensor de Turbidez, pH y el contador de paquetes, este almacena dicha cadena de texto en la variable “txpacket”. Posterior a esto se realiza el envío de los datos contenidos en esta variable por medio de la función “Radio.send()” donde se especifica que el paquete se convierte en un puntero “uint8_t*” para poder ser transmitido por el módulo LoRa.

Finalmente se establece la variable “lora_idle” en “false” que indica que el módulo de transmisión LoRa se encuentra ocupado en una transmisión, después de esto se ejecutara la interrupción correspondiente mediante la función “Radio.IrqProcess()” ya sea que el paquete se haya transmitido con éxito o que se haya generado un error en la transmisión.

Fragmento de código 4.

```
1 void loop()
2 {
3 ...
4 ;omitido!
5 ...
6 LEDoff();
7 if(lora_idle == true)
8 {
9 delay(2500);
10 PH();
11 TURBIDEZ();
12 npaquete++;
13 ...
14 ;omitido!
```

```

...
15  sprintf(txpacket, " B: %0.0f -TS: %llu -Turbidez: %0.0f -PH: %0.2f -PN:
    %d", tur, pH, npaquete);
16  ...
17  ;omitido!
18  ...
19  Radio.Send( (uint8_t *)txpacket, strlen(txpacket));
20  lora_idle = false;
21  }
22  Radio.IrqProcess();
23  }
24  ...
25  ;omitido!
26  ...

```

3.6.1.2 Código de programación para Boya de Comunicaciones.

En el caso de la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3 que comprende a la Boya de Comunicaciones, se incluyen 8 librerías para su funcionamiento, cuyo funcionamiento se especifica en la sección 3.5.5 entre las que se han agregado aparte de las que utiliza en Nodo Sensor, son “SSD1306Wire.h” para el control de la pantalla OLED de la placa, “WiFi.h” para la conexión hacia la red Wifi mediante el módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3, “FirebaseESP32.h” que facilita la conexión hacia la base de datos y “NTPClient.h” que permite la sincronización de la hora actual.

Fragmento de código 5.

```

1  #include "LoRaWan_APP.h"
2  #include "Arduino.h"
3  #include "SSD1306Wire.h"
4  #include "pins_arduino.h"
5  #include <WiFi.h>
6  #include <FirebaseESP32.h>
7  #include <NTPClient.h>
8  #include <WiFiUdp.h>
9  ...
10 ;omitido!
11 ...

```

Seguidamente se definen los parámetros de conexión (ver sección 3.5.4) que deben ser similares al dispositivo de transmisión, puesto que el receptor debe conocer como el transmisor está enviando el paquete para poder generar una conexión estable, en

el siguiente código se especifican los parámetros, los cuales son idénticos al código ya explicado para el Nodo Sensor.

Fragmento de código 6.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 #define RF_FREQUENCY          915000000 // Hz
5 #define TX_OUTPUT_POWER      21        // dBm
6 #define LORA_BANDWIDTH       0         // 0: 125 kHz
7                                 // 1: 250 kHz
8                                 // 2: 500 kHz
9                                 // 3: Reserved
10 #define LORA_SPREADING_FACTOR 12       // [SF7..SF12]
11 #define LORA_CODINGRATE      4         // 1: 4/5
12                                 // 2: 4/6
13                                 // 3: 4/7
14                                 // 4: 4/8
15 #define LORA_PREAMBLE_LENGTH 12       // Tx and Rx
16 #define LORA_SYMBOL_TIMEOUT  0         // Symbols
17 #define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
18 #define LORA_IQ_INVERSION_ON false
19 #define RX_TIMEOUT_VALUE      1000
20 #define BUFFER_SIZE           30       // Payload Size
21 ...
22 ;omitido!
23 ...
```

En este caso se utilizan otras definiciones, primeramente, se define el pin 5 para uso del Led indicador, luego se definen las configuraciones de la red Wifi a la que se va a conectar el módulo, en este caso mediante el SSID y el PASSWORD. Finalmente se definen los parámetros de HOST y de Autenticación de Firebase para la respectiva conexión.

Fragmento de código 7.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 // Definición de LED
5 #define LED_PIN 5
6
7 //Configuración de red WIFI
8 #define WIFI_SSID "UTN_TEL_DAMR"
9 #define WIFI_PASSWORD "clave_wifi"
10
11 //Configuración de Firebase
12 #define FIREBASE_HOST "tesis-df568-default-rtdb.firebaseio.com"
```

```
13 #define FIREBASE_AUTH "AIzaSyBI99mOuBtOuR7OqzSdZyYKgKcxGIEhKCU"
14 ...
15 ;omitido!
16 ...
```

En el siguiente fragmento de código se especifica los parámetros de conexión hacia el servidor NTP, en este caso se crea un objeto “WiFiUDP” para ser utilizado en la conexión, ya que este utiliza el protocolo UDP. Acto seguido se asigna el objeto al cliente NTP y se especifica la dirección del servidor así como los desfases horarios en segundos que representa la zona horaria UTC-5.

Fragmento de código 8.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 //Configuración de NTP
5 WiFiUDP ntpUDP;
6 NTPClient timeClient(ntpUDP, "pool.ntp.org", -18000, 60000);
7 ...
8 ;omitido!
9 ...
```

Seguidamente se utiliza un fragmento de código que asigna parámetros de inicialización para la pantalla OLED de la placa, en este caso se lo asigna al objeto “display2()”. Aquí se asigna la dirección de la pantalla OLED así como los pines de comunicación I2C.

Fragmento de código 9.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 //Inicialización de pantalla OLED
5 SSD1306Wire display2(0x3c, SDA_OLED, SCL_OLED);
6 ...
7 ;omitido!
8 ...
```

El “void setup()” que se utiliza en esta placa es más extenso que en la placa del Nodo Sensor, puesto que en este caso se manejan parámetros y comunicaciones

adicionales. El fragmento de código se ejecuta cada vez que el sistema se encienda. En este caso se comienza con la inicialización del puerto serial a 115200 baudios (Bd).

Nuevamente el “Mcu.begin(HELTEC_BOARD, SLOW_CLK_TPYE)” inicializa el controlador MCU con una configuración específica para el módulo Heltec ESP32 LoRa, donde se indica el tipo de placa a utilizar así como la configuración del tipo de reloj.

De igual forma la variable txNumber se iguala a 0, para el conteo de la recepción de paquetes, posterior a esto se define un evento “OnRxDone” que se ejecutan como interrupción cuando un paquete ha sido recibido con éxito.

Aquí también se utiliza la función Radio.Init() que inicializa el módulo de radio con la estructura correspondiente al evento configurado. Mas adelante se ejecutan los parámetros de comunicación que se definieron anteriormente en el código, esto se lo hace mediante Radio.SetChannel () donde se llama a la frecuencia y Radio.SetTxConfig() donde se configuran el resto de los parámetros.

Posterior a esto se ejecutan algunas funciones de inicialización, en este caso se establece el pin del Led (5) en modo de salida y se llama a la función “VexON()” la cual permite que se habilite o deshabilite el pin vex para la alimentación de la pantalla OLED. Hecho esto se resetea la pantalla con el uso de la función “display2.Reset()” y se procede a iniciar esta con la función “display2.Init()”, se ejecuta una función “display2.flipScreenVertically()” que permite orientar la pantalla OLED de forma vertical y posteriormente se asigna el tipo de letra en ArialMT tamaño 10.

Finalmente se utilizan 5 funciones de inicio de los sistemas que van a funcionar en esta placa, el primero es la función “InicioSistema()” donde se presentara en la pantalla OLED información de que el sistema se está encendiendo, luego se ejecuta la función “ConexionWifi()” esta permite generar la conexión hacia la red Wifi con los

parámetros definidos anteriormente, después se ejecuta la función “ConexiónNTP” que genera una conexión con el servidor NTP y del mismo modo se genera una conexión y autenticación con la base de datos Firebase mediante la función “InicioFirebase()”. Una vez que se hayan ejecutado estos procesos el módulo pasara a modo de recepción de datos gracia a la función “EsperaConexión()”.

Fragmento de código 10.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 Void setup() {
5     Serial.begin(115200);
6     Mcu.begin(HELTEC_BOARD,SLOW_CLK_TPYE);
7     txNumber=0;
8
9     RadioEvents.RxDone = OnRxDone;
10    Radio.Init( &RadioEvents );
11    Radio.SetChannel( RF_FREQUENCY );
12    Radio.SetRxConfig(MODEM_LORA, LORA_BANDWIDTH,LORA_SPREADING_FACTOR,
13                      LORA_CODINGRATE, 0, LORA_PREAMBLE_LENGTH,
14                      LORA_SYMBOL_TIMEOUT,LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
15                      0, true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, true );
16
17    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
18    VextON();
19    displayReset();
20    display2.init();
21    display2.flipScreenVertically();
22    display2.setFont(ArialMT_Plain_10);
23    InicioSistema();
24    ConexionWifi();
25    ConexionNTP();
26    InicioFirebase();
27    EsperaConexion();
28 }
29 ...
30 ;omitido!
31 ...
```

La función “OnRxDone” es un callback, puesto que se ejecuta de forma automática en caso de que el módulo reciba un paquete de datos, esta maneja los datos recibidos para mostrar la información que contiene. En este caso se utiliza “unit8_t *payload” como putero de datos para obtener los datos relevantes del array, luego se utiliza “int16_t size” para obtener el tamaño en bytes del paquete recibido, también se

utiliza “init15_t rssi” para obtener el parámetro de intensidad de señal con la que se recibió el paquete y por último se utiliza “int8_t snr” para obtener la relación señal/ruido con la que se recibió el paquete.

Dentro de esta función se toman los datos de rssi y snr y se almacenan en variables globales para ser utilizados posteriormente. La función “memcpy()” copia el mensaje recibido en el payload y lo almacena en el buffer “rxpacket” agregando un “\0” al final para que el mensaje se trate como un String. Seguidamente se pone el módulo LoRa en modo “sleep” mediante el uso de la función “Radio.Sleep()” para ahorrar energía mientras los datos se procesan.

El comando “Serial.printf()” mostrara el paquete recibido en el puerto serial con la estructura “Paquete recibido \">%s\<Potencia: %d ,Senal/Ruido: %d , longitud: %d” destacando que los datos se encuentran ya almacenados en las variables “rxpacket, rxrssi, rsnr y rxSize”. Seguido de esto el módulo LoRa se libera con “lora_idle = true”, y el paquete se guarda en una variable global “rxString”.

Ahora se ejecutan 5 funciones, la primera “parametrosrec()” se encarga de extraer los valores del paquete de datos, esencialmente los que hacen referencia a pH, Turbidez y Numero de paquete y los almacena en variables globales como datos independientes. Seguidamente se ejecuta la función “ActualizarNTP()” con el objetivo de almacenar la hora de llegada del paquete y mediante la función “EnvioFirebaseG()” se crea una estructura JSON que se verá más adelante, la cual es enviada hacia Firebase para almacenar los datos recibidos.

Otra función para ejecutar es “EnvioFirebaseA”, la cual es una actualización de las variables almacenadas en Firebase con los datos recibidos, lo que permite la visualización en tiempo real desde la interfaz de usuario. Por último se ejecuta la función

“imprimirPantalla()” que muestra los datos recibidos en la pantalla OLED del módulo Heltec Wifi LoRa 32 V3.

Fragmento de código 11.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 void OnRxDone(uint8_t *payload, int16_t size, int16_t rssi, int8_t snr)
5 {
6     rxrssi=rssi;
7     rsnr=snr;
8     memcpy(rxpacket, payload, size );
9     rxpacket[size]='\0';
10    Radio.Sleep( );
11    Serial.printf("\r\nPaquete recibido \"%s\" <Potencia: %d ,...
12    ... Senal/Ruido: %d , longitud: %d \r\n>",rxpacket,rxrssi,rsnr,rxSize);
13    lora_idle = true;
14    rxString=rxpacket;
15
16    parametrosrec();
17    ActualizarNTP();
18    EnvioFirebaseG();
19    EnvioFirebaseA();
20    imprimirPantalla();
21 }
22 ...
23 ;omitido!
24 ...
```

En el apartado de “void loop()” se ejecuta el código para que el sistema funcione, en este caso se inicia limpiando la pantalla OLED mediante “display2.clear()”, seguidamente mediante la condición “if (lora_idle)” se comprueba si el módulo de comunicación LoRa se encuentra disponible, es decir no se encuentra en la recepción, de ser así se establece este valor en “false” indicando que el módulo se encuentra en la recepción y se informa en el serial.

Gracias a la función “Radio.Rx(0)” el módulo LoRa se pone en la recepción indefinida, es decir que esperara hasta recibir un paquete y se ejecuta la función “LEDOff()” para apagar el Led indicador. Por último se ejecuta la función “Radio.IrqProcess()” que ejecuta las interrupciones necesarias, en este caso cuándo se recibe un paquete ejecutara el llamado a la función OnRxDone().

Fragmento de código 12.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 void loop() {
5     display2.clear();
6     if(lora_idle)
7     {
8         lora_idle = false;
9         Serial.println("into RX mode");
10        Radio.Rx(0);
11        LEDoff();
12    }
13    Radio.IrqProcess( );
14 }
15 ...
16 ;omitido!
17 ...
```

En el siguiente fragmento de código se muestra la estructura JSON que se utiliza para el envío de los datos hacia Firebase, en este se envían: Hora, Timestamp, pH, Turbidez, RSSI, RSNR y Numero de paquete. Para ello se genera una ruta de guardado la cual es “/HistorialDeDatos/” que ira almacenando un dato tras otro en base a su timestamp. Esta función se ejecuta cada que un paquete es recibido.

Fragmento de código 13.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 void EnvioFirebaseG(){
5     // Crear estructura de datos para Firebase
6     FirebaseJson json;
7     json.set("Hora", Hora);
8     json.set("Timestamp", timestamp);
9     json.set("pH", phValue);
10    json.set("Turbidez", TurbidezValue);
11    json.set("RSSI", rxrssi);
12    json.set("RSNR", rsnr);
13    json.set("NumeroPaquete", npaquete);
14
15    // Generar una ruta única para guardar el historial
16    path = "/HistorialDeDatos/" + String(timestamp);
17
18    // Enviar el dato a Firebase
19    if (Firebase.set(firebaseData, path, json)) {
20        Serial.println("Se han almacenado los datos en Firebase.");
21    } else {
22        Serial.println("Error al enviar dato: " + firebaseData.errorReason());
23    }
}
```

```
24 }
25 ...
26 ; omitido!
27 ...
```

3.6.2 PCB Nodo Sensor.

El resultado después de realizar la impresión en la placa es el PCB que se puede visualizar en la figura 50, en esta se realizará la instalación de cada uno de los componentes electrónicos para su correspondiente soldado.

Figura 50.

Placa impresa de Nodo Sensor.



Nota: En la figura se puede visualizar la PCB que se ha obtenido a partir del esquema representado en la figura 29.

En la figura 51 se aprecia el PCB ya ensamblado con las correspondientes regletas hembra, en este caso las 2 líneas de regletas centrales son las que se utilizan para la conexión del módulo LoRa Wifi V3, se hace uso de 2 sockets de color blanco que sirven para la conexión del LED con su respectiva resistencia de 330Ω y para la batería, también se aprecia un interruptor de encendido y apagado de la placa.

Figura 51.

PCB de Nodo Sensor.

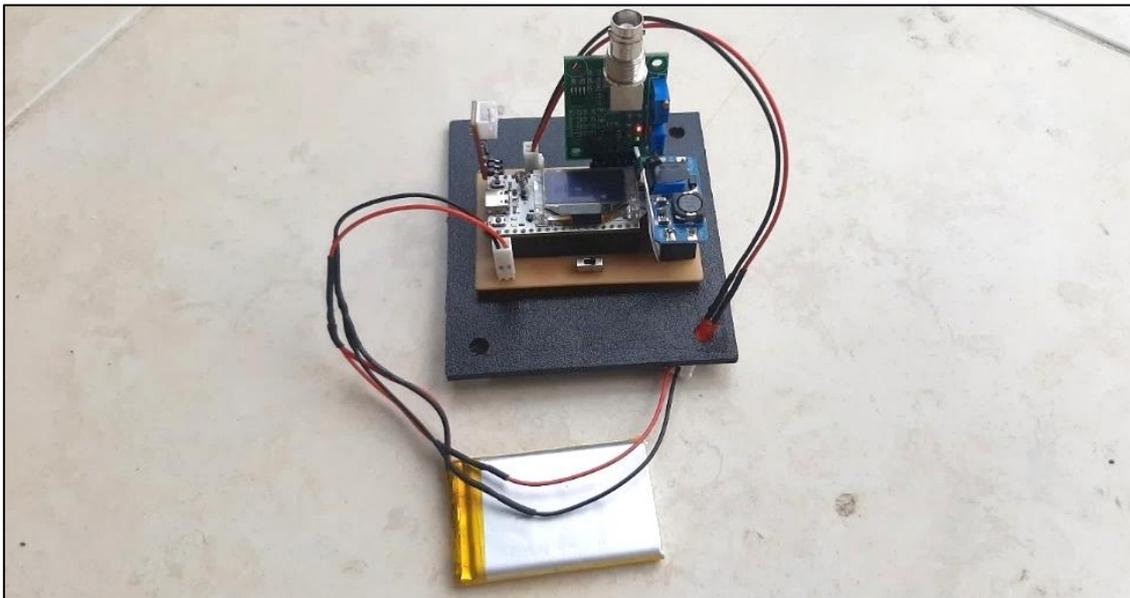


Nota: En la figura se puede visualizar la PCB armada con los diferentes componentes ya en su estructura.

Una vez que ya se tiene el PCB armado, se procede a colocar cada uno de los dispositivos electrónicos que se hacen parte de este módulo, en este caso, su distribución se puede apreciar en la figura 52. Este será el módulo que se utilice en el Nodo Sensor.

Figura 52.

Placa para Nodo Sensor montada.



Nota: En la figura se puede visualizar la PCB con datos los componentes electrónicos conectados, aquí vemos el primer vistazo a la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3 que se encuentra como eje central de la PCB que se utilizara en el Nodo Sensor.

3.6.3 PCB para Boya de Comunicaciones.

Posteriormente se realiza la Impresión de la placa PCB cuyo resultado se observa en la Figura 53, en ella se espera realizar la instalación de los diferentes componentes que integran el funcionamiento del sistema para la Boya de Comunicaciones.

Figura 53.

Placa impresa de Boya de Comunicaciones.

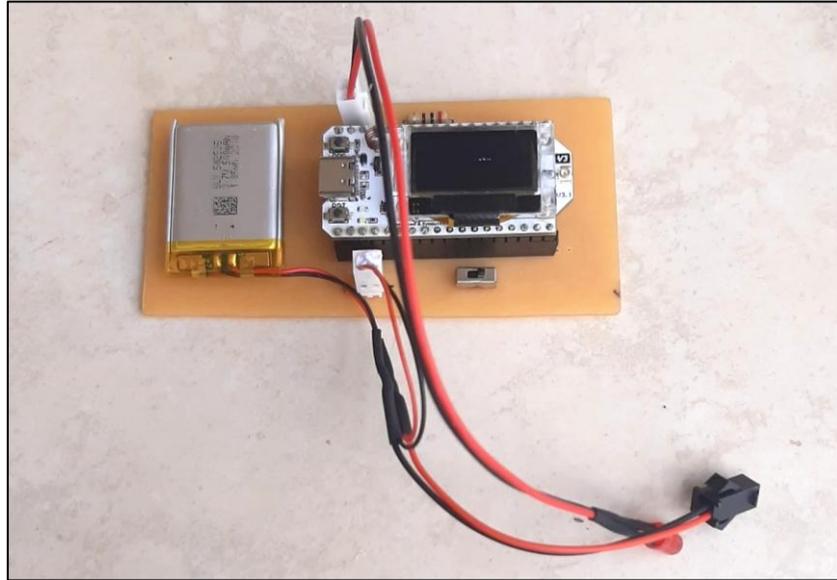


Nota: En la figura se puede visualizar la PCB que se ha obtenido a partir del esquema representado en la figura 34.

La placa final que se utilizara en la Boya de Comunicaciones se puede visualizar en la figura 54, aquí se tiene el circuito montado completamente, en este caso se cuenta con el acoplamiento de la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3, la cual cuenta con una conexión directa a una batería de 3.3V, un interruptor de encendido y apagado y la salida del LED indicador que está conectado a la resistencia de 330 Ω .

Figura 54.

Placa de Boya de Comunicaciones montada.



Nota: En la figura se puede visualizar la PCB con los componentes electrónicos conectados y que se están utilizando en la Boya de Comunicaciones.

3.6.4 Nodo Sensor.

A partir del diseño en 3D presentado en la sección [3.5.8](#), se presenta la estructura del Nodo Sensor con una capa de pintura color naranja para una mejor visualización del mismo en el agua. El resultado se lo puede visualizar en la Figura 55. Aquí se muestra la cubierta superior y la cubierta inferior sin los dispositivos electrónicos instalados.

Figura 55.

Cubierta superior e inferior de Nodo Sensor.



Nota: En la figura se puede visualizar la cubierta superior e inferior impresas, sin ningún tipo de instalación electrónica.

En la Figura 56 se muestra el resultado de la impresión del recubrimiento para la antena del dispositivo, fabricado en Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), como se explicó en la Sección [3.5.8](#). Es importante destacar que esta cubierta debe instalarse en la parte superior del Nodo Sensor.

Figura 56.

Cubierta de antena para Nodo Sensor.



Nota: En la figura se puede visualizar la cubierta de resina ABS que se utilizará para proteger la antena LoRa.

En la Figura 57 se muestra la cubierta para el LED indicador, impresa en Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). Se aprovechan sus propiedades translúcidas para facilitar la visualización de la luz emitida por el LED.

Figura 57.

Cubierta de LED para Nodo Sensor.



Nota: En la figura se puede visualizar la cubierta de resina ABS que se utilizará para proteger el LED indicador.

La Figura 58 muestra los tapones utilizados para sellar los orificios de la carcasa donde se ubican los sensores. Estos tapones permiten probar la comunicación entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones sin necesidad de instalar los sensores.

Figura 58.

Tapas de cobertura para orificios de sensores.



Nota: En la figura se puede visualizar las tapas de cierre de los orificios en los que van ubicados los sensores.

La carcasa que protege el sensor de turbidez se muestra en la Figura 59. En este diseño, el sensor se ubica dentro de la carcasa, dejando expuestos únicamente el emisor y el receptor de luz, lo que permite la medición de la turbidez del agua. Además, se observa el uso de anillos de caucho para garantizar un sellado a presión mediante el enroscado del módulo a la carcasa del Nodo Sensor (ver Figura 61).

Figura 59.

Cubierta para sensor de Turbidez.



Nota: En la figura se puede visualizar el módulo de cobertura que contiene el sensor de Turbidez de agua.

En el caso del sensor de pH, la Figura 60 muestra el módulo impreso diseñado para sujetar la sonda. Se observa que la sonda atraviesa el interior del módulo, lo que permite que la rosca encaje en la carcasa del Nodo Sensor, asegurando que una parte de la sonda esté en contacto con el agua (ver Figura 61).

Figura 60.

Sujetador para sonda pH.



Nota: En la figura se puede visualizar la sonda de pH con su respectivo sujetador hermético.

Una vez ensamblados los módulos de los sensores, el siguiente paso es acoplarlos a la carcasa, específicamente a la cubierta inferior. En este proceso, los sensores se enroscan en los orificios diseñados para cada uno. El resultado se puede observar en la Figura 61-a, donde se muestran las dos piezas de los sensores ya acopladas desde el interior, así como las partes externas que estarán en contacto con el agua (Figura 61-b).

Figura 61.

Sensores instalados en cubierta inferior.



(a)

(b)

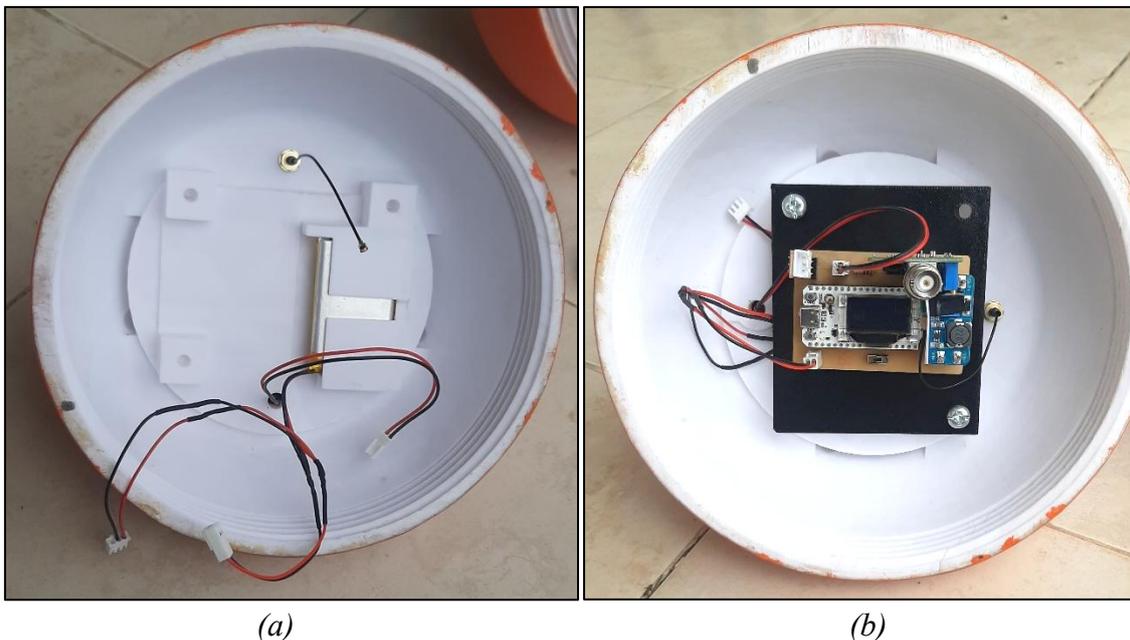
Nota: En la figura se puede visualizar la cubierta inferior con los respectivos sensores acoplados.

La cubierta superior es el lugar donde se instalan tanto el LED indicador como la antena de transmisión. En la Figura 62-a, se puede se puede observar la instalación de

estos dos elementos, cuyo aspecto exterior se muestra en la Figura 64. Además, se aprecia el compartimiento donde se aloja la batería encargada de la alimentación del sistema. Por otro lado, en la Figura 62-b, se muestra la instalación del PCB presentado en la Figura 52, con todos sus componentes electrónicos ensamblados. Este se monta sobre una base diseñada para su sujeción, lo que garantiza la estabilidad del módulo.

Figura 62.

Elementos de cubierta superior.



Nota: En la figura se puede visualizar la cubierta superior tanto con el acople de la batería en su estructura (a), así como la instalación de la placa electrónica (b).

En la Figura 63 se muestran ambas cubiertas, tanto la superior como la inferior, con los componentes electrónicos ya instalados. Además, se observa la conexión de los sensores de la cubierta inferior con los módulos de acondicionamiento ubicados en la cubierta superior. Este diseño del interior del Nodo Sensor garantiza la protección de los componentes electrónicos en el entorno subacuático.

Figura 63.

Elementos y conexión interna de Nodo Sensor.



Nota: En la figura se puede visualizar toda la conexión de los componentes electrónicos que integran al Nodo Sensor, en este caso las sondas se encuentran conectadas a la placa electrónica.

Una vez analizado el interior del Nodo Sensor, es momento de presentar su parte exterior. En la Figura 64 se observa cómo el LED indicador y la antena de transmisión sobresalen desde el interior de la carcasa, protegidos por las cápsulas diseñadas en la Figura 48, las cuales, como se mencionó anteriormente, están impresas en Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).

Asimismo, se aprecia la sonda del sensor de pH y el sensor de turbidez, ambos en contacto directo con el agua. Es importante destacar que la cubierta superior e inferior están acopladas mediante una rosca intermedia y selladas a presión con un anillo de caucho, lo que evita la entrada de agua.

Por otro lado, se observa que el módulo está recubierto con una capa de pintura naranja, lo que facilita su visibilidad. Además, su revestimiento, como se explicó previamente, está hecho de resina poliéster.

Figura 64.

Nodo Sensor.



Nota: En la figura se puede visualizar el Nodo Sensor ensamblado en su totalidad, tanto con su antena LoRa, LED indicador y sensores.

3.6.5 Boya de Comunicaciones.

Para proteger los dispositivos electrónicos que conforman la Boya de Comunicaciones, se utiliza una caja de protección eléctrica con clasificación IP65, lo que significa que es resistente al polvo y al agua en forma de chorro (Serrano, 2015). Esto es importante ya que la Boya permanece suspendida en la superficie del agua, con la única parte sumergida siendo la antena.

En este caso, la antena de recepción está recubierta por una cápsula de Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), al igual que en el Nodo Sensor. En la Figura 65 se puede observar tanto la caja de protección como la antena que sobresale de la misma.

Figura 65.

Cubierta de circuito y antena de Boya de Comunicaciones.

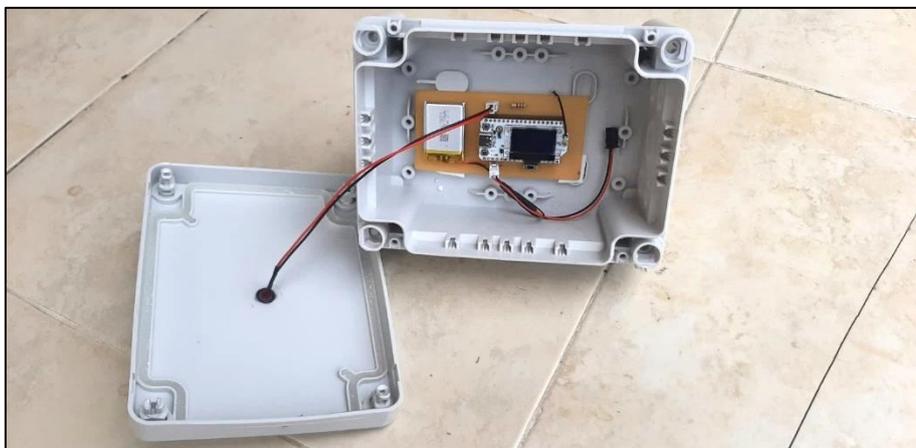


Nota: En la figura se puede visualizar la caja de pase eléctrica utilizada como cobertura de los componentes electrónicos de la Boya de Comunicaciones con la antena LoRa insertada en su estructura.

El interior de esta caja de protección se muestra en la Figura 66. En ella se instala la PCB presentada en la Figura 54, la cual está sujeta al interior de la caja. Además, se puede observar la conexión hacia el LED indicador, el cual está acoplado en la tapa de la caja de protección.

Figura 66.

Interior de cubierta de Boya de Comunicaciones.



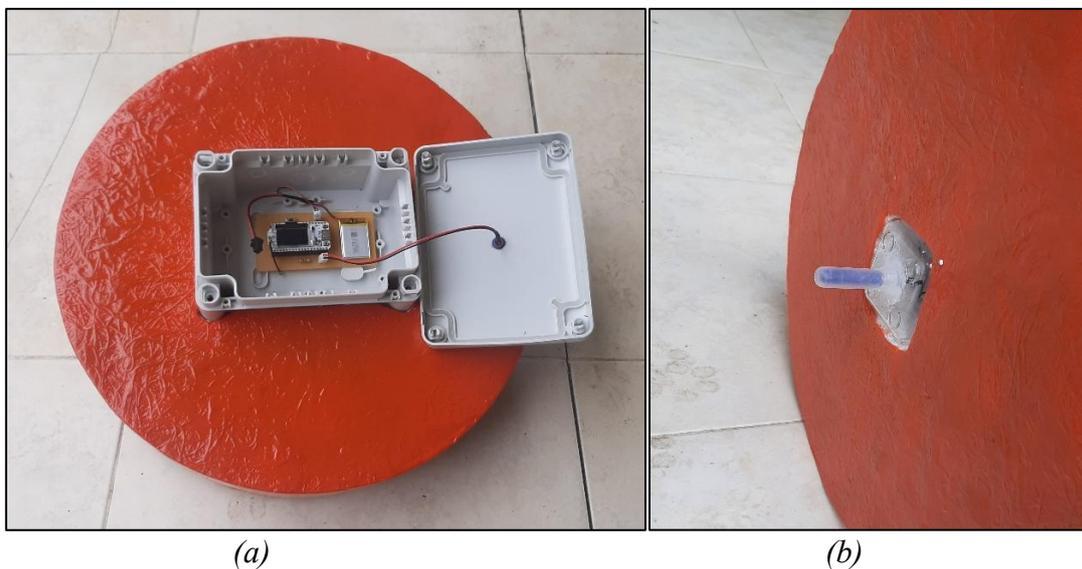
Nota: En la figura se puede visualizar el interior de la caja de pase eléctrico, en el cual se encuentra la placa utilizada para el sistema de la Boya de Comunicaciones.

Como se especificó en la sección [3.3](#), el material de la estructura que compone la Boya de Comunicaciones debe ser flotante, por lo que se utiliza poliestireno expandido, el cual tiene una alta flotabilidad.

La caja de protección se acopla sobre un círculo de poliestireno expandido recubierto con resina poliéster (ver ANEXO 4), ubicándose en su parte superior (Figura 67-a), de manera que solo la antena de recepción sobresalga en la parte inferior (Figura 67-b). Esta antena estará en constante contacto con el agua.

Figura 67.

Material flotante de Boya de Comunicaciones.

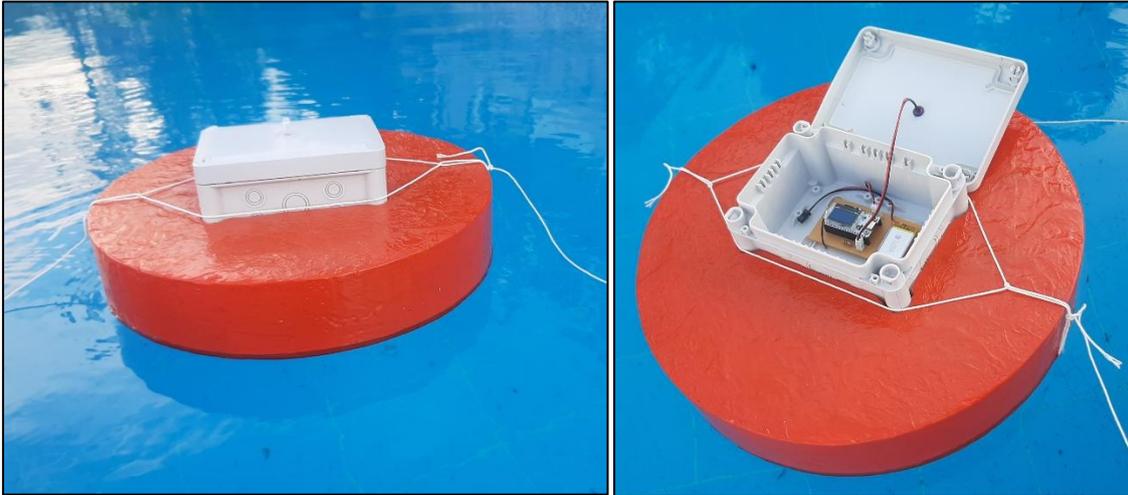


Nota: En la figura se puede visualizar el material flotante de la Boya de Comunicaciones y el acople de la caja de protección del circuito (a), así como la salida de la antena LoRa en la parte inferior (b).

En la Figura 68 se muestra la Boya de Comunicaciones en un entorno acuático (piscina), donde se observa su flotabilidad, así como la caja de protección cerrada, permitiendo ver el LED indicador. También se muestra la caja abierta, donde se pueden visualizar los componentes electrónicos en su interior.

Figura 68.

Boya de Comunicaciones.



Nota: En la figura se puede visualizar la Boya de Comunicaciones en funcionamiento flotando sobre el agua.

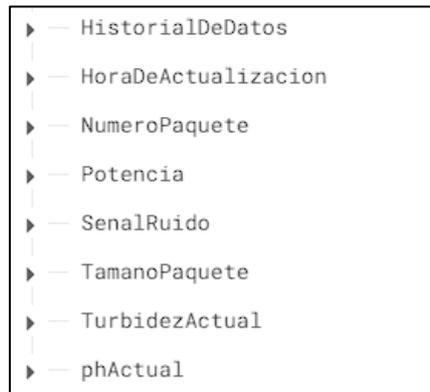
3.6.6 Firebase e Interfaz de Usuario.

La base de datos Firebase permite almacenar datos en formato JSON, organizados en una estructura de árbol, característicamente es una base de datos NoSQL, tiene una característica de datos no estructurados ya que no se organizan ni en tablas ni en filas (Firebase, 2024). La configuración de Firebase facilita la sincronización en tiempo real entre los dispositivos conectados a la plataforma, lo que permite visualizar los datos en una interfaz de usuario al mismo tiempo que se actualizan en la base de datos.

En este trabajo se utilizan ocho ramas, cada una con información estructurada en su interior. Se han definido dos tipos de datos: una de las ramas, denominada "HistorialDeDatos", almacena un registro histórico de la información recopilada, mientras que las otras siete ramas están destinadas a la actualización en tiempo real de datos individuales (ver Figura 69).

Figura 69.

Estructura JSON general en Firebase.



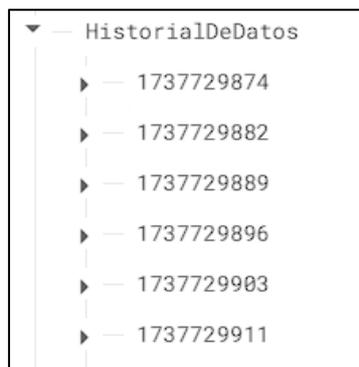
Nota: En la figura se puede visualizar la estructura JSON general donde se aprecian los parámetros que contienen dentro de sí diferentes variables de almacenamiento.

La estructura HistorialDeDatos hace referencia al formato JSON enviado desde la Boya de Comunicaciones, definido en el Fragmento de código 13 de la sección [3.6.1.2](#). En esta estructura se almacenan los datos recibidos desde la boya, etiquetándolos con un timestamp correspondiente a la marca de tiempo del paquete en la recepción. Cada nueva actualización que llega a Firebase se guarda de forma secuencial sin sobrescribir los datos anteriores (ver Figura 70).

El almacenamiento de este historial permite generar gráficas en tiempo real, facilitando el análisis del comportamiento de las variables del sistema para su posterior evaluación.

Figura 70.

Estructura JSON de Historial de datos en Firebase.

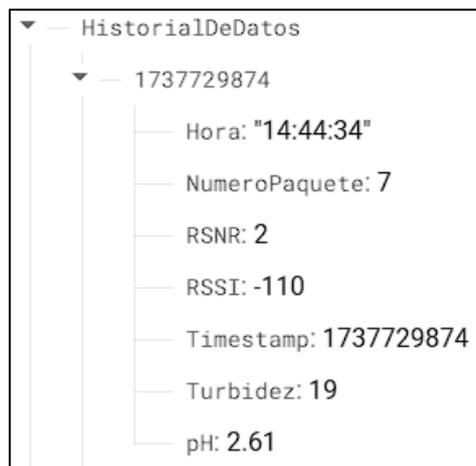


Nota: En la figura se aprecia la estructura JSON en Firebase dentro de la rama de HistorialDeDatos la cual contiene diferentes secciones almacenadas a modo de Timestamp.

Dentro de cada timestamp, se encuentra estructurado el paquete enviado por la Boya de Comunicaciones. En esta sección se almacenan variables como la hora de actualización, el número de paquete enviado, el valor de SNR, el valor de RSSI, así como el propio timestamp y los valores registrados por los sensores de pH y turbidez (ver Figura 71).

Figura 71.

Estructura JSON de Historial por timestamp en Firebase.

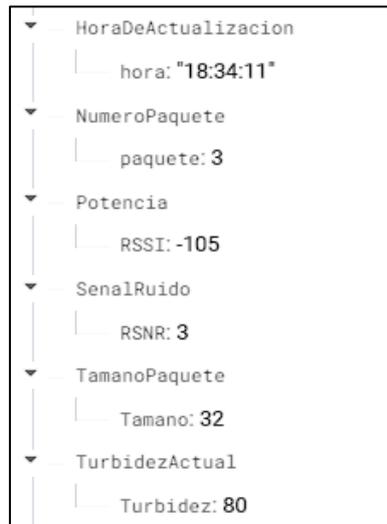


Nota: En la figura se aprecia la estructura JSON desplegada completamente, donde se visualizan las variables almacenadas dentro de cada Timestamp.

Por otro lado, las estructuras de actualización individuales también actualizan automáticamente los datos recibidos, pero en este caso sobrescriben el valor de la variable en tiempo real (ver Figura 72). Esto permite la lectura desde la interfaz de usuario, facilitando la visualización de cómo cambia cada parámetro en tiempo real (ver Figura 73).

Figura 72.

Estructura JSON de parámetros individuales en Firebase.



Nota: En la figura se aprecia la estructura JSON desplegada de los parámetros individuales utilizados para la actualización en tiempo real.

Para la interfaz de usuario, se ha desarrollado una página web utilizando lenguajes de programación como HTML, CSS y JavaScript. En esta plataforma, es posible visualizar en tiempo real los parámetros enviados desde la Boya de Comunicaciones, así como el funcionamiento general del sistema. El diseño de la interfaz de usuario se muestra en la Figura 73.

Figura 73.

Interfaz de Usuario – Pagina Web.





Nota: En la figura se aprecia la interfaz de usuario donde se pueden visualizar los datos extraídos desde Firebase tanto en tiempo real como en graficas de historial de datos.

3.7 FASE 4: Simulación.

La fase final consiste en una breve simulación en MATLAB, basada en la comunicación punto a punto (P2P) entre dos dispositivos ubicados a una distancia determinada. Su objetivo es determinar los parámetros esenciales de la comunicación para evaluar la viabilidad del enlace, es decir, comprobar si la señal puede ser captada por el receptor o si se atenúa hasta perderse en el medio.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación, los cuales se pueden visualizar en la sección [4.1](#). se procede a definir los parámetros físicos con los que se trabajará. Para este caso, se establece una frecuencia de 915 MHz en la variable “f”, correspondiente a la frecuencia utilizada en la comunicación LoRa. A continuación, se definen las distancias

a simular, las cuales se han organizado en un array que abarca desde 10 cm hasta 15 m, con incrementos de 50 cm en cada fase de simulación. Estas distancias se almacenan en la variable “d”.

Otro parámetro considerado en la simulación es la velocidad de la luz, cuyo valor se establece en 3×10^8 m/s y se asigna a la variable “c”. Además, se define una potencia de transmisión inicial de 21 dBm, almacenada en la variable "Pt_dBm". Esta se convierte a watts utilizando la ecuación 18 (Balanis A, 2016) y su resultado se asigna a la variable “Pt”.

$$P_W = 10 \left(\frac{P_{dBm} - 30}{10} \right) \quad (18)$$

Más adelante, se consideran los valores de la permitividad relativa del agua dulce, que generalmente se establece en 80 (Nelson, 1991) y se asigna a la variable "epsilon_r". Asimismo, se define la conductividad del agua dulce, cuyos valores típicos oscilan entre 300 a 1500 $\mu S/m$ (Carrasquero et al., 2016). Para la simulación, se adopta un valor de 560 $\mu S/m$ al tratarse de un valor intermedio y teniendo en cuenta que la laguna de Yahuarcocha presenta una conductividad promedio de 559.83 $\mu S/m$ (J. P. Pabón, 2015). También se establece la permitividad del vacío, cuyo valor es 8.85×10^{-12} , y finalmente, se calcula la frecuencia angular, definida por $2\pi f$, que cual se almacena en la variable "omega" (ver fragmento de código 14).

Fragmento de código 14.

```

1  % Parámetros físicos
2  f = 915e6; % Frecuencia en Hz (915 MHz)
3  d = [0.1, 1:0.5:15]; %distancia
4  c = 3e8; % Velocidad de la luz en m/s
5  Pt_dBm = 21; % Potencia de transmisión en dBm
6  Pt = 10^((Pt_dBm - 30)/10); % Convertir dBm a Watts
7  epsilon_r = 80; % Permitividad relativa del agua dulce
8  sigma = 560e-6; % Conductividad en S/m para agua dulce
9  epsilon_0 = 8.85e-12; % Permitividad del vacío
10 omega = 2 * pi * f; % Frecuencia angular
11 ...
12 ;omitido!
13 ...

```

A continuación, se presentan algunos parámetros utilizados en la configuración de la comunicación LoRa, como el ancho de banda, que se establece en 125 kHz y se asigna a la variable "BW", así como el Spreading Factor (SF), cuyo valor se almacena en la variable "SF" (ver fragmento de código 15).

Fragmento de código 15.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 % Parámetros de LoRa
5 BW = 125e3; % 125 kHz
6 SF = 7; %Spreading factor (7 - 12)
7 ...
8 ;omitido!
9 ...
```

Adicionalmente, se implementan tres condiciones "if", las cuales dependen del valor del Spreading Factor (SF) seleccionado. Dentro de cada condición, se establecen tanto el SNR mínimo que LoRa admite para cada SF, como el nivel de sensibilidad de señal que la placa puede captar (ver fragmento de código 16). Estos valores se configuran de acuerdo con las especificaciones proporcionadas en el datasheet de la placa Heltec Wifi LoRa 32 V3 (Semtech, 2021).

Fragmento de código 16.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 % Sensibilidad del receptor en dBm y SNR en dB
5 if SF == 7
6     sensibilidad_dBm = -124;
7     SNR_min = -7;
8 elseif SF == 10
9     sensibilidad_dBm = -130;
10    SNR_min = -15;
11 elseif SF == 12
12    sensibilidad_dBm = -137;
13    SNR_min = -20;
14 ...
15 ;omitido!
16 ...
```

Como se mencionó anteriormente, el agua absorbe las ondas electromagnéticas debido a su conductividad eléctrica (σ). Para modelar esta absorción en la simulación, se emplea el coeficiente de atenuación (α), el cual se mide en nepers por metro (Np/m). En este caso, se utiliza la ecuación 19, que permite calcular el coeficiente de atenuación en medios con pérdida (Ulaby & Ravaioli, 2023).

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu \varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (19)$$

En este caso, dado que se trata de agua dulce, se puede asumir que su permeabilidad relativa es aproximadamente igual a la permeabilidad del vacío, es decir, $\mu \approx \mu_0$. Asimismo, se considera que la permitividad absoluta del medio se obtiene como el producto de la permitividad relativa del agua y la permitividad del vacío, es decir, $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$. Reescribiendo la fórmula bajo estos supuestos, se obtiene la expresión presentada en la ecuación 20.

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right)^2} - 1 \right)} \quad (20)$$

Donde,

- α = es el coeficiente de atenuación Np/m.
- ω = Es la frecuencia angular $2\pi f$.
- ε = Es la permitividad del medio.
- σ = Es la conductividad eléctrica del medio S/m.
- f = Frecuencia en Hz.

Una vez establecida la ecuación para el cálculo del coeficiente de atenuación, esta se incorpora en el código de MATLAB, asegurando que su valor se almacene en la variable "alpha". Este procedimiento se puede observar en el fragmento de código 17.

Fragmento de código 17.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 % Cálculo de coeficiente de atenuación (alpha)
5 alpha = (omega / c) * sqrt((epsilon_r / 2) * (sqrt(1 + (sigma ./ (epsilon_0
6 * omega)).^2) - 1));
7 ...
8 ;omitido!
9 ...
```

Posteriormente, se define la función para el cálculo de la longitud de onda, la cual depende de la velocidad de la luz (c) y la frecuencia (f). Para ello, se emplea la ecuación 11, cuya implementación se puede observar en el fragmento de código 18.

Fragmento de código 18.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 % Cálculo de longitud de onda en agua
5 lambda_m = c / f;
6 ...
7 ;omitido!
8 ...
```

Una vez obtenida la longitud de onda, es necesario calcular la pérdida por absorción, la cual representa la disminución de la intensidad de una onda electromagnética al propagarse en un medio absorbente, que en este caso es el agua. Este cálculo se implementa en el fragmento de código 19 y se basa en la ecuación de onda en un medio conductor, donde la amplitud del campo eléctrico se atenúa exponencialmente según la expresión $e^{-\alpha z}$. Dado que la potencia de la onda electromagnética es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico, la pérdida por absorción se expresa mediante la ecuación 21 (Ulaby & Ravaioli, 2023).

$$L_{\text{absorción}} = P_0 e^{-2\alpha d} \quad (21)$$

Donde,

- $L_{\text{absorción}}$ = Es la potencia de onda después de viajar una distancia d.

- P_0 = Es la potencia inicial de la onda.
- $e^{-2\alpha d}$ = Representa la fracción de potencia que permanece después de propagarse por una distancia d .

Fragmento de código 19.

```

1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 % Valores de perdida por absorción
5 L_absorcion = exp(-2 * alpha * d);
6 ...
7 ;omitido!
8 ...

```

A continuación, es necesario calcular la pérdida en el espacio libre, para lo cual se requiere el valor de la longitud de onda (λ), previamente calculado, y la distancia entre el transmisor y el receptor. Para este cálculo, se emplea una forma simplificada de la ecuación de Friis, eliminando los términos correspondientes a las ganancias de antena. Este procedimiento se implementa en los fragmentos de código 20 y 21 y se basa en la ecuación 22 (Ulaby & Ravaioli, 2023).

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (22)$$

Donde,

- P_r = Es la potencia recibida en Watts (W).
- P_t = Es la potencia transmitida en Watts (W).

Fragmento de código 20.

```

1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 % Pérdida de espacio libre
5 L_fs = (lambda_m ./ (4 * pi * d)).^2;
6 ...
7 ;omitido!
8 ...

```

En el fragmento de código 21, se combinan en la variable "Pr" tanto la ecuación de pérdida por absorción como la de pérdida en espacio libre, integrándolas en una sola expresión basada en la ecuación de Friis. El resultado obtenido representa la potencia recibida en Watts, la cual posteriormente se convierte a dBm utilizando el inverso de la ecuación 18.

Fragmento de código 21.revisa

```

1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 % Potencia recibida en Watts y dBm
5 Pr = Pt * L_absorcion .* L_fs;
6 Pr_dBm = 10 * log10(Pr) + 30;
7 ...
8 ;omitido!
9 ...

```

A continuación, se realiza el cálculo del SNR a diferentes distancias, empleando la ecuación 23 (Navarro, 2017) Esta ecuación representa la formula general para obtener la potencia del ruido térmico en u sistema de comunicaciones, el cual puede originarse tanto en el receptor como ser captado por la antena. En este caso, el fragmento de código 22 implementa el cálculo del SNR, derivado de dicha ecuación.

$$N_0 = (NF)kTB \tag{ 23 }$$

Donde,

- N_0 = Es el ruido total recibido.
- NF = Es la figura de ruido del sistema, se establece en 6.
- k = Es la constante de Boltzman (1.38×10^{-23} Julios por grado).
- T = Temperatura equivalente al ruido (290°k).
- B = Ancho de banda.

La ecuación 22 debe ser convertida a una expresión en dBm, para lo cual se toma el valor de la constante de Boltzman por la temperatura que se asume en 290 grados kelvin normalmente y mediante el inverso de la Ecuación 18 se realiza la sustitución de estos valores en la ecuación obteniendo como resultado -174 dBm/Hz que representa la densidad espectral de potencia de ruido térmico a una temperatura ambiente, para lo cual se sigue el proceso que se denota a continuación:

$$P_{ruido (dBm)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{ruido}}{1mW} \right)$$

$$P_{ruido (dBm)} = 10 \log_{10} (k \cdot T) + 30$$

$$P_{ruido (dBm)} = 10 \log_{10} (1.38 \times 10^{-3} * 290) + 30$$

$$P_{ruido (dBm)} \approx -174 \text{ dBm/Hz}$$

Una vez obtenido el anterior valor, se obtiene la Ecuación 24, la cual representa al ruido total del sistema, en la cual se asigna el valor de la densidad espectral de potencia de ruido térmico a temperatura ambiente, sumado a la potencia de ruido en un ancho de banda dado, para el caso 125kHz y sumado a el factor NF o ruido del sistema, que según el datasheet del propio modulo se lo asume en 6 dB. El cálculo de esta ecuación se lo puede visualizar en el fragmento de código 22.

$$P_{ruidoT (dBm)} = -174 + 10 \log_{10} (BW) + NF \quad (24)$$

Fragmento de código 22.

```

1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 % Cálculo del SNR en cada distancia
5 Noise_Figure = 6; % dB
6 ruido_termico_dBm = -174 + 10*log10(BW) + Noise_Figure;
7 SNR = Pr_dBm - ruido_termico_dBm;
8 ...
9 ;omitido!
10 ...

```

Por último, se implementa un código que compara la sensibilidad del receptor con el RSSI de la señal recibida. Este proceso permite determinar si la señal puede ser detectada por el receptor a diferentes distancias. La implementación de esta comparación se encuentra en el fragmento de código 23.

Fragmento de código 23.

```
1 ...
2 ;omitido!
3 ...
4 % Comparar con sensibilidad del receptor
5 recepcion = Pr_dBm >= sensibilidad_dBm;
6 ...
7 ;omitido!
8 ...
```

El resultado que se obtiene a partir de la simulación se puede apreciar en el capítulo 4, donde se aborda todos los temas referentes a pruebas y resultados, específicamente para la simulación en la sección [4.1](#).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo final aborda el desarrollo de las pruebas del sistema y el análisis de los resultados obtenidos. Se llevan a cabo pruebas de comunicación entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones en un entorno acuático, evaluando el desempeño de la tecnología LoRa en estas condiciones. Asimismo, se realizan pruebas de comunicación Wifi para validar el envío de datos hacia Firebase, permitiendo su almacenamiento y posterior procesamiento en diversas tabulaciones que faciliten el análisis del comportamiento de la comunicación subacuática. Finalmente, se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos en cada etapa, con el objetivo de verificar la viabilidad de LoRa para su implementación en entornos subacuáticos y determinar su eficacia en la transmisión de datos en estas condiciones.

4.1 Resultados de simulación.

Luego de ejecutar la simulación utilizando los parámetros establecidos en la [Fase 4](#) del Capítulo 3, se obtienen los resultados correspondientes a la potencia recibida por el nodo de recepción a distintas distancias, así como la relación señal/ruido (S/R) registrada en cada caso. Estos datos permiten evaluar el comportamiento de la comunicación subacuática y determinar los límites de detección de la señal en función de la distancia mediante los parámetros de LoRa y las condiciones del medio.

En la Figura 74 se presentan los datos arrojados por la simulación y se dividen en cuatro columnas que contienen los parámetros de distancia (m), potencia recibida (dBm), relación señal/ruido (S/R) y la indicación de si la señal es detectable o no. Según los resultados obtenidos en la simulación, la sensibilidad de la antena de recepción es de -137 dBm debido a que el factor SF12 implica una mayor sensibilidad en la recepción,

como se indica en la sección 3.7. Esto implica que cualquier señal con una potencia por debajo de este umbral no sería detectada por el nodo receptor.

En este análisis, las distancias evaluadas van desde los 10 cm, que corresponde a la profundidad de la antena ubicada en la Boya de Comunicaciones, hasta los 15m de separación entre ambos nodos. Los resultados indican que, a una distancia superior a 12.5 m, la señal deja de ser detectable en un entorno subacuático que contiene una conductividad de 560 $\mu S/m$ (ver sección 3.7) que representa el agua de una piscina.

Figura 74.

Tabla de potencia recibida por distancia específica.

Distancia (m)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Recepción
0.10	8.51	125.54	SI
1.00	-18.86	98.17	SI
1.50	-26.48	90.55	SI
2.00	-33.08	83.95	SI
2.50	-39.11	77.92	SI
3.00	-44.79	72.24	SI
3.50	-50.23	66.80	SI
4.00	-55.48	61.55	SI
4.50	-60.60	56.43	SI
5.00	-65.61	51.42	SI
5.50	-70.54	46.49	SI
6.00	-75.39	41.64	SI
6.50	-80.18	36.85	SI
7.00	-84.92	32.11	SI
7.50	-89.62	27.41	SI
8.00	-94.28	22.75	SI
8.50	-98.90	18.13	SI
9.00	-103.49	13.54	SI
9.50	-108.06	8.97	SI
10.00	-112.60	4.43	SI
10.50	-117.12	-0.09	SI
11.00	-121.62	-4.59	SI
11.50	-126.10	-9.07	SI
12.00	-130.57	-13.54	SI
12.50	-135.02	-17.99	SI
13.00	-139.46	-22.43	NO
13.50	-143.88	-26.85	NO
14.00	-148.30	-31.26	NO
14.50	-152.70	-35.67	NO
15.00	-157.09	-40.06	NO

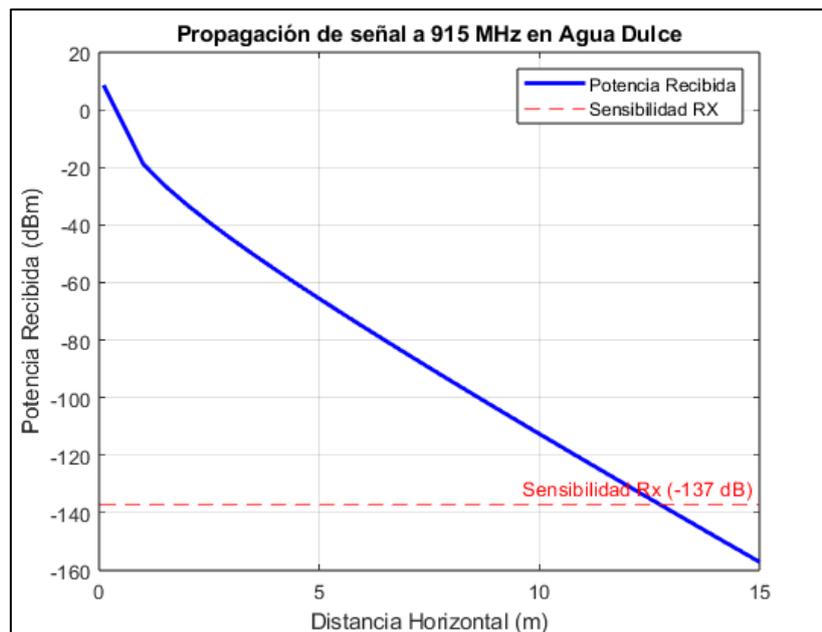
Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de potencia de recepción arrojados por la simulación en MATLAB a diferentes distancias.

En la Figura 75 se presenta una gráfica basada en los datos generados en la secuencia mostrada en la Figura 74, proporcionando una representación más clara de cómo se comporta la propagación de la señal. Inicialmente, la señal comienza con un

nivel alto, cercano a 0 dBm, a una distancia de 0.10 m, pero se atenúa significativamente a medida que la distancia aumenta. En la gráfica, se establece un límite que representa la sensibilidad de recepción de la antena, fijada en -137 dBm que es el dato que arroja la simulación si se establece el factor de expansión en 12. Esta línea intercepta la curva de potencia aproximadamente a los 12.5m, indicando el punto en el que la señal dejaría de ser detectable por el nodo receptor.

Figura 75.

Grafica de Propagación de señal 915 MHz.



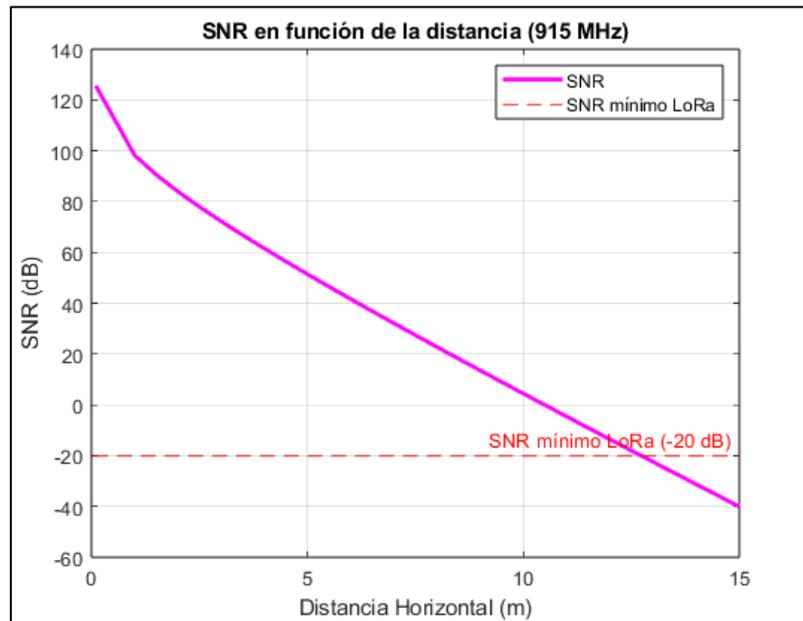
Nota: En la figura se puede visualizar la gráfica que demuestra el límite en dBm respecto a la sensibilidad de recepción que puede aceptar el sistema antes de perder la comunicación.

En la Figura 76 se muestra la gráfica de la relación señal/ruido (S/R) en función de la distancia evaluada, siguiendo los mismos parámetros observados en la Figura 74. En este análisis, se establece que el límite de detección de LoRa para la relación señal/ruido es de -20 dB (ver sección [3.7](#)), lo que significa que cualquier señal con un S/R por debajo de este valor no será detectable.

Inicialmente, la relación señal/ruido se evalúa alcanzando aproximadamente a una distancia de 0.10m considerando que se está calculando el SNR teórico ideal, este comienza en valores muy altos. Sin embargo, este valor disminuye considerablemente a medida que la distancia aumenta, hasta alcanzar el límite de -20 dB alrededor de los 12.5 m. Este resultado es consistente con los valores de potencia presentados en la Figura 75, lo que indica que, más allá de los 12.5m, la señal no sería detectable, puesto que LoRa permite operar hasta valores límites de S/R correspondientes a -20dB por debajo de este la señal no podría ser decodificada causando así la pérdida de los datos.

Figura 76.

Grafica de SNR en función de la distancia.



Nota: En la figura se puede visualizar el gráfico generado por la simulación que demuestra el límite de S/R mínimo que acepta LoRa antes de perder la comunicación.

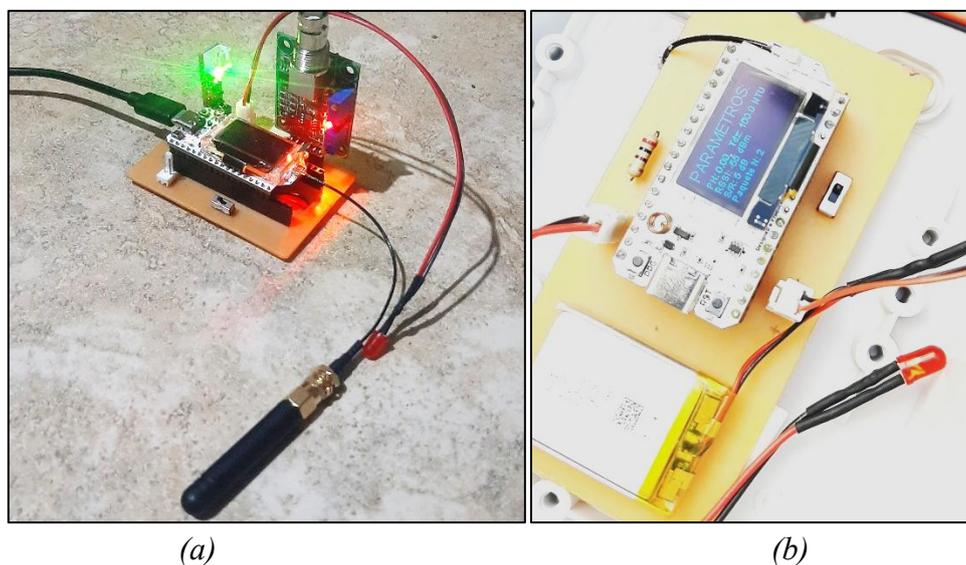
4.2 Pruebas de funcionamiento y comunicación del sistema.

Para el inicio de la comunicación entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones, primero se realizaron las pruebas de funcionamiento y comunicación entre los 2 nodos, para esto se ejecutó en el IDE Arduino el sistema de las placas Heltec Wifi LoRa 32 V3 conectadas cada una a un puerto COM de una computadora. Esto

permitió visualizar mediante el puerto serial como se enviaban y recibían los datos, así como el comportamiento de los procesos que se ejecutaban en el sistema. Las 2 placas encendidas se pueden visualizar en la Figura 77, en la cual la placa correspondiente al Nodo Sensor se observa con el apartado (a) mientras que la correspondiente a la Boya de comunicaciones se observa con el apartado (b) en el cual se tiene la correspondiente visualización de los datos mediante la pantalla OLED del dispositivo (ver figura 77, indicador b).

Figura 77.

Encendido de placas para pruebas de transmisión.



Nota: En la figura se puede visualizar los módulos electrónicos correspondientes al Nodo Sensor (a) y a la Boya de Comunicaciones (b) en funcionamiento.

Para comprender el funcionamiento del sistema, se presentan los datos obtenidos desde el puerto serial de cada uno de los dispositivos, basados en los parámetros de diseño establecidos en el capítulo 3.

Al observar la Figura 78, se aprecia el proceso de inicio del sistema de la Boya de Comunicaciones. En este caso, el puerto serial indica que el módulo comenzó esperando la conexión a una red Wifi, necesaria para el envío de datos hacia Firebase. A continuación, se estableció la conexión y se realizó la solicitud de sincronización de hora

con el servidor NTP. Finalmente, se generó una sincronización con la base de datos y se configuró el módulo LoRa en modo de recepción, quedando a la espera de datos.

Figura 78.

Inicio de sistema de Boya de Comunicaciones.

```
Conectando a Wifi...
..
WiFi conectado.
Sincronizando con servidor NTP...
Hora sincronizada.
Firebase conectado.
>> Into RX mode
```

Nota: En la figura se puede visualizar en el serial erial de la Boya de Comunicaciones el proceso de inicio del sistema.

En el caso del Nodo Sensor se observa que al momento de iniciar el sistema este envió un paquete de petición hacia la boya de comunicaciones con el objetivo de sincronizar la hora actual, para ello se realizó el envío de un indicador “101” (ver Figura 79), este proceso se repetía siempre que la Boya de Comunicaciones no enviaba una respuesta a la petición.

Figura 79.

Petición de sincronización de hora.

```
Enviando paquete "101", length 3
TX done...
Sin respuesta, reenviando...

Enviando paquete "101", length 3
TX done...
```

Nota: En la figura se puede visualizar en el serial del Nodo Sensor el envío de petición para la sincronización de hora y fecha hacia la Boya de Comunicaciones.

El paquete con el indicador "101" llegó a la Boya de Comunicaciones, la cual está configurada para responder a esta solicitud con un timestamp actualizado, como se muestra en la Figura 80.

Figura 80.

Confirmación de confirmación de hora.

```
Paquete recibido "101" <Potencia: -110 , Senal/Ruido: 4 , longitud: 0  
>  
Respondiendo con "TS: 1745775070", length 14  
>> Into RX mode  
>> TX done...
```

Nota: En la figura se puede visualizar en el serial de la Boya de Comunicaciones la respuesta con la actualización de hora y fecha correspondiente.

Una vez que el Nodo Sensor recibió el timestamp actualizado desde la Boya de Comunicaciones, lo almacenó en su sistema para utilizarlo posteriormente en el marcado de los paquetes enviados, incluyendo la hora y fecha correspondientes. Además, generó un proceso de control mediante el envío de un indicador “000”, que permitió solicitar información sobre el estado de la Boya, verificando si se encontraba activa (ver Figura 81).

Figura 81.

Petición de actividad desde Nodo Sensor.

```
Paquete recibido "TS: 1745775070"Timestamp actual recibido - Actualizando...  
Enviando paquete "000", length 3  
TX done...
```

Nota: En la figura se puede visualizar en el serial del Nodo Sensor la recepción del timestamp correspondiente a la fecha y hora actuales y el posterior envío de solicitud de actividad hacia la Boya de Comunicaciones.

En el lado de la Boya de Comunicaciones, al recibir el indicador “000”, esta respondió con un indicador “111”, que confirmaba su actividad. En caso de que la Boya no respondiera, se consideraba como inactividad, y el Nodo Sensor no iniciaba el envío de datos hasta recibir una confirmación.

Figura 82.

Envío de confirmación de actividad desde Boya de Comunicaciones.

```
Paquete recibido "000" <Potencia: -111 , Senal/Ruido: 3 , longitud: 0  
>  
Respondiendo con "111", length 3  
>> Into RX mode  
>> TX done...
```

Nota: En la figura se puede visualizar en el serial de la Boya de Comunicaciones la recepción de la petición de confirmación de actividad de la misma y su respuesta correspondiente.

Al momento de recibir la confirmación de actividad desde la Boya de Comunicaciones, el Nodo Sensor ejecutó la toma de datos desde los sensores. Tal como se muestra en la Figura 83, el sistema del Nodo Sensor estableció una conexión con la Boya y se preparó para el posterior envío de datos.

Figura 83.

Recepción de confirmación de actividad en Nodo Sensor.

```
Paquete recibido "111"Confirmación recibida - Modulo receptor activo.  
PH: 1.55  
Turbidez: -476.00
```

Nota: En la figura se puede visualizar en el serial del Nodo Sensor la recepción de confirmación de que la Boya de Comunicaciones se encuentra activa y a continuación la toma de datos desde los sensores.

Una vez que el sistema del Nodo Sensor obtuvo los datos de cada uno de los sensores, realizó el envío del paquete con la marca de tiempo actualizada correspondiente al momento del envío (ver Figura 84), cuya sincronización se había solicitado con anterioridad a la Boya de Comunicaciones. En este caso se observó en el serial del Nodo Sensor que se transmitieron 2 paquetes.

Figura 84.

Envío de datos desde Nodo Sensor.

```
sending packet "B: 86 -TS: 1745774768 -Turbidez: -476 -PH: 1.55 -PN: 1"
TX done...
PH: 2.01
Turbidez: 72.00

sending packet "B: 86 -TS: 1745774778 -Turbidez: 72 -PH: 2.01 -PN: 2"
TX done...
PH: 1.15
Turbidez: 100.00
```

Nota: En la figura se puede visualizar en el serial del Nodo Sensor el envío de paquetes con los respectivos datos recolectados.

En el serial de la Boya de Comunicaciones se registró la llegada de uno de los paquetes, en este caso el paquete marcado como N° 1, y de inmediato el sistema realizó el envío de la información contenida en dicho paquete hacia la base de datos. Una vez culminado este proceso, el sistema de la Boya de Comunicaciones volvió al modo de recepción, quedando a la espera de más paquetes.

Figura 85.

Recepción de datos en Boya de Comunicaciones y envío a Firebase.

```
Paquete recibido "B: 86 -TS: 1745774768 -Turbidez: -476 -PH: 1.55 -PN: 1"
>Se han almacenado los datos en Firebase.
- Se ha actualizado el dato de pH en Firebase.
- Se ha actualizado el dato de turbidez en Firebase.
- Se ha actualizado el dato de RSSI en Firebase.
- Se ha actualizado el dato de RSNR en Firebase.
- Se ha actualizado el dato de paquete en Firebase.
- Se ha actualizado el dato de hora en Firebase.
- Se ha actualizado el dato de delay en Firebase.
- Se ha actualizado el nivel de batería de nodo en Firebase.
>> Into RX mode
```

Nota: En la figura se puede visualizar en el serial de la Boya de Comunicaciones la recepción de los datos y el posterior envío de estos hacia Firebase.

Por último, el sistema ha ejecutado el proceso de verificación de actividad de la Boya de Comunicaciones, como se muestra en la Figura 86. En el puerto serial del Nodo

Sensor se observó que se ha realizado el envío del indicador "000". A diferencia de lo mostrado en la Figura 81, en ese caso, la verificación de actividad se ejecuta cada minuto para evitar el envío de paquetes si la Boya de Comunicaciones se encontrara inactiva. El Nodo Sensor no enviará más paquetes hasta que reciba la confirmación de actividad, siendo este un proceso que se ejecuta de manera periódica.

Figura 86.

Modo de verificación de actividad.

```
Proceso de verificacion activado  
  
Enviando paquete "000", length 3  
TX done...  
Sin respuesta, reenviando...  
  
Enviando paquete "000", length 3  
TX done...
```

Nota: En la figura se puede visualizar en el serial del Nodo Sensor el inicio del proceso de verificación para comprobar si la Boya de Comunicaciones sigue activa.

Como se pudo observar en esta sección, las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento y la comunicación del sistema demostraron que este opera conforme a lo establecido en la sección de diseño del capítulo 3. Tanto el Nodo Sensor como la Boya de Comunicaciones trabajan de manera correcta.

4.3 Pruebas de envío de datos hacia Firebase y visualización.

En esta sección se presentan las pruebas realizadas para el envío de datos hacia Firebase, así como la visualización de estos en la interfaz de usuario. En la Figura 87 se muestra cómo la actualización de los datos se generó correctamente en la base de datos; aquí se observa cómo se ha generado la estructura de almacenamiento y cómo cada uno de los datos recibidos se ha actualizado de manera correcta.

La prueba de envío de datos se generó con los dos nodos conectados que se mostraron en la sección 4.2, dando como resultado el correcto funcionamiento tanto en el almacenamiento de datos en tiempo real como en el guardado del historial de los mismos en formato JSON.

En la Figura 87-a se observa que los datos se han actualizado en tiempo real, mientras que en la Figura 87-b se muestra el almacenamiento del historial de datos organizado por etiquetas de timestamp, tal como se estableció en la sección 3.6.6.

Figura 87.

Actualización de datos en Firebase.



Nota: En la figura se puede visualizar la actualización de datos en tiempo real (a) y el almacenamiento del historial de datos mediante el timestamp (b).

Una vez que los datos se han almacenado en Firebase, estos son tomados desde mediante la interfaz de usuario generada para la visualización de los datos en tiempo real, para este caso en la Figura 88 se presentan los datos de Turbidez y pH que se pueden observar conforme la base de datos se ha ido actualizando.

Figura 88.

Variables ambientales – Interfaz de usuario.

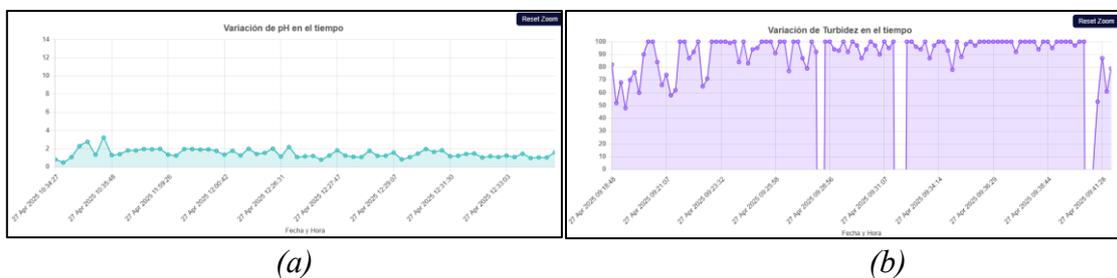


Nota: En la figura se puede visualizar la presentación de los datos en tiempo real de las variables ambientales de pH y Turbidez en la interfaz gráfica.

Los datos que se almacenan en el historial de datos de Firebase, permiten ser extraídos y generar graficas en tiempo real, las cuales muestran la evolución de los mismos en el tiempo. En el caso de los datos obtenidos desde los sensores, al momento de realizar las pruebas de envío de datos, estos se representaban de forma correcta en la interfaz de usuario, como se visualiza en la Figura 89-a, se aprecian los datos del sensor de pH en el tiempo, mientras que en la Figura 89-b se aprecian los datos del sensor de Turbidez en el tiempo.

Figura 89.

Grafica de pH – Interfaz de usuario.



Nota: En la figura se puede visualizar las gráficas de historial de datos correspondientes a la variable de pH (a) y Turbidez (b) en la interfaz de usuario.

De igual forma, en la Figura 90 se puede visualizar que los parámetros de conexión entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones se pueden visualizar en tiempo real en la misma interfaz de usuario, entre los cuales se obtiene el RSSI, RSNR, N° de paquete, delay, tamaño de paquete, nivel de batería del nodo y la hora de actualización del último dato.

Figura 90.

Parámetros de conexión – Interfaz de usuario.

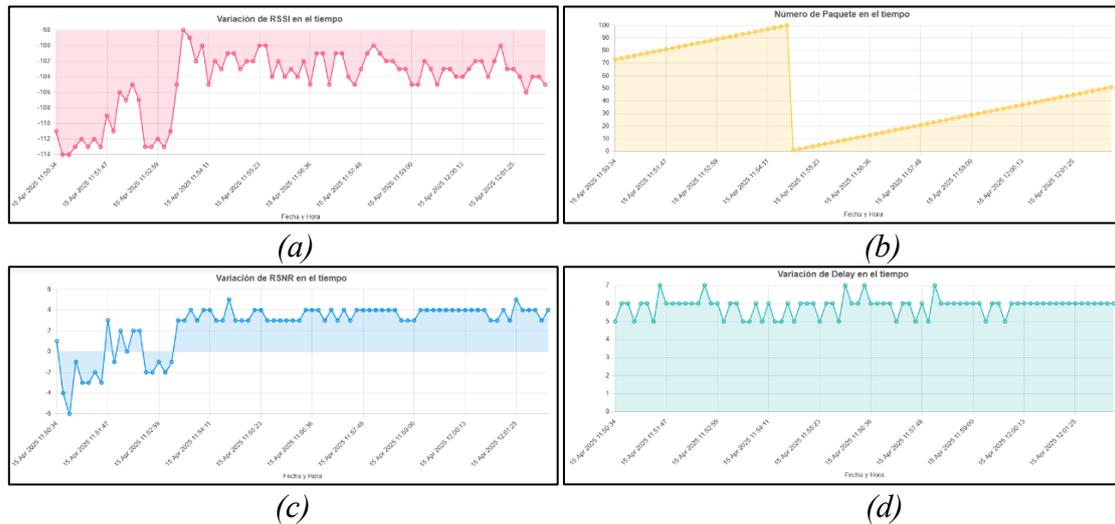


Nota: En la figura se puede visualizar la presentación de los parámetros de conexión de cada uno de los paquetes que se transmiten entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones en la interfaz de usuario.

Del mismo modo que en las gráficas de los sensores, también se obtienen graficas para los diferentes parámetros de conexión, gracias al historial de datos que se ha ido acumulando en la plataforma de Firebase, es posible extraer cada uno de estos y ver su evolución en el tiempo en el que se realizó la prueba. Esto facilita generar posteriormente el análisis necesario de como la tecnología LoRa se desenvuelve en este ambiente. En la Figura 91 se observan las gráficas de datos correspondientes al RSSI (Figura 91-a), al número de paquete (Figura 91-b), al RSNR (Figura 91-c) y por ultimo al delay(Figura 91-d).

Figura 91.

Grafica de RSSI – Interfaz de usuario.



Nota: En la figura se puede visualizar las gráficas de historial de datos correspondientes a los parámetros de conexión RSSI (a), número de paquete (b), RSNR (c) y delay (d).

Los resultados de las pruebas correspondientes a la sección [4.2](#) (pruebas de funcionamiento y comunicación del sistema) y [4.3](#) (pruebas de envío de datos hacia Firebase y visualización) demuestran el correcto funcionamiento del sistema, desde la toma de datos en el ambiente subacuático hasta la visualización de todos los parámetros en la interfaz de usuario. En las siguientes secciones se establecen los ambientes de prueba para analizar el comportamiento de la tecnología LoRa en el ambiente subacuático objetivo de este trabajo de grado.

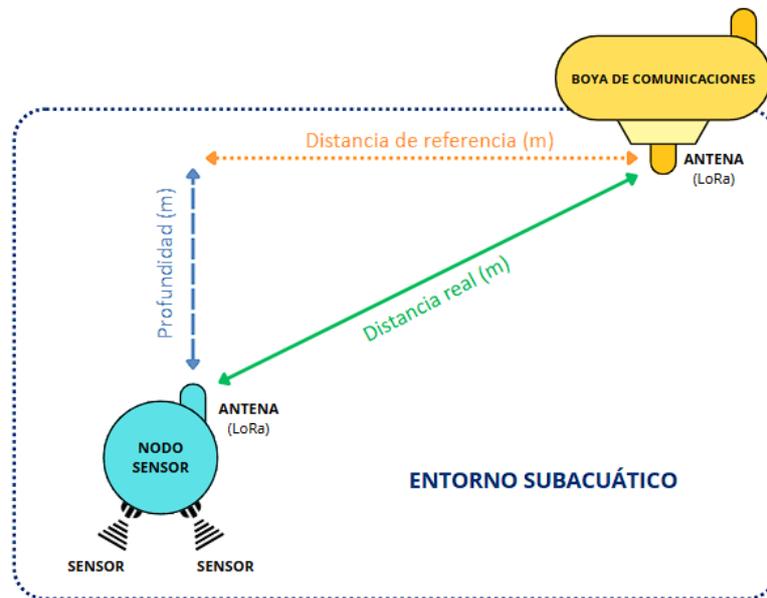
4.4 Parámetros de medición.

Antes de entrar de lleno en los escenarios de pruebas, es necesario aclarar los parámetros que se han tomado en cuenta para realizar la medida de las distancias de separación entre nodos, para lo cual se presenta la Figura 92. Las pruebas realizadas en todos los escenarios presentados incluyendo (Piscina, Laguna de Yahuarcocha y Lago de San Pablo) han tenido como parámetro de medición el eje horizontal sobre la superficie del agua, donde se demuestra la distancia de referencia. En la Figura 92 se presenta un

triángulo en el cual se tiene la profundidad a la que se ubica el Nodo Sensor, la distancia de referencia que existe en la superficie desde el punto donde el Nodo Sensor se encuentra sumergido hasta la posición de la Boya de Comunicaciones y una distancia diagonal que representa a la distancia de separación real entre ambos nodos.

Figura 92.

Esquema de medidas de distancia.



Nota: En la figura se puede visualizar la configuración utilizada para la medición de la distancia referencial y real a la que se encuentran separados ambos nodos.

Para obtener las distancias reales es necesario aplicar el Teorema de Pitágoras, para lo cual se realiza el cálculo teniendo en cuenta que la profundidad de la antena del Nodo Sensor es de $h_1 = 0.81m$ (Esta profundidad puede variar dependiendo de la prueba realizada) y la antena de la Boya de Comunicaciones es de $h_2 = 0.10m$, el cálculo que se realizó se especifica de la siguiente forma:

$$h_1 = 0.81m$$

$$h_2 = 0.10m$$

$$\Delta h = 0.81m - 0.10m = 0.71m$$

Teniendo en cuenta que la separación en la superficie entre el Nodo Sensor y la Boya de comunicaciones va desde 0.1m hasta 13m, se realizó calculo para cada una de las distancias medidas, para ello se ha tomado un valor de referencia de 1m con el fin de realizar una demostración, dando como resultado una distancia real de 1.23m. Cabe resaltar que las distancias que se muestran en las gráficas son las distancias referenciales y no las reales. En el ANEXO 9, donde se observan las distancias reales para cada medición.

$$d = 1m$$

$$D = \sqrt{d^2 + (\Delta h)^2}$$

$$D = \sqrt{1^2 + (0.71)^2}$$

$$D = 1.23m$$

4.5 Ambiente de pruebas en piscina.

Las primeras pruebas para el análisis de la tecnología LoRa en ambientes subacuáticos se han realizado en un ambiente controlado (piscina), dando la posibilidad de posicionar el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones a diferentes distancias, así como evaluar todas las configuraciones de Spreading Factor posibles desde SF7 hasta SF12 para generar el análisis respectivo. Este ambiente controlado permitió generar un análisis comparativo con el entorno de pruebas de la Laguna de Yahuarcocha y la Laguna de San Pablo.

4.5.1 Preparación de escenario.

Para el desarrollo de las pruebas en este ambiente controlado, se utilizó una piscina de 11.93m de largo y 6.3m de ancho (ver Figura 93), con una profundidad de 1.33m (ver

ANEXO 5). Aquí se instalaron tanto el Nodo Sensor como la Boya de Comunicaciones, realizando la toma de datos a distancias determinadas.

Figura 93.

Piscina de pruebas.

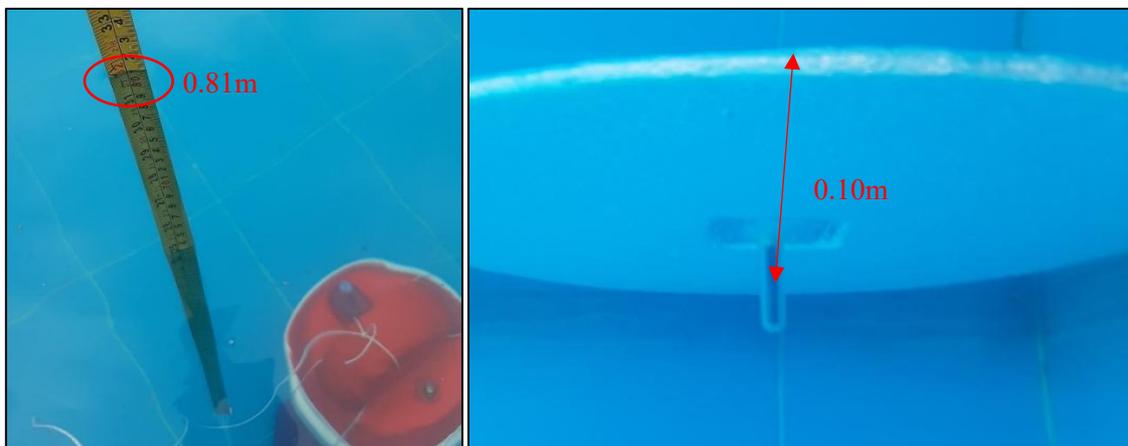


Nota: En la figura se puede visualizar la piscina utilizada para la ejecución del ambiente de pruebas, aquí se detallan las medidas de la misma.

Como se puede apreciar en la Figura 94-a, la antena del Nodo Sensor se encuentra ubicada a una profundidad de 0.81m, siendo esta la máxima profundidad evaluada en este ambiente debido al peso utilizado para sumergir el nodo. Por otro lado en la Figura 94-b se visualiza la distancia de la antena ubicada en la Boya de Comunicaciones con un valor de 0.10m de profundidad.

Figura 94.

Profundidad de antena de Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones.



(a)

(b)

Nota: En la figura se puede visualizar la profundidad a la que se encuentran las antenas tanto del Nodo Sensor (a) como de la Boya de Comunicaciones (b).

En la figura 95 se visualiza una antena Ubiquiti Loco M2, la cual se conectó a un Router mediante conexión Ethernet para proporcionar internet a la Boya de Comunicaciones por su característica directiva, permitiendo así utilizar internet para generar la transferencia de datos hacia Firebase.

Figura 95.

Antena Ubiquiti Loco M2.

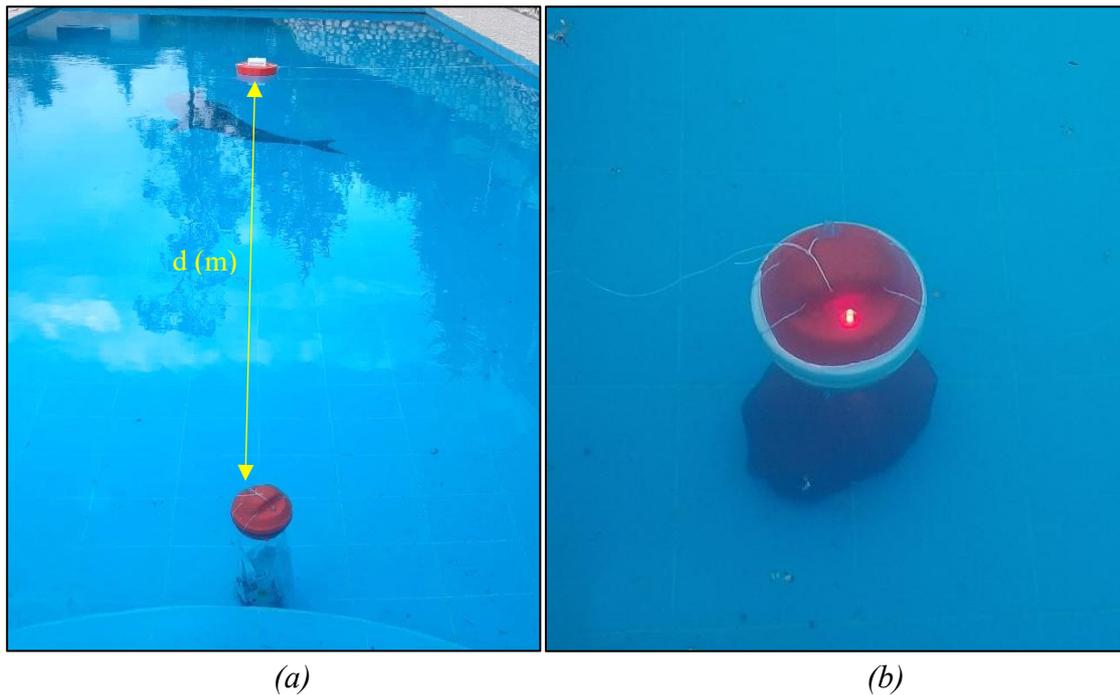


Nota: En la figura se puede visualizar el posicionamiento de la antena Ubiquiti Loco M2, utilizada para la conexión Wifi.

En una perspectiva más detallada, se observa como en la Figura 96-a se ubicó la Boya de Comunicaciones en una alineación centrada respecto al punto donde se encuentra sumergido el Nodo Sensor, esto para conservar la distancia de separación entre las antenas. Por otro lado, en la Figura 96-b se aprecia como el Nodo Sensor realiza un envío de paquete de datos, lo que se sabe gracias a la iluminación de su indicador LED.

Figura 96.

Ubicación de Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones

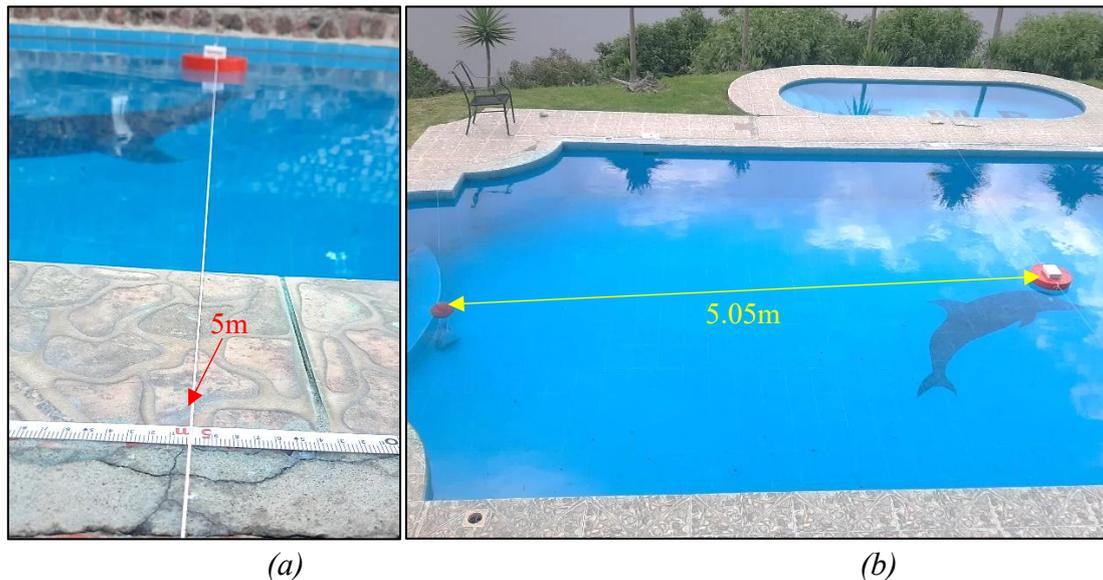


Nota: En la figura se puede visualizar como se encuentran posicionados tanto el Nodo Sensor como la Boya de comunicaciones (a) en la piscina, así como una visualización del LED indicador de envío de paquetes (b).

Para el proceso de pruebas se ha ubicado el Nodo Sensor en forma estática en uno de los bordes de la Piscina. Con el uso de una cinta métrica extendida, se logró posicionar la Boya de Comunicaciones a distancias determinadas desde 1m a 12m de distancia respectivamente. En la Figura 97-a se aprecia la ubicación de la Boya a 5.05m de distancia real, esta se mantiene estática en dicha posición gracias al uso de una cuerda de sujeción (el proceso completo se aprecia en el ANEXO 5), mientras que en la Figura 97-b se obtiene una perspectiva aérea de la distancia de separación entre ambos dispositivos.

Figura 97.

Separación de Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones.



Nota: En la figura se puede visualizar un escenario de prueba de comunicación a 5m de distancia con el uso de una cinta métrica (a), así como una visualización de dicha distancia de separación (b).

4.5.2 Resultados de pruebas en piscina con configuración SF12.

Los datos que se han almacenado en Firebase sirven para el análisis correspondiente del comportamiento de la tecnología LoRa a diferentes distancias en el ambiente de pruebas en piscina. Para el primer caso se han evaluado los parámetros de conexión de LoRa con el uso de un SF12, el cual, como ya se explicó en la sección [3.5.4](#), es uno de los valores de Spreading Factor que tienen mayor compatibilidad con el ambiente en el cual se está trabajando.

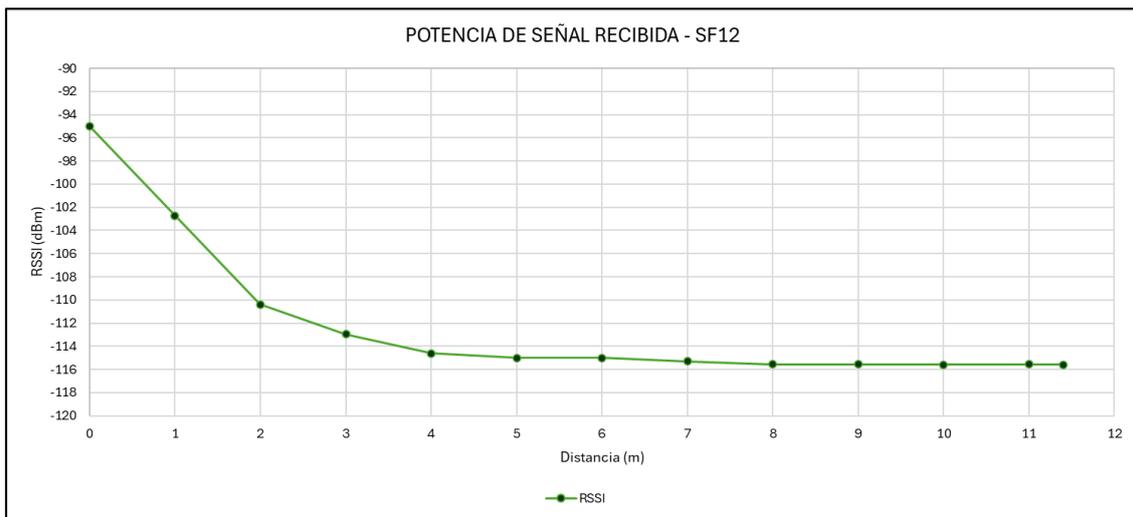
En la figura 98, se obtiene la primera grafica de resultados, aquí se representa la potencia de señal recibida (RSSI) en base a diferentes distancias evaluadas que van desde 1m a 11.4m de distancia, tomando en cuenta las consideraciones de medición explicadas en la sección [4.4](#) en cuanto a las distancias reales. también es pertinente recordar que la potencia de transmisión que se ha utilizado es de 21dBm.

El valor de RSSI inicial es de -95dBm cuando el Nodo Sensor se encuentra junto a la Boya de Comunicaciones, mientras que en una distancia de 1m su valor disminuye hacia los -103dBm. En este tramo se observa una caída considerable al momento de separar la Boya de Comunicaciones a 2m de distancia, puesto que el valor descendió a los -111dBm rápidamente. En los 3m de distancia los valores de RSSI vuelven a caer hacia los -113dBm y de igual forma a los 4m con un valor promedio de -115dBm.

Una vez que se ha llegado a los 5m de distancia de separación entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones, se observa que la curva tiende a estabilizarse entre -115dBm y -116dBm y se mantiene así hasta el último punto de distancia de 11.4m antes de que la señal se pierda. Teniendo en cuenta que la sensibilidad del receptor LoRa puede capturar señales hasta los -134dBm y en el caso de un SF12 hasta los -137dBm, se podría decir que aún existe rango para el alcance de la señal, pero no es así, puesto que se debe tener en cuenta los valores de RSNR presentados en la Figura 100.

Figura 98.

Grafica de RSSI – piscina – SF12.



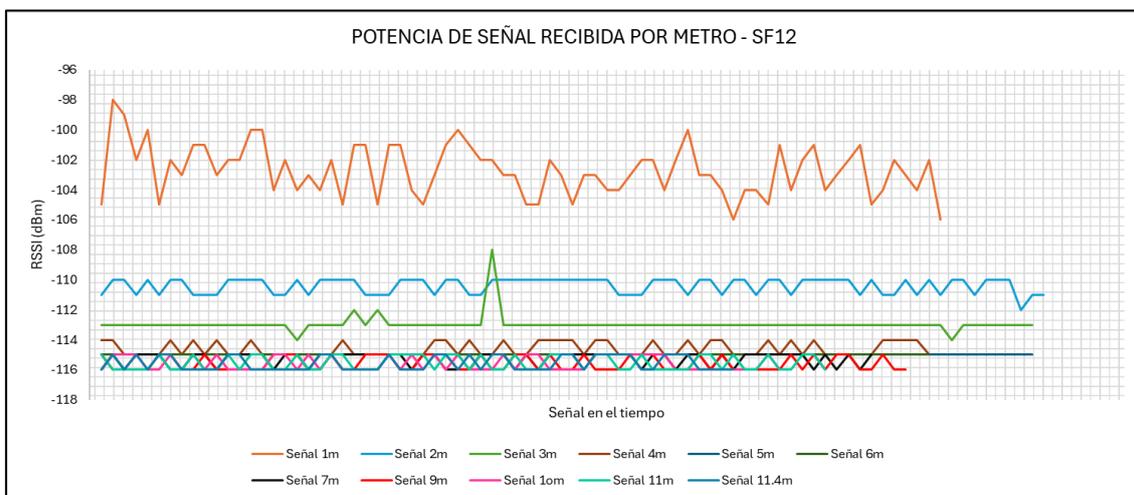
Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de la tendencia del parámetro RSSI evaluados desde 1m a 11.4m de distancia horizontal.

Ahora si observa la Figura 99, se presenta una gráfica que contiene los valores con los que la señal llega al receptor en cada una de las distancias evaluadas por separado. Lo que se destaca en este caso es que 3 de las señales son las que más difieren en cuanto al valor de RSSI, dando como resultado que a 1m, 2m y 3m es donde se observa la mayor caída en cuanto a valores de potencia de llegada, mientras que el resto de las distancias tienden a estabilizarse en -116dB.

Cabe mencionar que la señal que se encuentra a 1m de distancia es una de las más irregulares, puesto que sus valores oscilan entre -98dBm y -106dBm, lo que puede explicarse debido al lóbulo de radiación de la antena omnidireccional que utiliza el módulo LoRa, teniendo en su parte vertical una especie de radiación uniforme.

Figura 99.

Grafica de RSSI por metro – piscina – SF12.



Nota: En la figura se puede visualizar los valores de RSSI evaluados a diferentes distancias por separado.

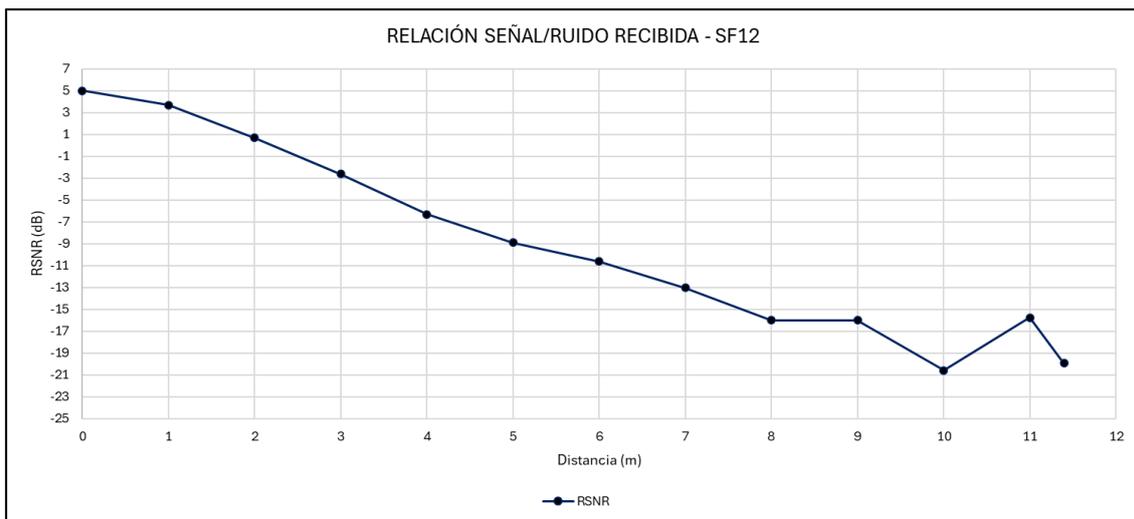
Como se mencionó anteriormente, uno de los parámetro a tomar en cuenta para que exista una correcta comunicación es el RSNR, puesto que en la Figura 98, hacia los 11.4m de distancia el nivel de potencia de señal recibida por el receptor es más alto que el mínimo que la sensibilidad de la antena puede tolerar, esto no significa que la señal

pueda llegar a más distancia hasta alcanzar el -137dBm , ya que si se observa la Figura 100, el valor de RSNR disminuye constantemente en cada metro de separación entre los nodos, causando que al llegar a los 10m de distancia, el valor de RSNR alcance los límites de -20dB dentro del cual la señal LoRa puede ser capturada sin pérdidas considerables.

Hacia los 11m se observa una recuperación de este factor que se establece en los -17dB pero cae rápidamente hacia los -20dB nuevamente en los 11.4m. Por ende, aunque la potencia de recepción es de -116dBm , el factor de RSNR impide que la señal sea escuchada correctamente por el receptor.

Figura 100.

Grafica de RSNR – piscina – SF12.

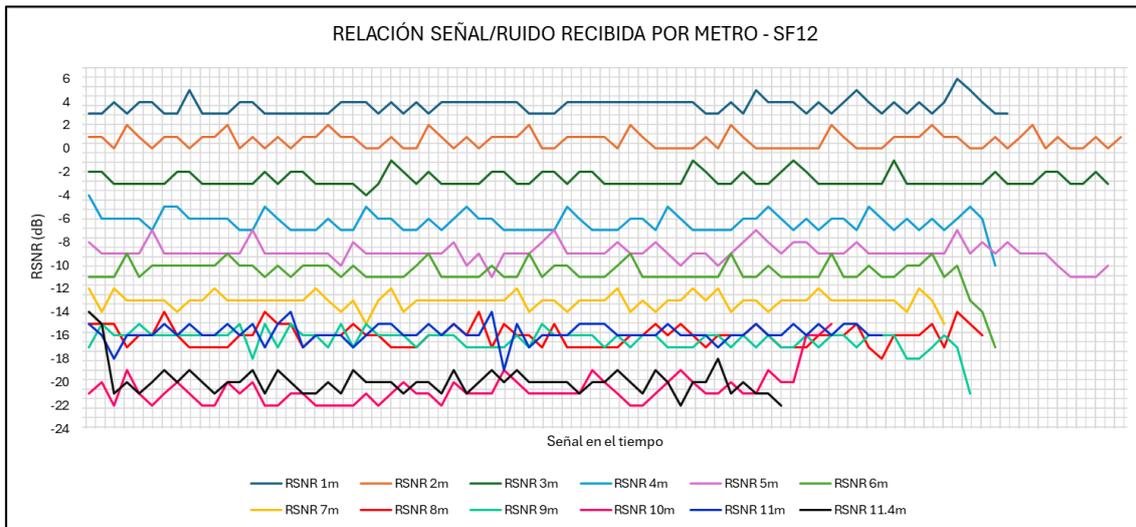


Nota: En la figura se puede visualizar los valores de RSNR evaluados a diferentes distancias que van desde 1m hasta 11.4m horizontal.

En el caso de la Figura 101, se ha realizado la separación de los valores de RSNR por metro, en este caso es posible visualizar como el factor ha ido decayendo conforme la distancia aumenta, considerando una caída entre 2 a 3 dB por metro, llegando a su punto de no retorno hacia los 11.4m de separación. Si se observa las señales de 10m y 11.4m de distancia, contienen las señales más cortas en la gráfica, esto se debe a que se evidenciaron pérdidas de paquetes.

Figura 101.

Grafica de RSNR por metro – piscina – SF12.



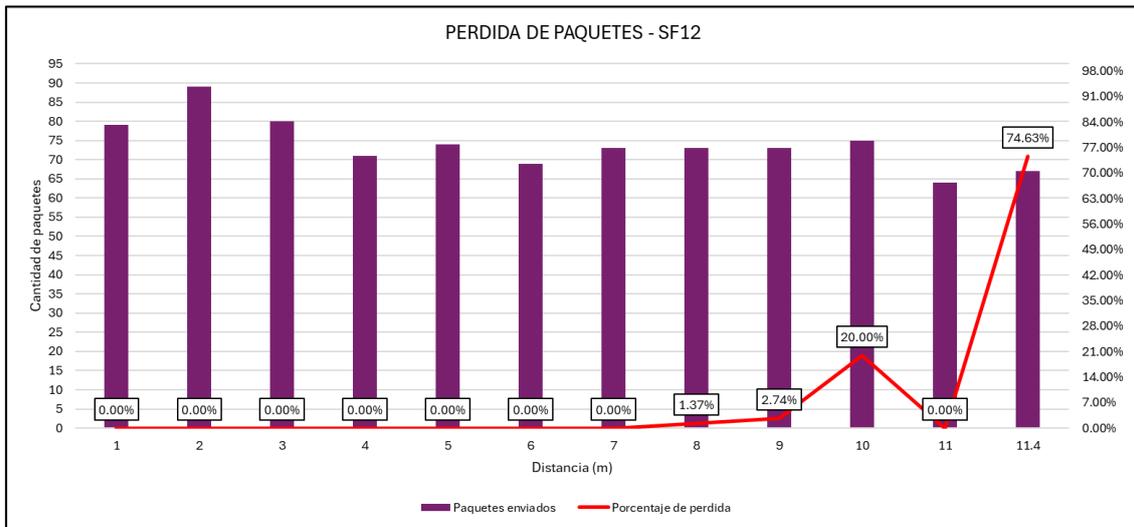
Nota: En la figura se puede visualizar los valores de RSNR evaluados a diferentes distancias por separado.

Teniendo en cuenta los datos de RSSI y RSNR donde se indica que por encima de 10m de separación comienzan a generarse pérdidas de señal, se presenta la Figura 102, la cual es una representación gráfica de la pérdida de paquetes que se ha generado durante el proceso de pruebas.

En este caso, se visualiza que existe un flujo de paquetes normal sin pérdidas hasta los 9m de distancia, puesto que por encima de los 10m la pérdida de paquetes se hace evidente, llegando a tener un 74.63% de pérdidas a los 11.4m antes de que los datos se pierdan por completo, y es acorde con el factor de RSNR, ya que a estas distancias se evidencian caídas por debajo de -20dB.

Figura 102.

Grafica perdida de paquetes - piscina – SF12.

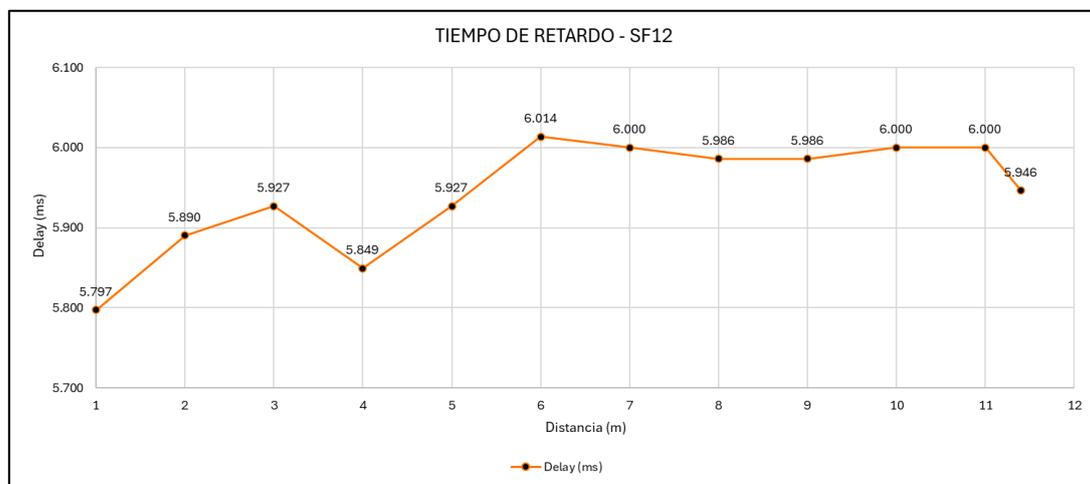


Nota: En la figura se puede visualizar el flujo de paquetes desde 1m hasta 11.4m de distancia horizontal, evidenciando perdidas de los mismos a distancias específicas.

Al ser una comunicación que está utilizando el Spreading Factor más alto permitido (SF12), se evidencia que el delay bastante considerables, si se observa la Figura 103, se indica que los valores oscilan entre 5790ms hacia los 6015ms, dando como promedio un delay de 5940ms, es decir que el bitrate se ve reducido, tal como se explicó en la sección [3.5.4](#).

Figura 103.

Grafica de Delay – piscina -SF12.



Nota: En la figura se puede visualizar los valores de retardo (delay) que se han evidenciado con una configuración de SF12.

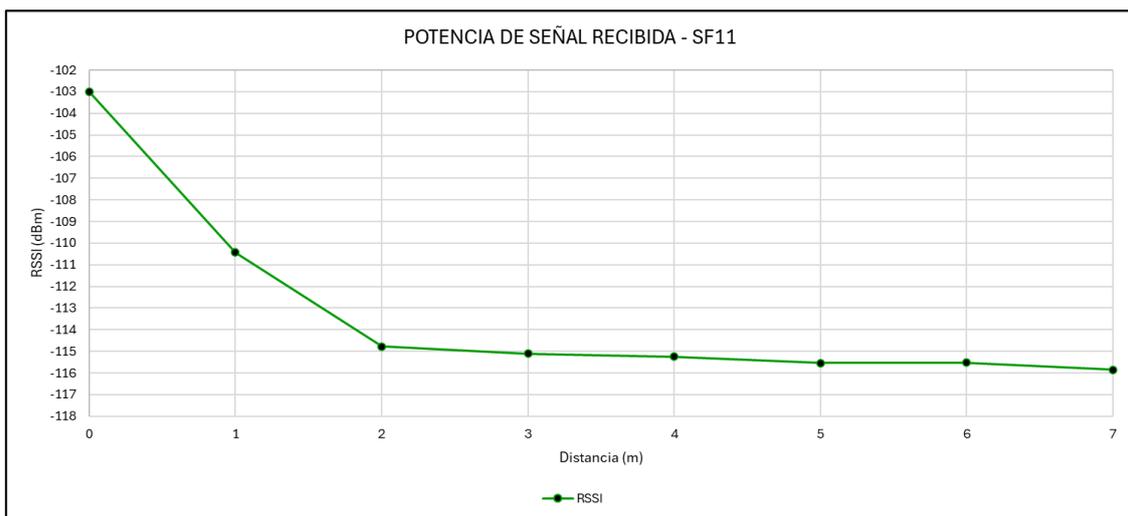
4.5.3 Resultados de pruebas en piscina con configuración SF11.

También se han realizado pruebas con otras configuraciones de Spreading Factor (SF), las cuales permiten analizar como este factor influye directamente en la distancia a la que la señal puede ser detectada antes de que se pierdan los datos.

En el caso de una configuración de SF11, los valores de RSSI se evaluaron a partir de 1m de distancia referencial. En la Figura 104 se visualiza la gráfica generada mediante las pruebas que se han realizado, aquí se observa que los valores inician en -103dBm cuando el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones se encuentran juntos, pero caen rápidamente a una distancia de 1m de separación hacia los -110dBm, estos se estabilizan cuando consiguen una posición más horizontal, sin embargo su potencia disminuye a partir de los 2m y comienza a tener valores entre -115 dBm y -116dBm hasta llegara a los 7m, donde la señal se pierde a causas de los altos valores de RSNR presentados en la Figura 105.

Figura 104.

Grafica de RSSI – piscina – SF11.

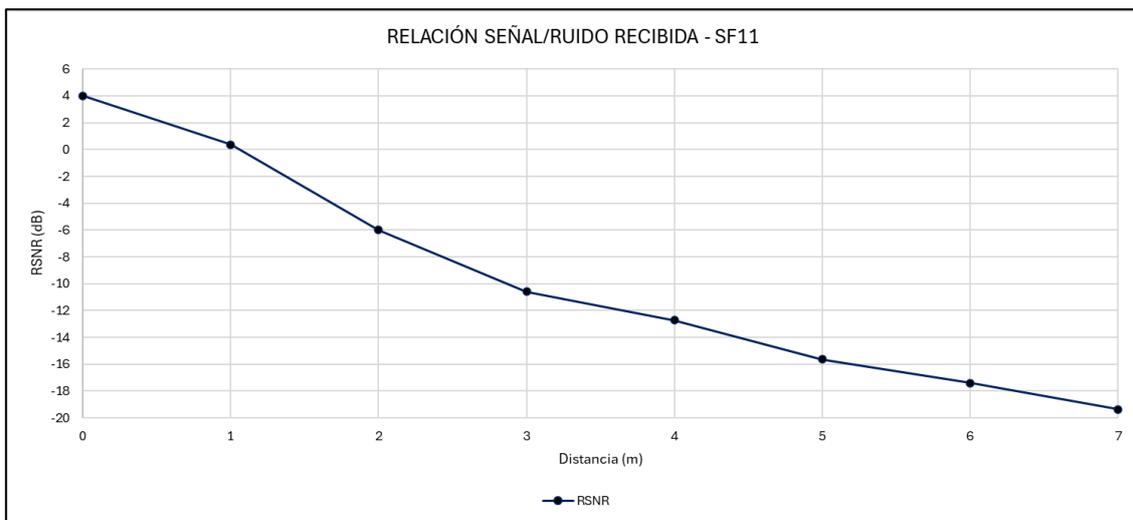


Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSSI evaluados desde 1m a 7m de distancia horizontal en una configuración SF11.

En el caso del RSNR en una configuración de SF11, se aprecia que los datos obtienen un valor optimo a distancias cercanas como 1m o 2m, encontrándose entre 0dB a -6 dB. Estos valores tienden a caer de forma constante mientras la distancia aumente, llegando a rozar los -20dB a una distancia de 7m donde la señal se pierde completamente (ver Figura 105).

Figura 105.

Grafica de RSNR – piscina – SF11.

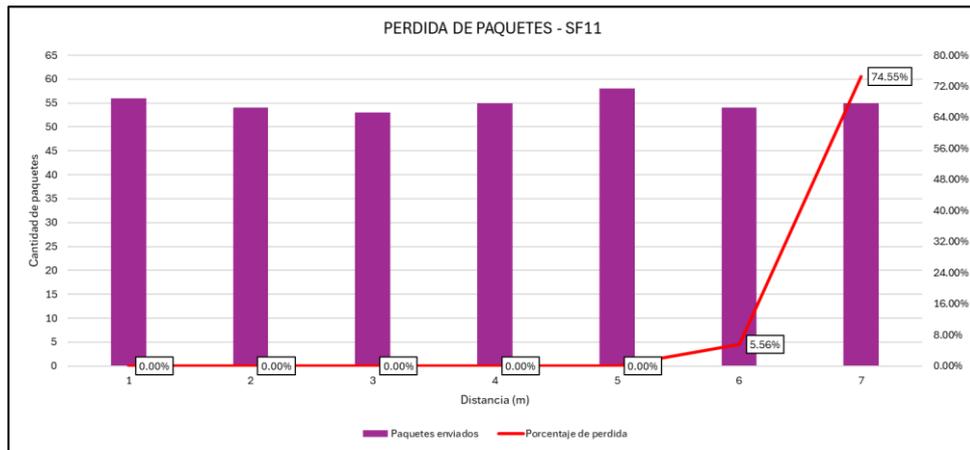


Nota: En la figura se puede visualizar los valores de RSNR evaluados a diferentes distancias que van desde 1m hasta 7m horizontal, en una configuración SF11.

Si se observa la Figura 106, se ha obtenido resultados de perdida de paquetes, que empezaron a ser constantes cuando los nodos se encontraban separados a 7m de distancia, en este caso se observa que la perdida es casi del 74.55% de los paquetes, llegando hasta a perder la comunicación por largos periodos de tiempo, esto es consistente con los resultados de la Figura 105 que muestran la baja relación de RSNR y posterior perdida de señal a esta distancia. Aunque también se han apreciado perdidas insignificantes del 5.56% de los paquetes a 6m.

Figura 106.

Grafica perdida de paquetes - piscina – SF11.

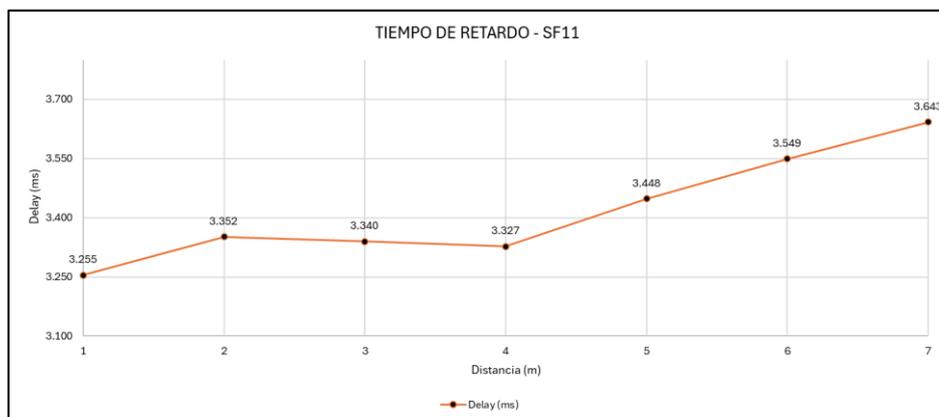


Nota: En la figura se puede visualizar el flujo de paquetes desde 1m hasta 7m de distancia horizontal, evidenciando pérdidas de paquetes en una configuración SF11.

El último de los resultados obtenidos en esta configuración SF11, es la del tiempo de retardo (delay) de los paquetes que llegan al receptor, en este caso se observa que el delay en comparación con la configuración SF12 oscila entre los 3250ms hasta los 3650ms, disminuyendo a un promedio de 3416ms de retardo, lo que demuestra que el valor del delay está directamente ligado al valor de SF, esto es consistente con lo expuesto en la sección [3.5.4.4](#) en donde se expresa que a mayor SF la velocidad de transmisión de datos se ve afectada.

Figura 107.

Grafica de Delay – piscina -SF11.



Nota: En la figura se puede visualizar los valores de retardo (Delay) que se han evidenciado con una configuración de SF11.

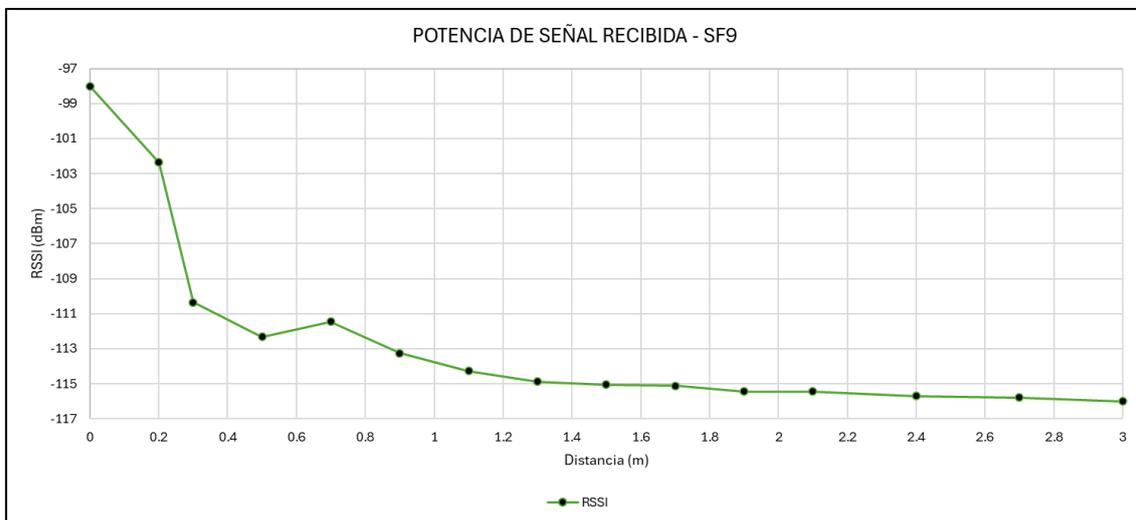
4.5.4 Resultados de pruebas en piscina con configuración SF9.

Otra de las configuraciones de SF que se han establecido para las pruebas es el SF9, como se puede visualizar en la Figura 108, se ha obtenido la gráfica de RSSI correspondiente a las distancias evaluadas, lo que destaca en este caso es que dicha distancia se ha reducido considerablemente, puesto que las pruebas debieron realizarse en torno a los 0.2m de distancia inicialmente obteniendo alrededor de -102dBm de potencia de llegada.

El valor de RSSI fue disminuyendo conforme la distancia iba aumentando, llegando a una estabilización entre los -115dBm y -116dBm tal como en las anteriores pruebas, con la diferencia que estos valores máximos se alcanzaron a los 3m de distancia de separación.

Figura 108.

Grafica de RSSI – piscina – SF9.



Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSSI evaluados desde 0.2m a 3m de distancia horizontal en una configuración SF9.

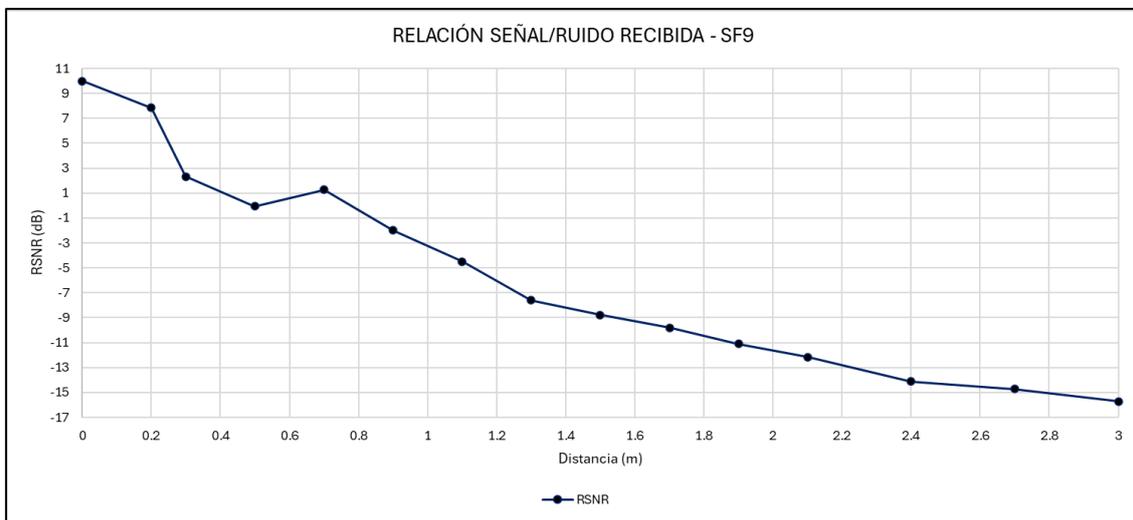
En la Figura 109, se obtiene el resultado del RSNR, que en este caso ha comenzado con un valor de 8dB hacia los 0.2m de distancia de separación y ha ido disminuyendo de

forma consistente conforme la distancia ha aumentado, llegando a valores de -17dB en los 3m, a esta distancia la señal ha dejado de ser reconocible.

La diferencia con las anteriores configuraciones de SF, es que en este caso la señal comenzó a perderse a los -17dB y no a los -20dB, esto se debe a que el valor de tolerancia de -20dB está dado para las configuraciones más altas de SF, mientras que se ve disminuido si esta configuración es menor, lo cual causa que la pérdida de datos se produzca con un valor RSNR más alto.

Figura 109.

Grafica de RSNR – piscina – SF9.

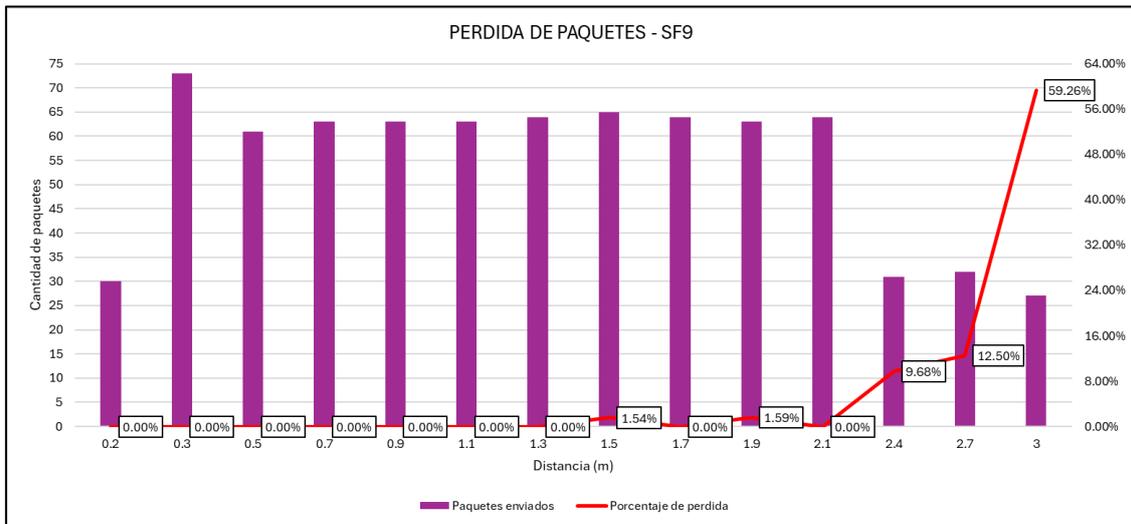


Nota: En la figura se puede visualizar los valores de RSNR evaluados a diferentes distancias que van desde 0.2m hasta 3m horizontal, en una configuración SF9.

Consistentemente con lo mostrado en las Figuras 108 y 109, la pérdida de paquetes se encuentra alrededor de un 60% a los 3m de distancia de separación, donde la señal se pierde por completo (ver Figura 111). En este caso también es posible observar la presencia de pequeñas pérdidas del 9.68% a 2.4m y un aumento hacia el 12.50% a 2.7m.

Figura 110.

Grafica perdida de paquetes - piscina – SF9.

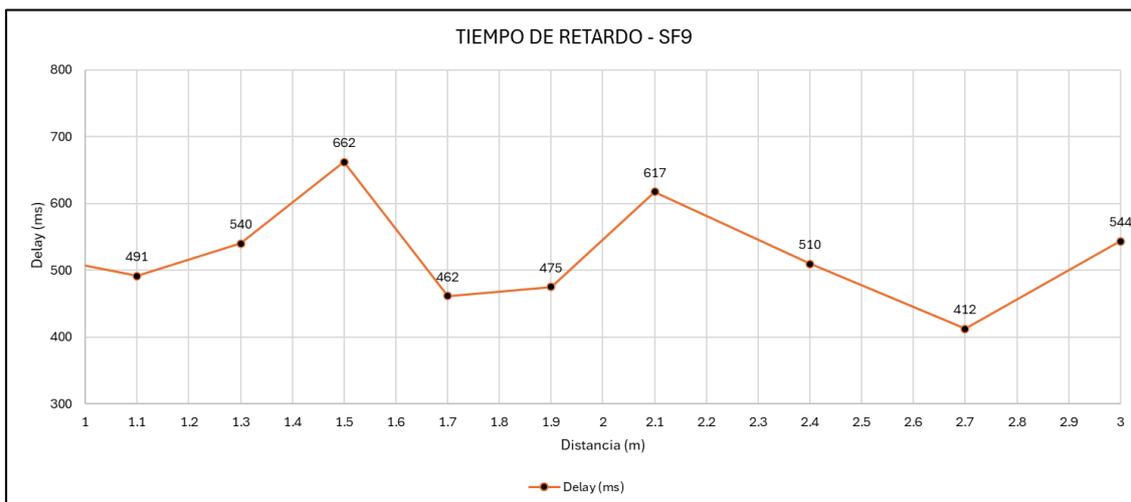


Nota: En la figura se puede visualizar el flujo de paquetes desde 0.2m hasta 3m de distancia horizontal, evidenciando perdidas de paquetes en una configuración SF9.

En el caso del delay, si se observa la Figura 111, este oscila entre los 400ms a 700ms, alcanzando un promedio de 535ms, que en comparación a los valores anteriores, la velocidad de transmisión de datos en esta configuración es más rápida.

Figura 111.

Grafica de Delay – piscina -SF9.



Nota: En la figura se puede visualizar los valores de retardo (Delay) que se han evidenciado con una configuración de SF9.

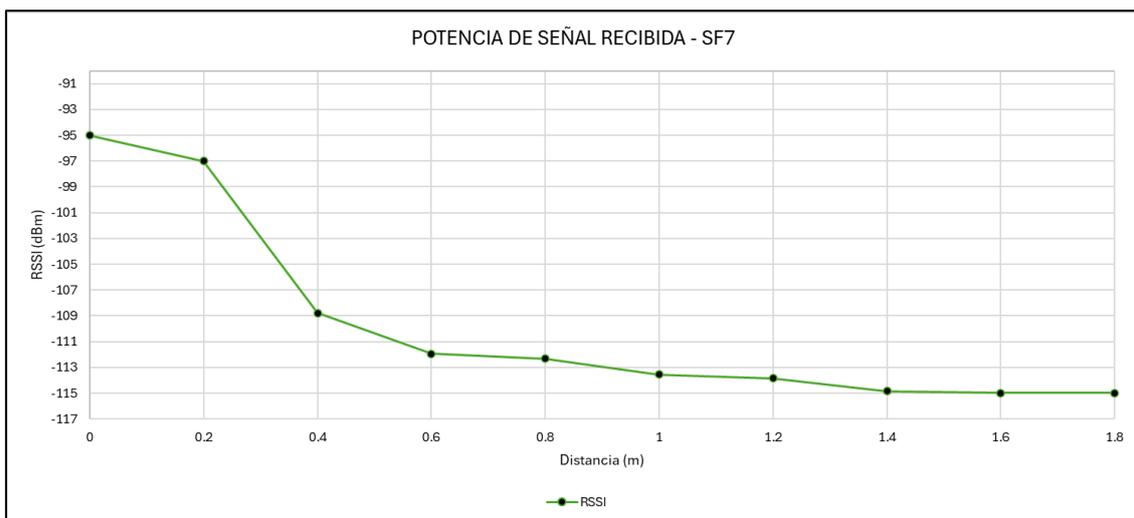
4.5.5 Resultados de pruebas en piscina con configuración SF7.

La última configuración de Spreading Factor evaluada fue la de SF7, la cual es el valor más bajo de este factor que se puede configurar en LoRa, para este caso los resultados que se han obtenido en cuanto a la potencia de recepción de la señal se pueden visualizar en la Figura 112. Las distancias evaluadas en esta configuración también se encuentran en el nivel de los centímetros, ya que la propagación de la señal se ha visto reducida hacia los 1.8m de distancia antes de perderse por completo.

En la Figura 112 se rescata que en esta configuración, a una distancia relativamente cercana de 0.2m el valor de RSSI se mantiene estable en los -97dBm, mientras que si la distancia aumenta hacia los 0.6m, este valor decae severamente hasta los -112dBm. De igual forma el valor de RSSI se estabiliza al final en -115dBm, dando este valor como constante en todas las configuraciones antes de que la señal deje de ser receptada.

Figura 112.

Grafica de RSSI – piscina – SF7.

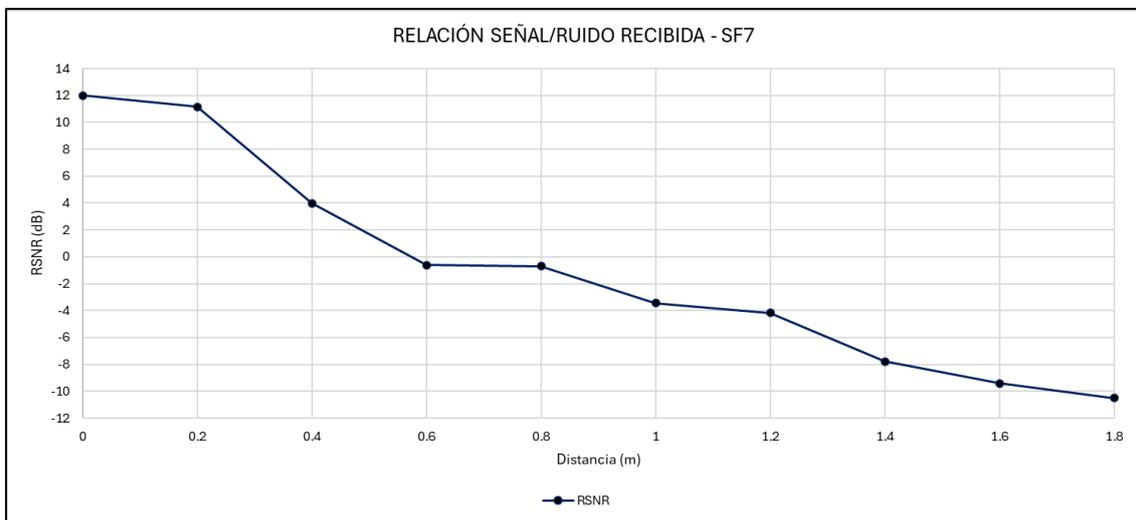


Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSSI evaluados desde 0.2m a 1.8m de distancia horizontal en una configuración SF7.

El resultado de los valores de RSNR se puede visualizar en la Figura 114, donde la gráfica es consistente con la Figura 112 a 0.2m de distancia, ya que se visualiza una estabilidad de la señal de datos a esta distancia, teniendo en este caso el valor más alto de RSNR de todas las configuraciones, que es 11 dB. Sin embargo, al aumentar la distancia se observa como el valor de RSNR comienza a decaer rápidamente obteniendo su valor más bajo de -11dB a los 1.8m de distancia, donde la señal se pierde debido a la tolerancia de este factor, que se reduce en 9 puntos en comparación con el SF12.

Figura 113.

Grafica de RSNR – piscina – SF7.

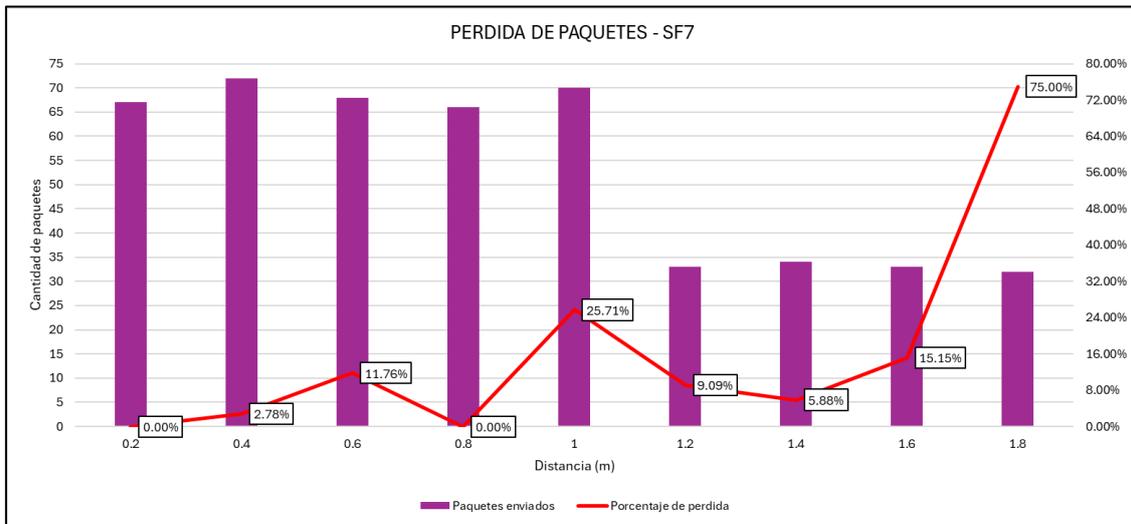


Nota: En la figura se puede visualizar los valores de RSNR evaluados a diferentes distancias que van desde 0.2m hasta 1.8m horizontal, en una configuración SF7.

La pérdida de paquetes en la configuración SF7, es una de las más significativas, puesto que se observan pérdidas discontinuas a partir de los 0.4m, lo que puede explicarse por lo altamente oscilante del factor RSNR entre 0.4 a 1m de distancia. Sin embargo, por encima de 1m estas pérdidas comienzan a verse regularmente y alcanzan un máximo del 75% a 1.8m, donde la señal de datos se pierde (ver Figura 114).

Figura 114.

Grafica perdida de paquetes - piscina – SF7.

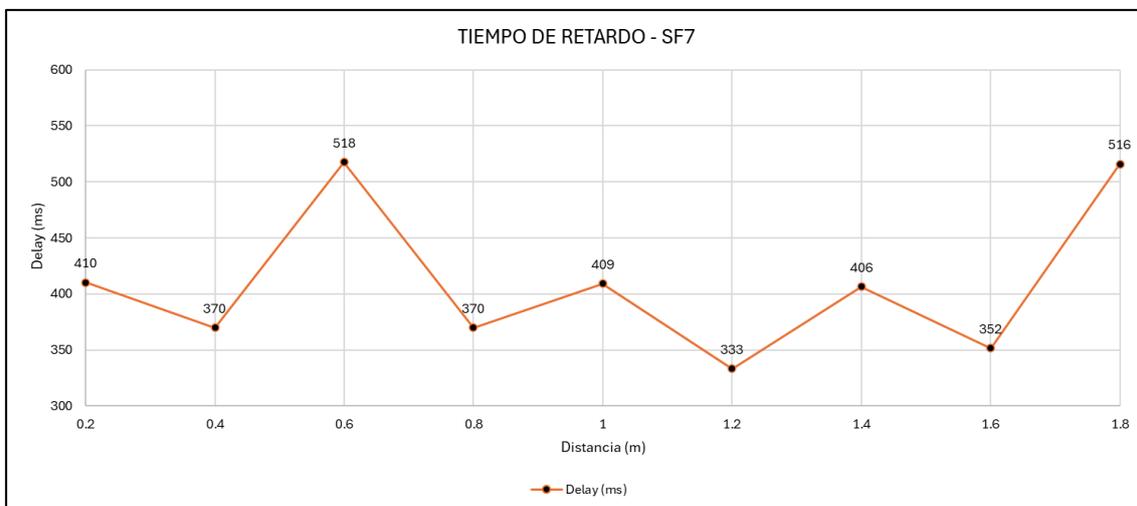


Nota: En la figura se puede visualizar el flujo de paquetes desde 0.2m hasta 1.8m de distancia horizontal, evidenciando pérdidas de paquetes en una configuración SF7.

Por ultimo en la Figura 115, se observa los valores de delay para esta configuración, los cuales oscilan entre 330ms a 520ms con un promedio de 409ms, es decir, que en esta configuración el delay se reduce en 150ms en comparación con el SF9. Se entiende que SF7 transmite datos de forma más rápida, sin embargo esta rapidez de transmisión conlleva una pérdida en la distancia de transmisión de los datos considerable.

Figura 115.

Grafica de Delay – piscina -SF7.



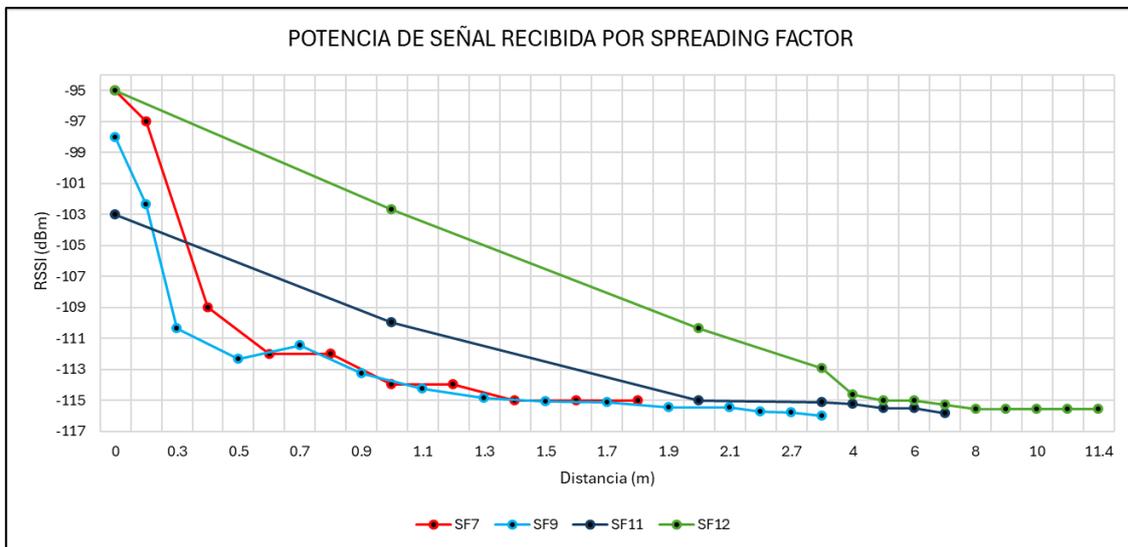
Nota: En la figura se puede visualizar los valores de retardo (Delay) que se han evidenciado con una configuración de SF7.

4.5.6 Comparación de resultados de pruebas en piscina.

Una vez se han obtenido todos los resultados en cada una de las configuraciones evaluadas, se presenta la Figura 116, en la cual, es posible apreciar los valores de RSSI en los que opera cada señal dependiendo de su Spreading Factor en función de la distancia evaluada, que va desde los 0.2m hasta los 11.4m. En este caso es posible apreciar que la señal con SF7 es la que menor distancia alcanza, mientras que la señal configurada con SF12 es la que permite mayor rango de propagación, llegando hasta los 11.4m.

Figura 116.

Grafica de RSSI por cada SF.

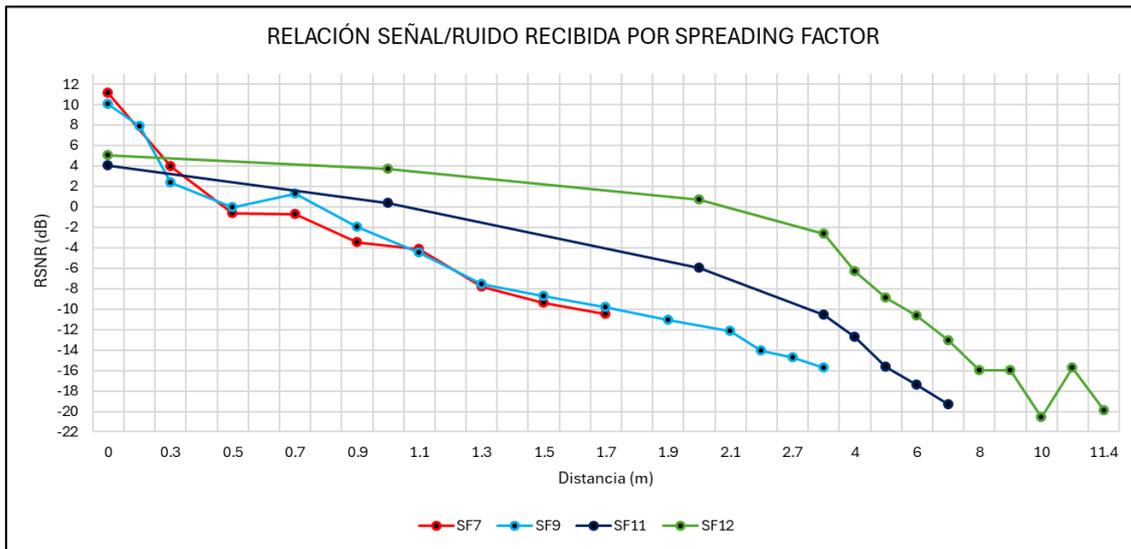


Nota: En la figura se puede visualizar un gráfico de comparación de la potencia de señal recibida con diferentes configuraciones de SF a diferentes distancias evaluadas.

Otro de los valores que se presenta en comparación es el de RSNR, que se aprecia en la Figura 117, donde se observa de igual forma que en conjunto con el RSSI permiten que la señal configurada en SF12 sea la más robusta ante pérdidas e interferencias en un medio subacuático. Mientras que la configuración de SF7 aunque consigue el mayor valor de RSNR al inicio, lo pierde rápidamente a cortas distancias.

Figura 117.

Grafica de RSNR por cada SF.



Nota: En la figura se puede visualizar un gráfico de comparación del valor de la relación Señal/Ruido recibida con diferentes configuraciones de SF a diferentes distancias evaluadas.

De lo anterior, se aprecia que los valores de SF, son consistentes, es decir que conforme estos aumenten, la señal también aumenta su rango de distancia. Un resumen con los datos promedio obtenidos se presenta en la Tabla 24.

Tabla 24.

Datos obtenidos de pruebas en piscina.

Dato	SF7	SF9	SF11	SF12
Distancia máxima de transferencia de datos referencial.	1.8m	3m	7m	11.4m
Distancia máxima de transferencia de datos real.	1.93m	3.08m	7.04m	11.42m
RSSI mínimo alcanzado.	-115 dBm	-116 dBm	-116 dBm	-116 dBm
RSNR mínimo alcanzado.	-11 dB	-17 dB	-20 dB	-20 dB
Delay promedio	409ms	535ms	3416ms	5940ms

Nota: En la tabla se especifica el promedio de datos obtenidos según las pruebas realizadas en cada una de las configuraciones de SF.

4.6 Ambiente de pruebas laguna de Yahuarcocha.

Otro de los Análisis de la tecnología LoRa en ambientes subacuáticos se han efectuado en un ambiente no controlado (Laguna de Yahuarcocha). En este caso, gracias a los resultados obtenidos en la sección 4.5, donde se confirma que el factor SF12 es el más robusto para trabajar en entornos subacuáticos, se realizó un análisis de la comunicación LoRa con dicha configuración.

4.6.1 Preparación de escenario.

Con el objetivo de realizar una comunicación directa hacia la Boya de Comunicaciones, mediante el Módulo Wifi de la palca Heltec LoRa Wifi 32 V3, para posteriormente utilizar esta comunicación en el envío de datos hacia Firebase, se ha empleado la misma antena Ubiquiti Loco M2 del ambiente de pruebas en piscina, la cual permite generar una red Wifi a una distancia de entre 1 a 2 km con una potencia de 21 dBm, para ello se ha ubicado esta antena en un espacio que permite la visualización completa de la Laguna de Yahuarcocha (ver Figura 118).

Se han realizado pruebas de conexión en diferentes ubicaciones de la Laguna de Yahuarcocha, para verificar el funcionamiento de la red que se ha generado con el SSID UTN_TEL_DAMR, gracia a esto, la Boya de Comunicaciones puede utilizar esta conexión a internet para la transferencia de datos hacia Firebase.

Figura 118.

Antena Loco M2 apuntando hacia la laguna de Yahuarcocha.

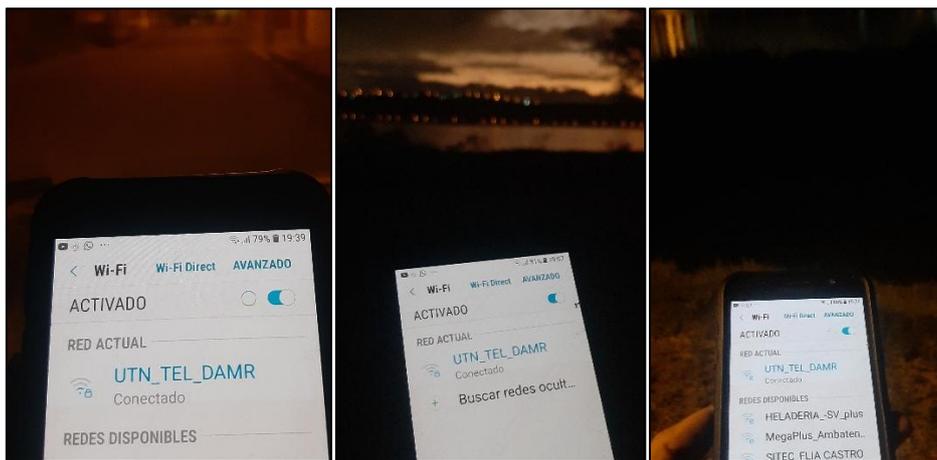


Nota: En la figura se puede visualizar la antena Ubiquiti Loco M2 utilizada para dar conexión Wifi hacia diferentes sectores de la Laguna de Yahuarcocha.

En la Figura 119 se puede visualizar la recepción de la señal desde diferentes ubicaciones alrededor de la Laguna de Yahuarcocha, en este caso, se aprecia que mediante un smartphone es posible realizar la conexión hacia la red UTN_TEL_DAMR, teniendo más o menos señal dependiendo de la ubicación.

Figura 119.

Pruebas de cobertura Wifi en diferentes sectores de Yahuarcocha.



Nota: En la figura se puede visualizar la recepción de la red Wifi UTN_TEL_DAMR desde diferentes sectores de la laguna de Yahuarcocha.

Una vez que se ha tenido la disponibilidad de la red Wifi, se realizó la instalación del Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones en la Laguna de Yahuarcocha. Como se

aprecia en la Figura 120-a, para lo cual se utilizó una polea que permitió la sujeción del Nodo Sensor mediante una cuerda que se encuentra marcada en cada metro, con el objetivo de poder tener una referencia de la profundidad a la cual se encuentra el dispositivo sumergido (ver Figura 120-b).

Figura 120.

Inserción de Nodo Sensor en la Laguna de Yahuarcocha.

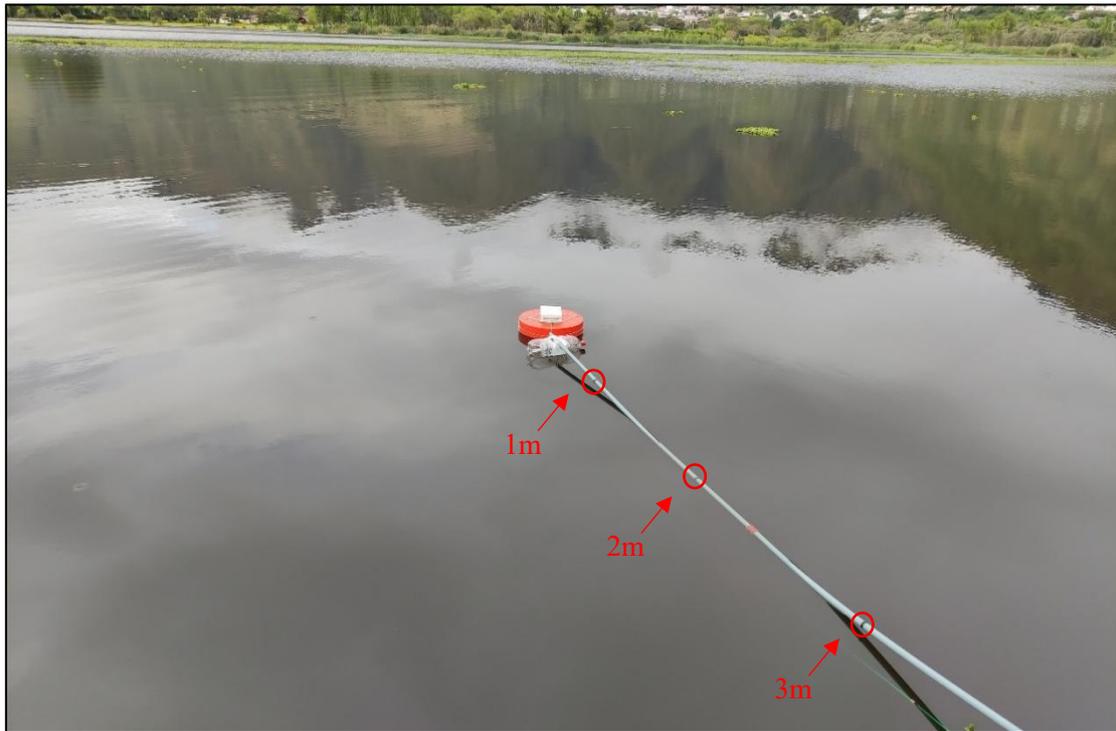


Nota: En la figura se puede visualizar la instalación del Nodo Sensor en la Laguna de Yahuarcocha, se observa un sistema de polea (a) así como una cuerda de sujeción marcada cada metro.

También se realizó la instalación de la Boya de Comunicaciones, para lo cual se hizo uso de un tubo de sujeción en PVC (ver Figura 121), el cual se encuentra marcado cada metro, con el objetivo de medir la distancia horizontal que toma la Boya de Comunicaciones con referencia a la posición del Nodo Sensor según lo explicado en la sección 4.4 referente a las distancias reales.

Figura 121.

Inserción de Boya de Comunicaciones en la Laguna de Yahuarcocha.



Nota: En la figura se puede visualizar la instalación de la Boya de Comunicaciones en la Laguna de Yahuarcocha, la cual es sujeta por un tubo PBC marcado cada metro.

Para una visualización más completa del proceso que se siguió para la instalación tanto del Nodo Sensor como de la Boya de Comunicaciones en la Laguna de Yahuarcocha ,revisar el ANEXO 6 donde se muestran más imágenes del proceso, así como el ANEXO 7 donde se indica un video del proceso completo.

4.6.2 Resultados de pruebas en la Laguna de Yahuarcocha – SF7.

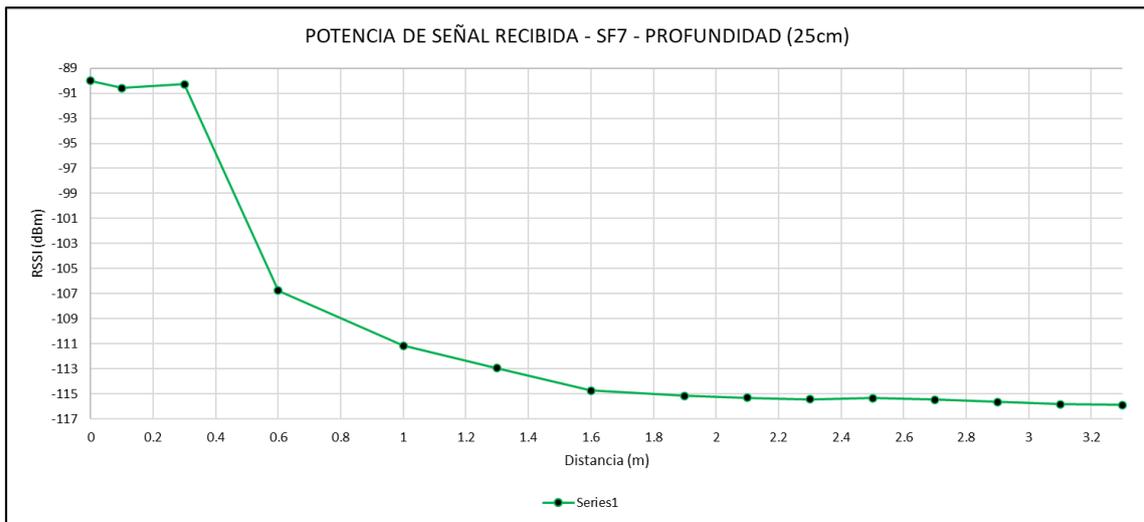
Uno de los primeros resultados arrojados, se visualiza en la Figura 123, en la cual se ha evaluado la comunicación del sistema desde los 0.2m hasta los 3.3m de distancia con una configuración SF7, que es el menor valor de Spreading Factor que es posible configurar en LoRa, evaluado a una profundidad de la antena de transmisión de 0.25m.

Los resultados arrojan que la señal comienza con una potencia relativamente alta de recepción que rodea los -90dBm en distancias cortas de separación de 0.2m, pero

decrece rápidamente conforme la distancia de separación entre los módulos aumenta, cayendo hasta los -107 dBm a 0.6m y estabilizándose en -116dBm, tal como en las pruebas realizadas en el ambiente de pruebas en piscina, teniendo un corte en la comunicación a los 3.3m.

Figura 122.

Grafica de RSSI – Yahuarcocha – SF7.

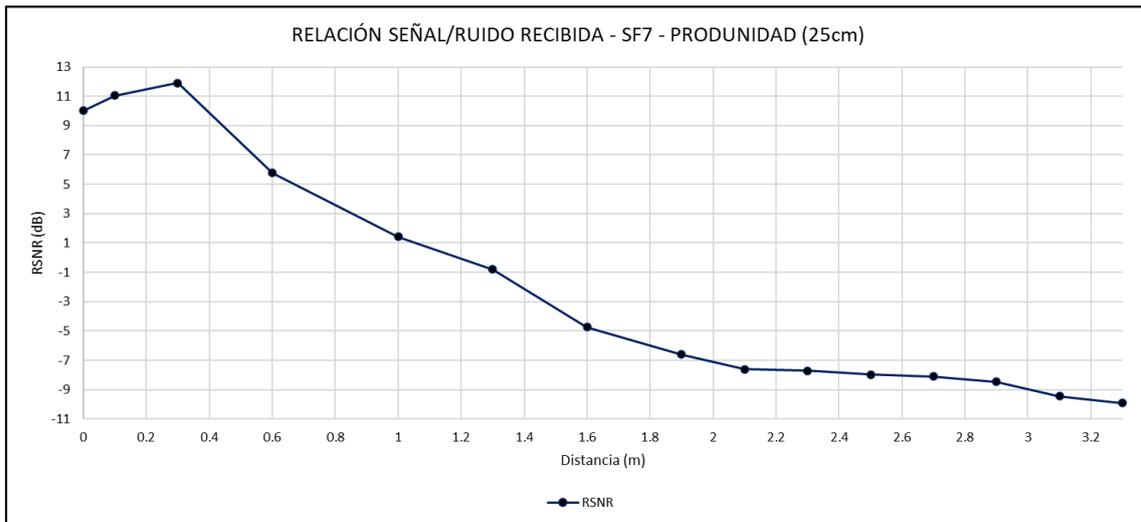


Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSSI evaluados desde 0.1m a 3.3m de distancia horizontal en una configuración SF7.

Teniendo en cuenta que la señal se ha perdido a 3.3m, esto va en concordancia con los datos arrojados por el factor de RSNR, los cuales se visualizan en la Figura 123, donde al inicio de la comunicación (alrededor de los 0.3m) el factor RSNR es bastante elevado, rozando los 10dB, pero conforme la distancia de separación aumenta, dicho factor tiende a disminuir drásticamente, alcanzando su límite máximo de -10dB para un SF7 en los 3.3m. En este caso, en concordancia con las pruebas tomadas en piscina, el factor RSNR tiene un límite de tolerancia en SF7 de -10dB.

Figura 123.

Grafica de RSNR – Yahuarcocha – SF7.



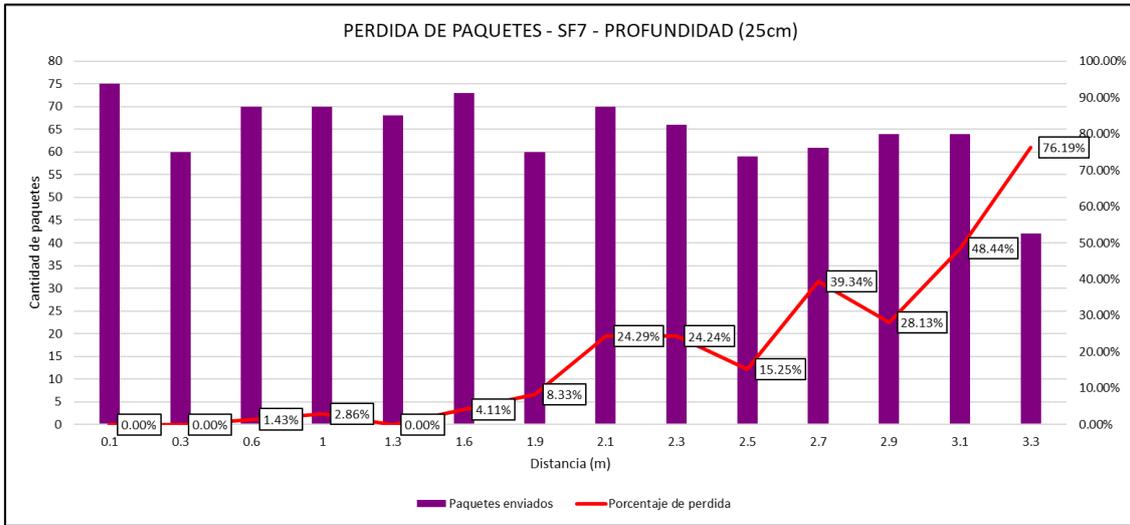
Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSNR evaluados desde 0.1m a 3.3m de distancia horizontal en una configuración SF7.

La grafica de pérdidas que se visualiza en la Figura 124, correspondiente a las pruebas de SF7 realizadas en la Laguna De Yahuarcocha a una profundidad de 0.25m, estas dan un panorama más claro de como la comunicación ha ido decayendo conforme aumenta la distancia de separación entre los nodos.

En este caso las pérdidas de paquetes comienzan a una distancia de separación de 1.6m, donde se observan perdidas del 4.11% y aumenta según la distancia, llegando a tener pérdidas significativas alrededor de los 2.7m donde el porcentaje ya es considerable, rodeando el 40%. Finalmente el porcentaje de pérdidas se dispara significativamente por encima de los 3m de separación, llegando a obtener un valor máximo del 76% de perdida en los 3.3m, justo antes de que la señal se pierda.

Figura 124.

Grafica de perdida de paquetes – Yahuarcocha – SF7.

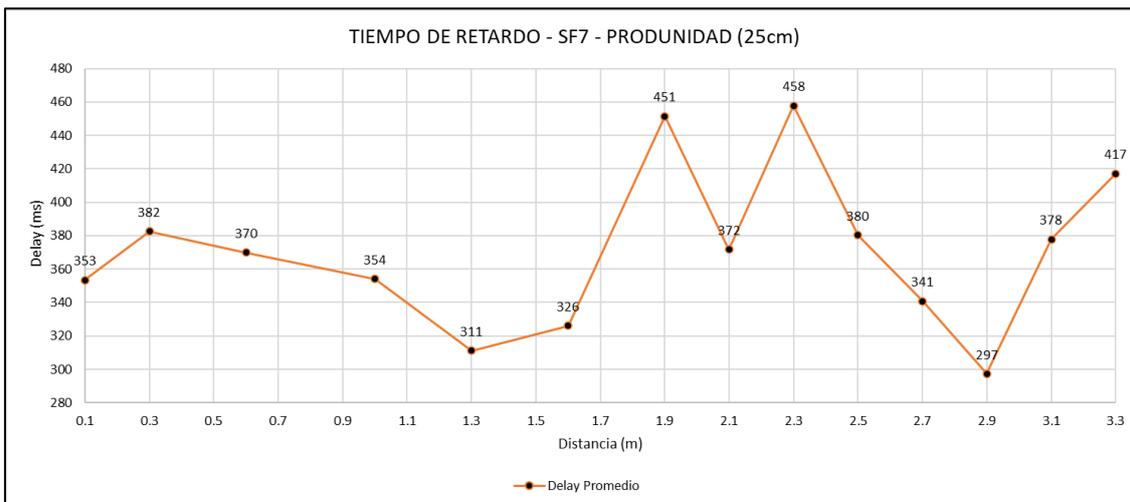


Nota: En la figura se puede visualizar el flujo de paquetes desde 0.1m hasta 3.3m de distancia horizontal, evidenciando perdidas de paquetes en una configuración SF7.

Por ultimo en la Figura 125, se observa los valores de delay para esta prueba en SF7, dichos valores oscilan entre 290ms a 460ms con un promedio de 371ms. Se observa que desde 0.1m hacia los 1.4m el delay se encuentra un poco más estabilizado, pero a partir de 1.5m los picos son más variantes.

Figura 125.

Grafica de Delay – Yahuarcocha – SF7.



Nota: En la figura se puede visualizar los valores de retardo (Delay) que se han evidenciado con una configuración de SF7.

4.6.3 Resultados de pruebas en la Laguna de Yahuarcocha – SF12.

Una de las configuraciones más interesantes de analizar en la Laguna de Yahuarcocha es mediante una configuración SF12, puesto que en las pruebas realizadas en piscina, es la que mejor se ha adaptado al ambiente subacuático y la que más distancia de transmisión de datos ha permitido. En este caso para la configuración SF12 se han realizado pruebas a 3 diferentes profundidades (0.25m, 0.5m y 0.8m) para observar las distancias alcanzadas de transmisión de datos.

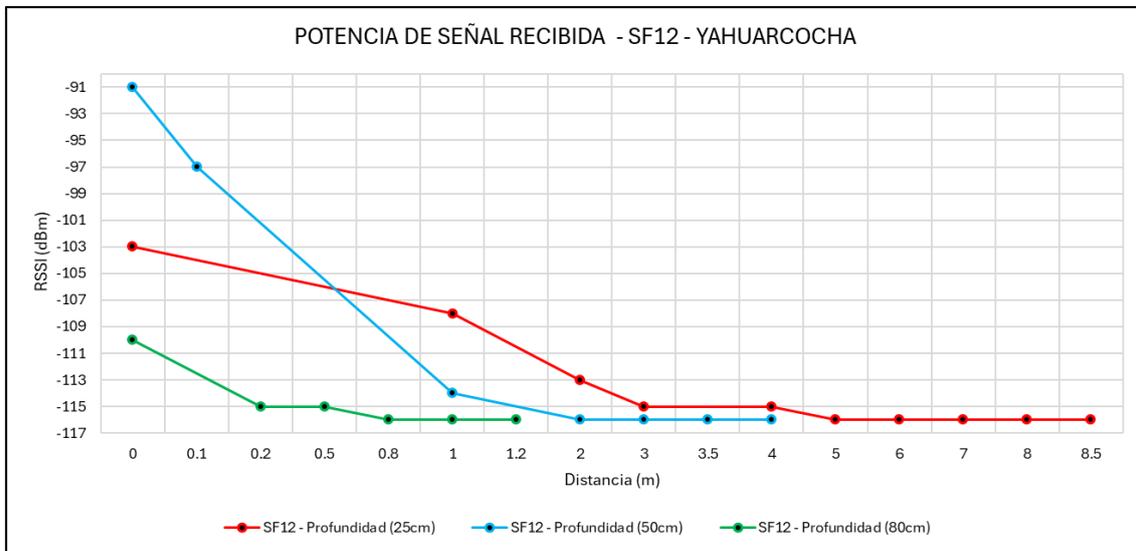
En la Figura 126 se visualizan los resultados arrojados para el caso del RSSI de las 3 profundidades evaluadas. Lo primero que llama la atención en la gráfica es que las distancias alcanzadas son diferentes, puesto que entre más profundo se encuentre el Nodo Sensor sumergido, la señal se atenúa considerablemente, dando como resultado que a una profundidad de 0.8m está solo alcance una distancia de transmisión de datos de 1.2m. En el caso de 0.5m de profundidad, se observa que la señal aumenta su rango de transmisión hacia los 4m, mientras que la señal que más rango ha alcanzado es en la que la antena de transmisión se encuentra a los 0.25m de profundidad.

La grafica presentada en la Figura 126, demuestra que el RSSI empieza en un valor relativamente alto de -91dBm a una profundidad de 0.5m y va decayendo considerablemente hacia los -114dBm cuando la distancia de separación entre los nodos llega a 1m, consiguiendo estabilizarse en -116dBm a partir de esta distancia, hasta que se pierde en los 4m de distancia. Para el RSSI evaluado a una profundidad de 0.8m, este comienza ya con una potencia de señal relativamente baja de -110, lo que causa que al aumentar la distancia de separación decaiga rápidamente y dicha comunicación se pierda de forma temprana a 1.2m.

La señal que más distancia de propagación ha alcanzado, es cuando el Nodo Sensor se encuentra más cerca de la superficie a 0.25m, en este caso la señal comienza con un valor de -103dBm y decae levemente conforme aumenta la distancia, teniendo que a 1m de separación, esta se encuentra en -108dBm y alcanza su punto máximo de -116dBm a los 8.5m de distancia, donde la señal se pierde definitivamente.

Figura 126.

Grafica de RSSI – Yahuarcocha – SF12.



Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSSI evaluados desde 0.1m a 8.5m de distancia horizontal en una configuración SF12 a diferentes profundidades.

Lo valores anteriores de alcance de la señal se corroboran con la Figura 127, donde se observa el factor RSNR de estas 3 señales evaluadas. Aquí se visualiza que la señal que se evaluó a 0.8m de profundidad, es la que comienza con un valor de -2dB, que es relativamente más bajo de RSNR en comparación con las otras 2 señales, se observa que el valor de Señal/Ruido recibida decae considerablemente a solo 1.2m de distancia, donde alcanza el valor máximo de -20dBm para posteriormente perderse.

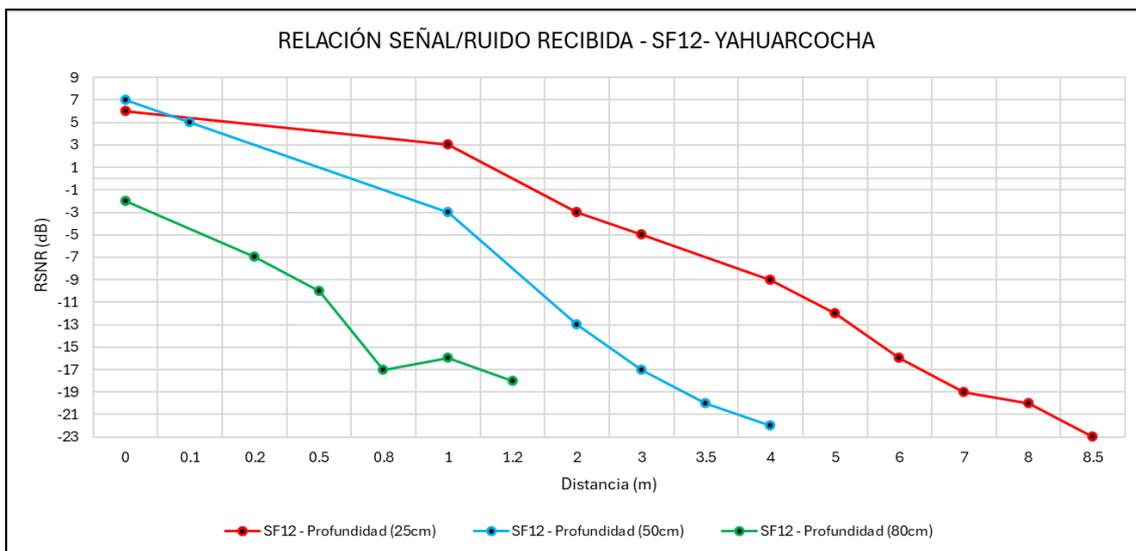
En el caso de la señal evaluada a 0.5m de profundidad, esta inicia con un valor más alto de RSNR, alrededor de 7dB, pero este valor decae de forma más rápida hacia -1dB a 1m de distancia en comparación con la señal de 0.8m de profundidad. Posterior a

esto el pico de caída del valor de RSNR se observa más prolongado alcanzando un valor máximo de -22dB , donde la señal se pierde definitivamente.

En el caso de la señal evaluada a 0.25m de profundidad del Nodo Sensor, se visualiza que es la que más alcance tiene, puesto que el valor de RSNR decae más levemente en comparación a las otras 2 señales, llegando a los 3dB a 1m de distancia, siendo esto un valor relativamente alto, y comienza su descenso de forma más moderada alcanzando un máximo de -23dB (dato curioso teniendo en cuenta que la placa LoRa tiene una tolerancia de -20dB) a los 8.5m de separación, donde la señal se pierde por completo.

Figura 127.

Grafica de RSNR – Yahuarcocha – SF12.



Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSNR evaluados desde 0.1m a 8.5m de distancia horizontal en una configuración SF12 a diferentes profundidades.

En el caso de las pérdidas de paquetes, en la Figura 128, donde se representa las perdidas en una configuración SF12 en las 3 profundidades evaluadas, se observa en el caso de la comunicación con el nodo sumergido a 0.25m que los paquetes llegan con normalidad sin perdidas hasta los 5m de separación, mientras que a los 6m se observa una perdida no significativa del 2.63% y nuevamente del 7.32% a 7m.

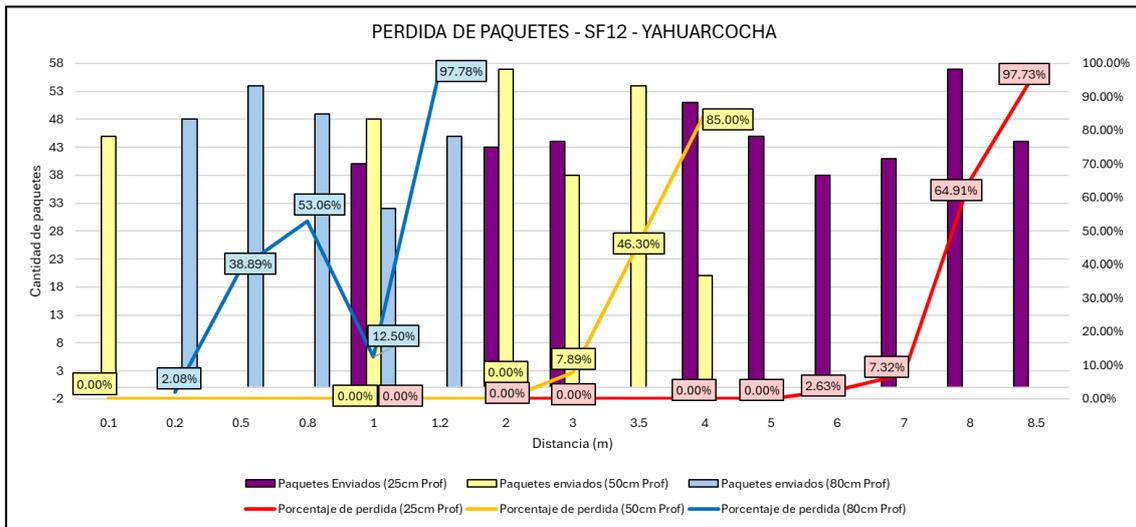
Sin embargo, por encima de los 7m, casi rozando los 8m de separación entre los nodos, la pérdida se dispara de forma pronunciada alrededor del 65% y si la distancia aumenta solo 0.5m más, es decir 8.5m, esta pérdida se desborda hacia el 98%. Esto concuerda con los datos de RSNR arrojados, ya que si se observa la Figura 126, el valor de 8.5m tiene un RSNR de -23dB, lo cual está por debajo del -20dB permitido, es decir que los datos llegan con un alto índice de pérdida, por ende es una señal totalmente corrupta.

Por otro lado, para el caso de una profundidad del Nodo Sensor de 0.5m respecto a la superficie del agua, los datos llegan de forma regular hasta los 2m de separación, observándose pérdidas del 7.89% a los 3m. A partir de aquí las pérdidas se vuelven significativas, ya que se elevan sustancialmente en un 46.30% a los 3.5m llegando a alcanzar el 85% a los 4m antes de que la señal se pierda por completo (ver Figura 128).

En el caso de la configuración SF12 a 0.8m de profundidad (la cual es la misma que se utilizó para las pruebas en piscina), la comunicación tiene pérdidas desde el primer instante en que se evalúa, aunque estas son significativamente bajas a 0.2m, estas pérdidas son un poco más irregulares que en las anteriores configuraciones, ya que aumentan drásticamente a un 38.89% al separar los nodos a 0.5m y posteriormente a 54.06% en 0.8m. Sin embargo, se observa que en el caso de una separación de 1m, la comunicación se recupera bajando el nivel de pérdidas de paquetes hacia el 12.50%, pero aumenta de forma significativa a 1.2m de separación, llegando así al 98% de pérdidas donde la señal se pierde.

Figura 128.

Grafica de perdida de paquetes – Yahuarcocha – SF12.

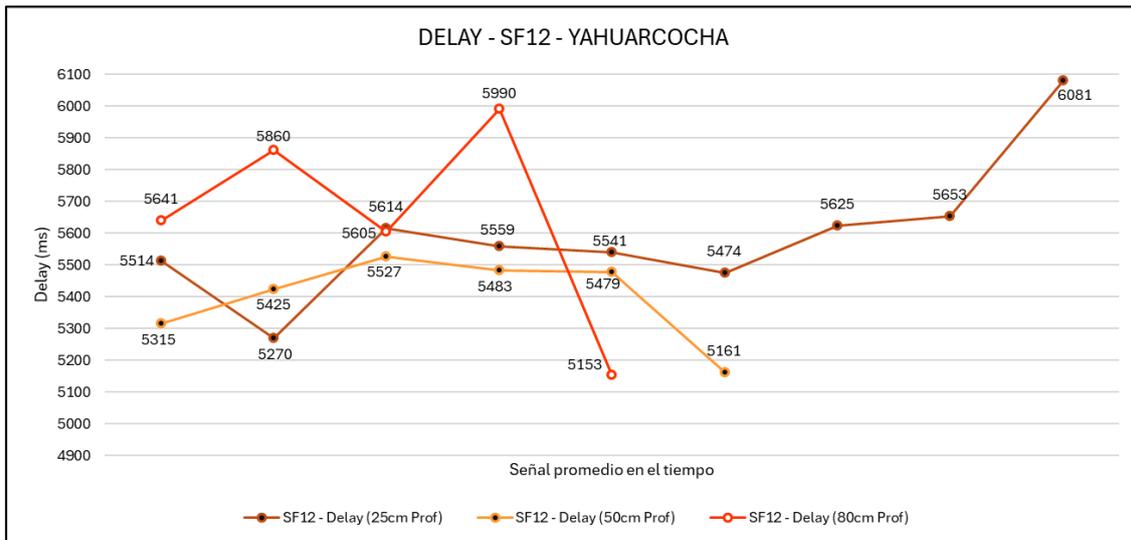


Nota: En la figura se puede visualizar el flujo de paquetes desde 0.1m hasta 8.5m de distancia horizontal, evidenciando perdidas de paquetes en una configuración SF12 a 0.25m de profundidad.

En el caso del delay, si se observa la Figura 129, se presentan las líneas de tendencia de este factor correspondiente a la configuración SF12 a diferentes profundidades. Si se observa el delay se encuentra en un rango de 5170ms a 6090ms. Sin embargo, si se observa la señal SF12 – delay (80cm profundidad), es posible observar que es la señal más irregular en cuanto al delay ya que presenta picos bastante prolongados, mientras que las otras 2 señales son más moderadas. El promedio de estas se observa en la Tabla 25.

Figura 129.

Grafica de delay – Yahuarcocha – SF12.



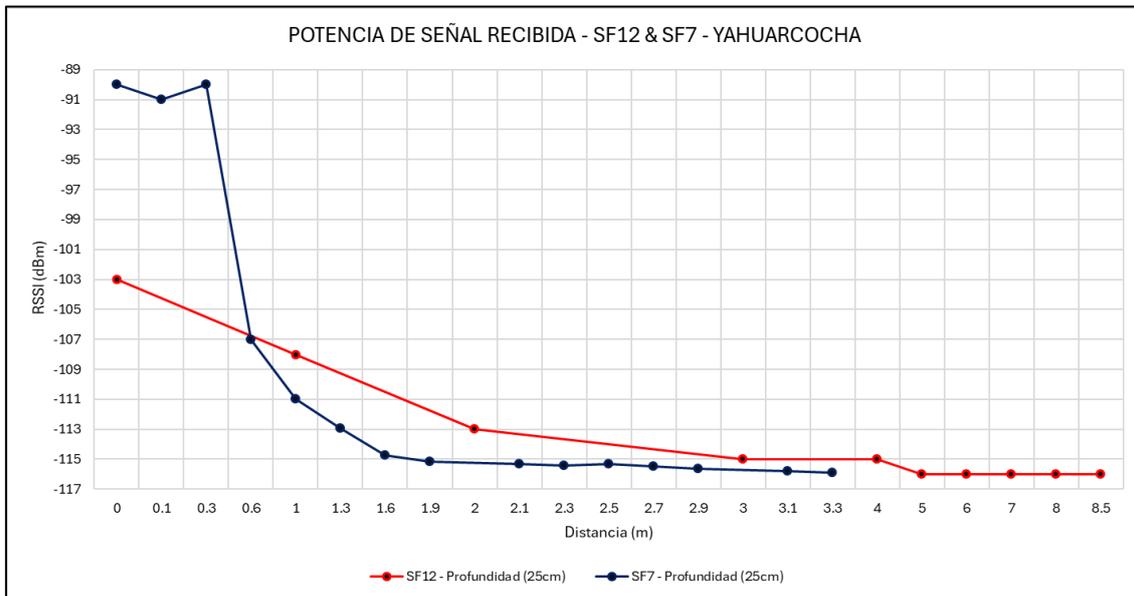
Nota: En la figura se puede visualizar los valores de retardo (delay) que se han evidenciado con una configuración de SF12 a diferentes profundidades.

4.6.4 Comparación de resultados de pruebas en la Laguna de Yahuarcocha.

Para estas pruebas realizadas en la Laguna de Yahuarcocha se tuvieron 2 tipos de configuraciones de SF, las cuales son SF7 y SF12, por ende se presenta la Figura 130 donde se realiza la comparación de estas 2 señales de datos, teniendo en cuenta su mismo nivel de profundidad de 0.25m. En este caso se observa que la señal SF7 comienza con un valor de RSSI bastante elevado, rozando los -90dBm, mientras que la señal SF12 comienza con un valor moderado de -103dBm. Sin embargo la señal de configuración SF7 decae de forma abrupta al aumentar la distancia de separación, mientras que la señal SF12 tiene una caída más moderada. Como resultado final se observa que la señal SF12 mantiene su dominio en el rango de alcance, ya que se extiende hacia los 8.5m, alrededor de 5m más de alcance que SF7.

Figura 130.

Grafica comparativa de RSSI para SF12 & SF7 – Yahuarcocha.



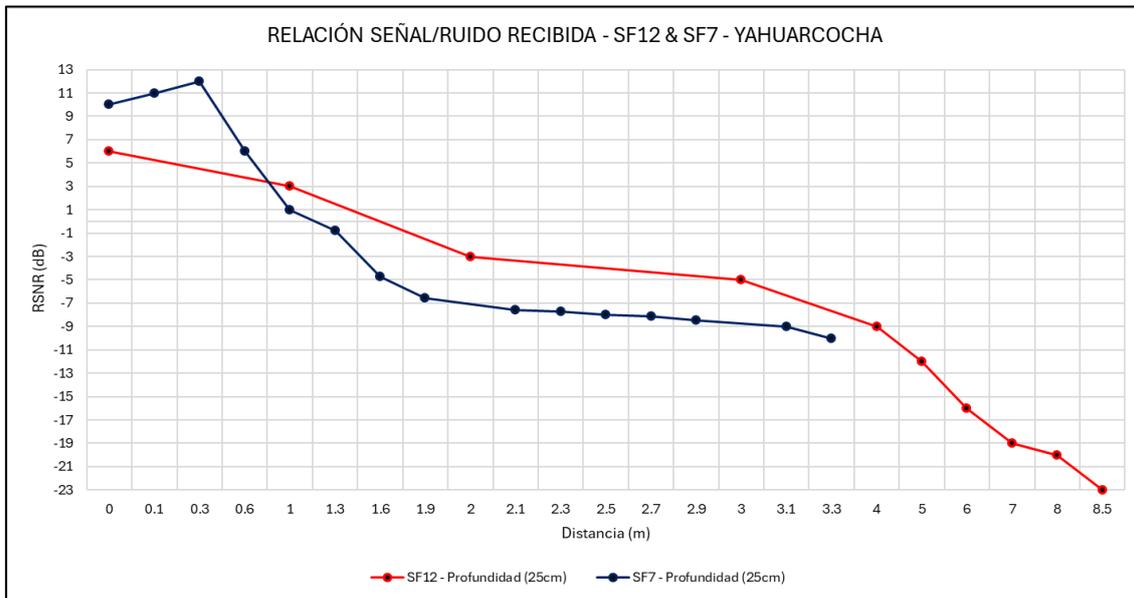
Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSSI evaluados desde 0.1m a 8.5m de distancia horizontal en una configuración SF12 en comparación con SF7 a 0.25m de profundidad.

En el caso del factor RSNR, los resultados de la comparación entre el SF7 y SF12 se presentan en la Figura 131, aquí se visualiza la caída de la relación Señal/Ruido recibida, en el caso de la señal SF7, se visualiza que comienza en un valor de 12dB y va decayendo para alcanzar -7dB en los 1.9m, estabilizándose en su caída hasta los -10dB en 3.3m donde la señal se pierde completamente.

De la misma forma, la señal SF12 comienza con un valor más bajo de 6dB y decae de forma menos prolongada hasta llegar a los 5m de distancia, donde su caída se ve más pronunciada y termina en -20dB en los 8.5m cuando la señal se pierde.

Figura 131.

Grafica comparativa de RSNR para SF12 & SF7 – Yahuarcocha.



Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSNR evaluados desde 0.1m a 8.5m de distancia horizontal en una configuración SF12 en comparación con SF7 a 0.25m de profundidad.

Como resumen de esta comparación entre las configuraciones SF7 y SF12 tomadas en la Laguna de Yahuarcocha, se presenta la Tabla 25, donde se establecen los valores de SF12 a cada profundidad así como el de SF7 dando un promedio de los datos recolectados.

Tabla 25.

Datos obtenidos de pruebas en Yahuarcocha.

Dato	SF12			SF7
	Profundidad			0.25m
	0.25m	0.5m	0.8m	
Distancia máxima de transferencia de datos referencial.	8.5m	4m	1.2m	3.3m
Distancia máxima de transferencia de datos real.	8.5m	4.01m	1.4m	3.3m
RSSI mínimo alcanzado.	-116 dBm	-116 dBm	-116 dBm	-116 dBm
RSNR mínimo alcanzado.	-23 dB	-22 dB	-18 dB	-10 dB
Delay promedio	5592ms	5398ms	5650ms	371ms

Nota: En la tabla se especifica el promedio de datos obtenidos según las pruebas realizadas en cada una de las configuraciones de SF.

4.7 Ambiente de pruebas laguna de San Pablo.

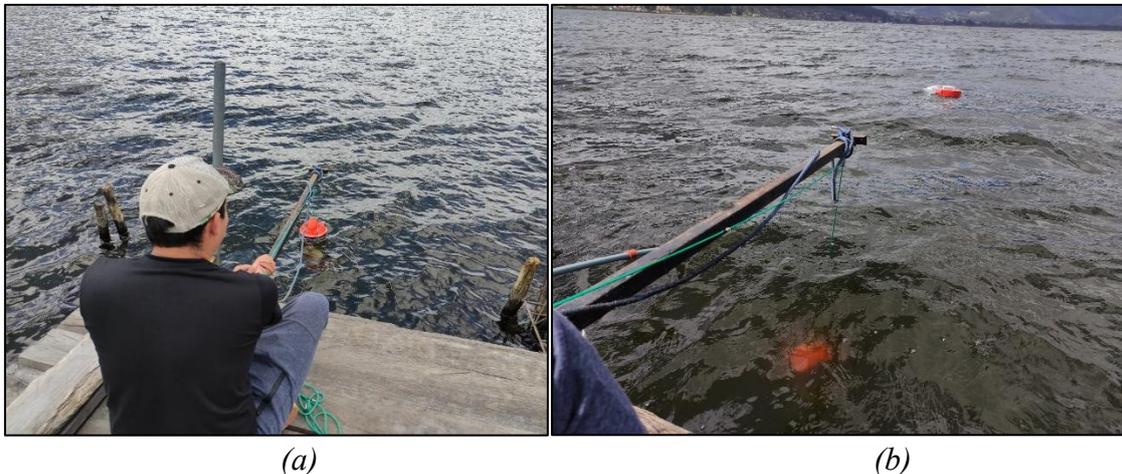
Otro de los escenarios que se ha tomado en cuenta para realizar una comparación de los datos, es la Laguna de San Pablo, ubicada en la provincia de Imbabura (Ecuador), las pruebas en esta laguna se han realizado con el objetivo de tener en cuenta diferentes ambientes subacuáticos. Las características de esta laguna se pueden visualizar en una tabla en el ANEXO 8 y gracias a las diferentes propiedades del medio, este permite obtener resultados diferentes a los ya visualizados.

4.7.1 Preparación de escenario.

Para la preparación de este escenario de pruebas se ha seguido el mismo proceso de la Laguna de Yahuarcocha, en este caso se hizo uso de una polea para ayudar a sumergir el Nodo Sensor a diferentes profundidades (ver Figura 132-a).

Figura 132.

Instalación de Nodo Sensor en Laguna de San Pablo.



Nota: En la figura se puede visualizar la instalación del Nodo Sensor en la Laguna de San Pablo (a), así como una perspectiva de la distancia entre los 2 sensores (b).

Con la ayuda de un tubo PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada se midió las distancias horizontales desde el punto en el que se sumergió el Nodo Sensor hasta donde se ubica la Boya de Comunicaciones, la cual se puede visualizar en la Figura 133.

Figura 133.

Instalación de Boya de Comunicaciones en la Laguna de San Pablo.



Nota: En la figura se puede visualizar la Boya de Comunicaciones flotando sobre la Laguna de San Pablo.

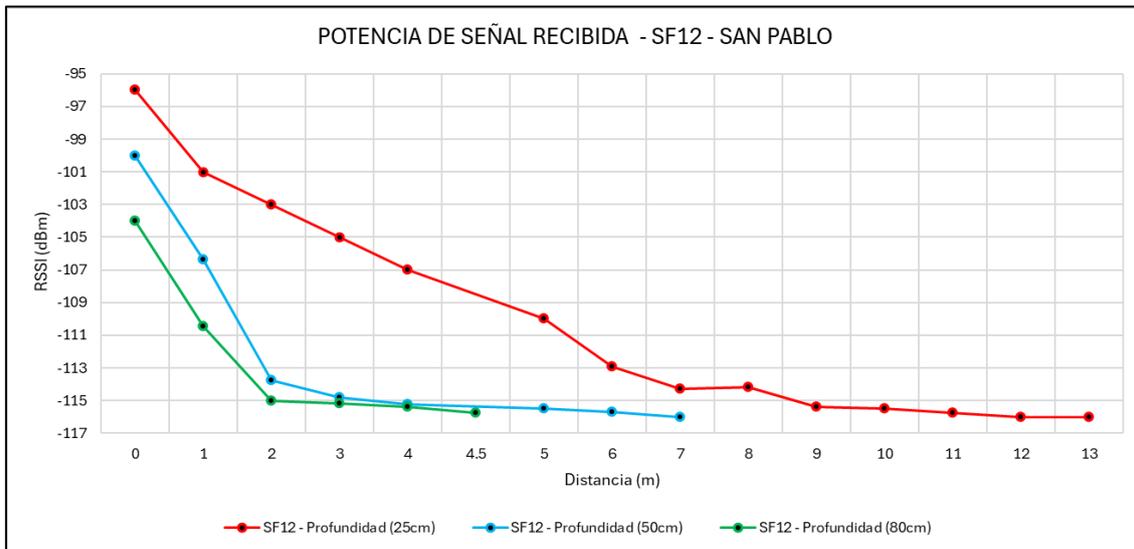
4.7.2 Resultados de pruebas en la Laguna de San Pablo– SF12.

Los resultados obtenidos en las pruebas que se han realizado en la Laguna de San Pablo muestran una leve mejora con respecto a las realizadas en la Laguna de Yahuarcocha. En este caso si se observa la Figura 133, la señal que se evaluó a 0.8m de profundidad y es viable una distancia de 4.5m, de igual forma. La señal evaluada a 0.5m de profundidad alcanza una viabilidad máxima de 7m. Finalmente la señal evaluada a 0.25m es la que más rango alcanza, siendo viable a una distancia de 13m.

En todos los casos se observa que la potencia de señal recibida se estabiliza en -116dBm antes de que la señal se pierda por completo, con la diferencia que la señal evaluada a 0.25m es la que tiene una caída en su nivel de potencia más moderado que las otras 2, puesto que para 0.5m y 0.8m se visualiza que desde que la señal inicia la transmisión hasta los 2m horizontales, el pico de caída es bastante pronunciado (ver Figura 134).

Figura 134.

Grafica de RSSI – SF12 – Laguna de San Pablo.



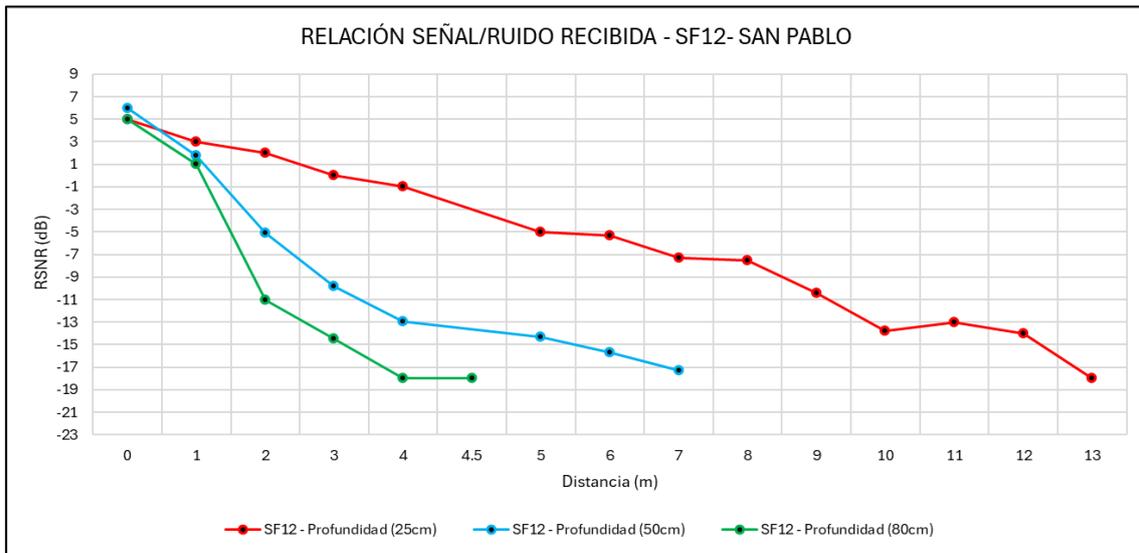
Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSSI evaluados desde 1m a 13m de distancia horizontal en una configuración SF12 para diferentes profundidades.

En el caso del parámetro de RSNR, se puede visualizar en la Figura 135 que las 3 señales inician en un valor que rodea los 6dB, con la diferencia que la señal evaluada a 0.25m tiende a decaer más levemente en cada metro de separación entre los nodos, llegando a un valor de -18dB antes de que la señal se pierda por completo a los 13m de distancia.

La señal evaluada a 0.8m, es la que más rápido decae en su parámetro de RSNR conforme la distancia aumenta, en este caso se observa en la Figura 135 que alrededor de los 4m (4.06m real), ya se alcanza los -18dB y se mantiene así hasta alcanzar su distancia máxima de 4.5m (4.55m real) antes de que la señal se pierda completamente.

Figura 135.

Grafica de RSNR – SF12 – Laguna de San Pablo.



Nota: En la figura se puede visualizar los resultados de RSNR evaluados desde 1m a 13m de distancia horizontal en una configuración SF12 para diferentes profundidades.

En la Figura 136 se visualiza la gráfica para la pérdida de paquetes de cada una de las señales evaluadas en las 3 profundidades (0.25m, 0.5m y 0.8m). En el caso de los 0.8m de profundidad, la pérdida de paquetes inicia automáticamente a 1m (1.23 real) de distancia de separación, donde se observa una pérdida de 4.1%, y al llegar a los 3m (3.08 real) la pérdida de paquetes aumenta a 25.49%, por encima de esta distancia la pérdida es completamente alta, llegando a casi 70% a los 4.5m (4.55 real).

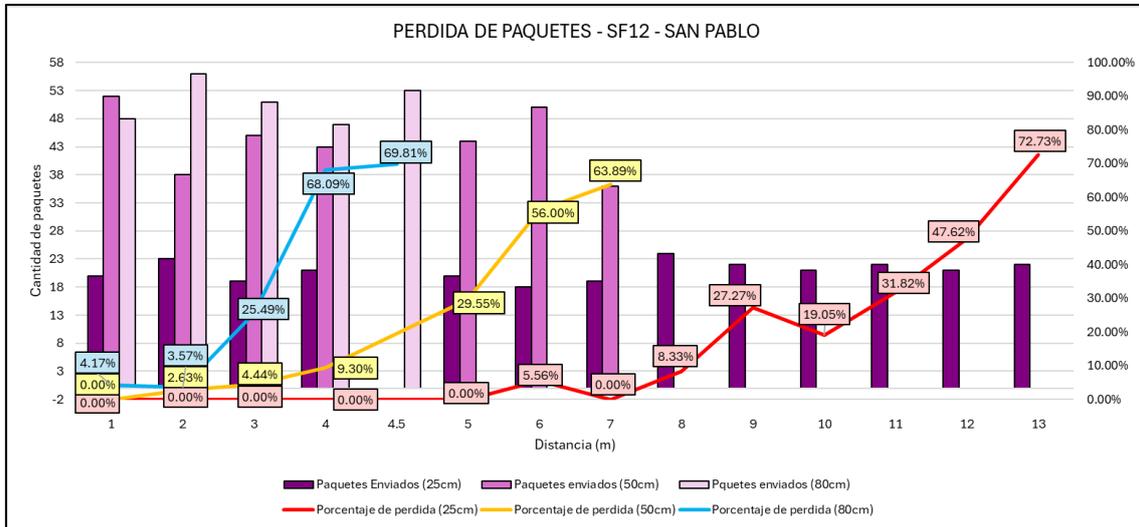
En el caso de la pérdida de paquetes evaluada a 0.5m, esta inicia desde los 2m (2.03 real) con un porcentaje de 2.63% y se mantiene en valores bajos hasta los 5m de distancia, donde su valor de pérdida aumenta a casi el 30%, subiendo al 56% a los 6m y llegando a un valor máximo de pérdida de 63.89% a los 7m, antes de que la señal se pierda por completo.

Por último la señal evaluada a 0.25m tiene una pérdida considerable a los 9m de distancia, llegando a un valor cercano a 27%. Se observa una leve mejora a los 10m con

un 19% de pérdida pero esta aumenta en gran medida a los 11m llegando al 31.8% y disparándose hasta el 72.73% a una distancia de 13m donde la señal se pierde.

Figura 136.

Grafica de perdida de paquetes – SF12 – Laguna de San Pablo.

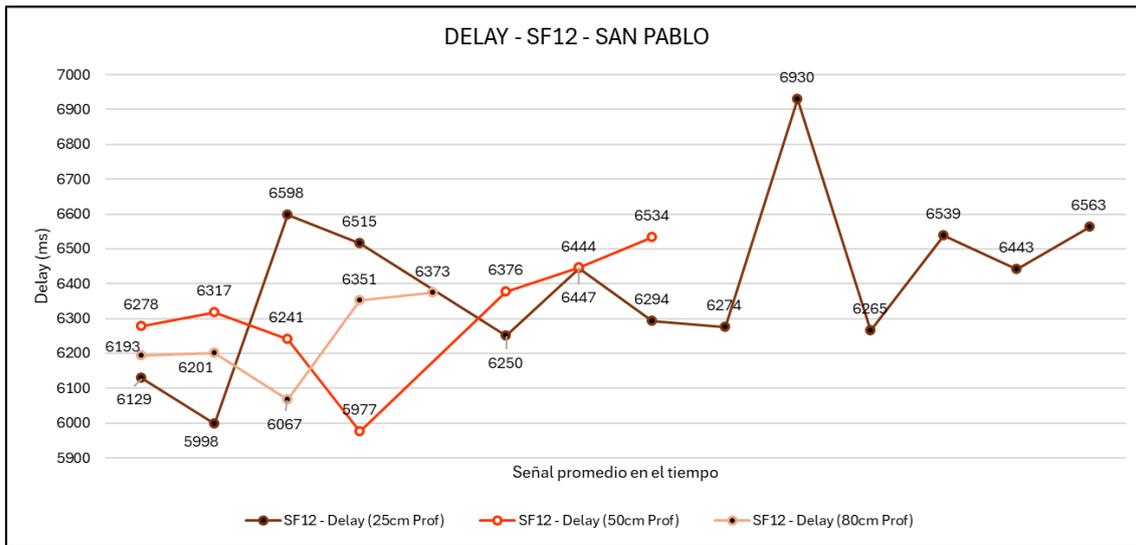


Nota: En la figura se puede visualizar el flujo de paquetes desde 1m hasta 13m de distancia horizontal, evidenciando perdidas de paquetes en una configuración SF12 a diferentes profundidades.

Por último, el dato de delay que se muestra en la Figura 137 para cada una de las señales evaluadas en las 3 profundidades, muestra que el delay de las 3 señales se encuentra por encima de los 6000ms. En la señal evaluada a 0.8m se observa una leve tendencia al alza en cada una de las señales a medida que la distancia aumenta, pero esta no es significativa, por lo que el delay se encuentra en el rango de los 5900ms a los 6900ms. Los valores promedio de delay para cada una de las señales se pueden visualizar en la Tabla 26.

Figura 137.

Grafica de Delay - SF12 - Laguna de San Pablo.



Nota: En la figura se puede visualizar los valores de retardo (delay) que se han evidenciado con una configuración de SF12 a diferentes profundidades.

Como resumen de las señales tomadas en la Laguna de San Pablo, se presenta la Tabla 26, donde se establecen los valores de SF12 a cada profundidad dando un promedio de los datos recolectados.

Tabla 26.

Datos obtenidos de pruebas en la Laguna de San Pablo.

Dato	SF12		
	Profundidad		
	0.25m	0.5m	0.8m
Distancia máxima de transferencia de datos referencial.	13m	7m	4.5m
Distancia máxima de transferencia de datos real.	13m	7m	4.55m
RSSI mínimo alcanzado.	-116 dBm	-116 dBm	-116 dBm
RSNR mínimo alcanzado.	-18 dB	-17 dB	-18 dB
Delay promedio	6403ms	6310ms	6237ms

Nota: En la tabla se especifica el promedio de datos obtenidos según las pruebas realizadas en cada una de las configuraciones de SF.

4.8 Resultados Generales.

Para finalizar, se presentan los resultados generales obtenidos tanto de las pruebas realizadas en un ambiente controlado como es una piscina, en comparación con las realizadas en la Laguna de Yahuarcocha y en la Laguna de San Pablo, centrándose en la configuración de SF12 establecida como la más adecuada para la transmisión de datos en el medio acuático.

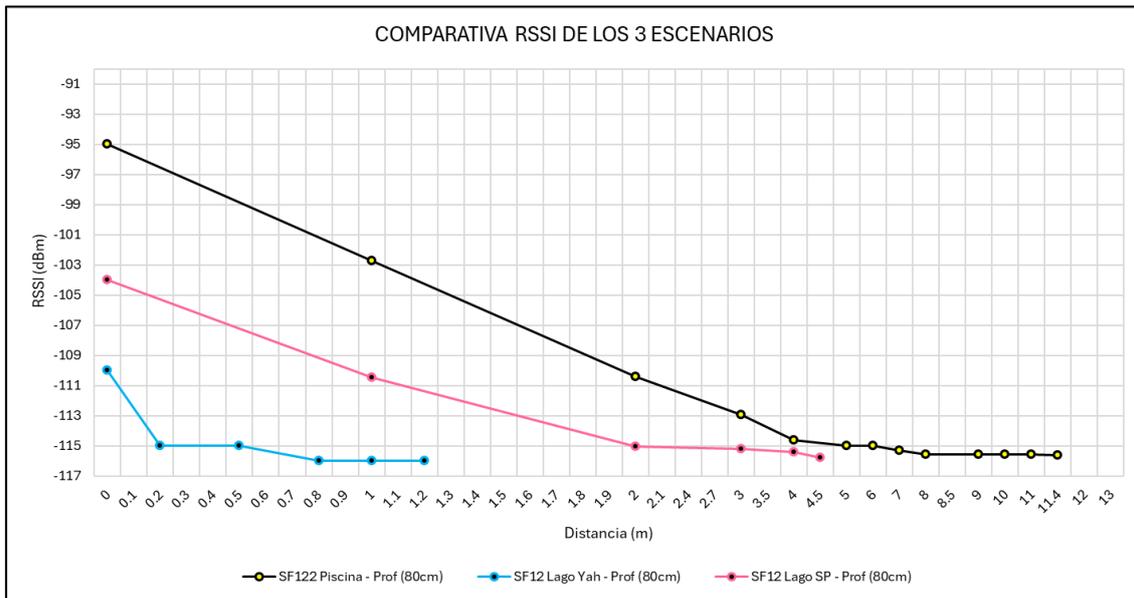
En la Figura 138 se presenta una gráfica en la que se compara cada una de las señales evaluadas con un SF12, en este caso la señal que se ha evaluado en Piscina colocando el Nodo Sensor a 0.8m de profundidad, es la señal que más se propaga, siendo esta viable a una distancia de 11.4m antes de que esta se pierda por completo.

La misma configuración de SF12 a 0.8m se ha evaluado en la Laguna de Yahuarcocha, para este caso la señal ha sido viable para propagarse hasta los 1.2m, reduciendo así el rango de separación de los nodos en casi 10.2m de distancia. En el caso de la señal evaluada a 0.8m de profundidad den la Laguna de San Pablo, esta se encuentra casi en un rango intermedio entre las anteriores, logrando una distancia viable de 4.5m.

Cabe destacar que en todas las configuraciones evaluadas, la señal alcanza un RSSI de -116dBm antes de que se pierda por completo, teniendo cambios solo en la distancia a la que la señal alcanza dicho valor, siendo la señal configurada en SF12 (0.8m) la que más se ha visto perjudicada por el ambiente subacuático en un escenario real como lo es la Laguna de Yahuarcocha y la Laguna de San Pablo.

Figura 138.

Grafica comparativa de RSSI para SF12 – 3 Escenarios.



Nota: En la figura se puede visualizar la comparación de los resultados de RSSI evaluados desde 0.1m a 11.4m de distancia en una configuración SF12 evaluados en los 3 escenarios.

La Figura 139 presenta los resultados del RSNR mediante el uso de la configuración SF12 que se estableció tanto en el ambiente controlado de piscina, así como en el entorno real de la Laguna de Yahuarcocha y la Laguna de San Pablo. Se observa como la señal evaluada a 0.8m de profundidad en la Laguna de Yahuarcocha es la que más se ve afectada por el medio de transmisión, teniendo una decaída en su factor RSNR a valores que rondan los -20dB a una distancia de 1.2m de separación entre los nodos, siendo así la que menos distancia puede alcanzar.

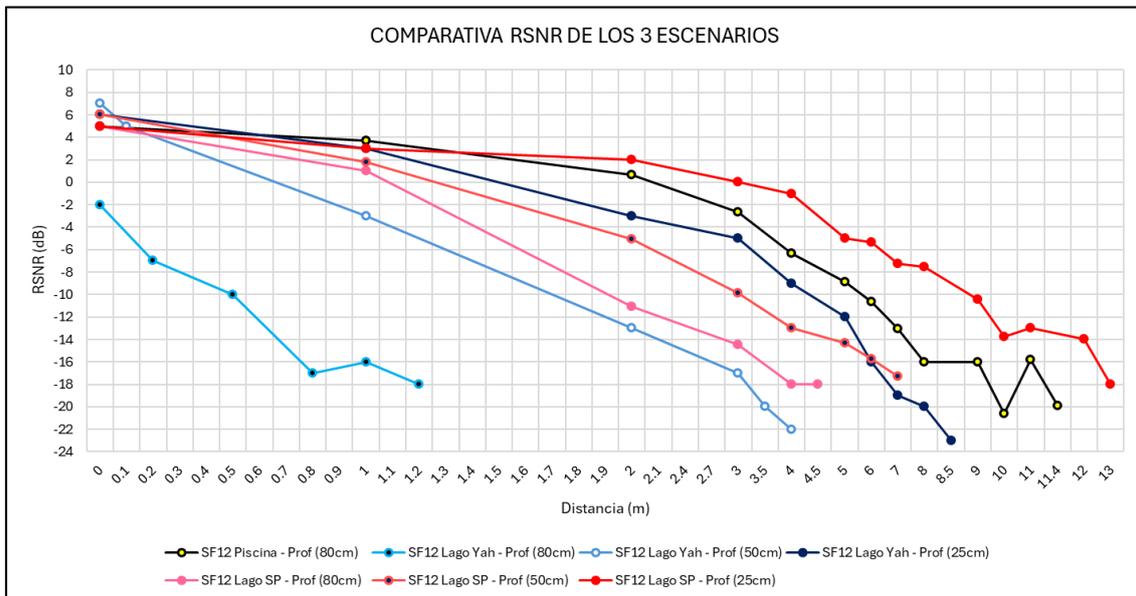
Sin embargo para el caso de la misma señal evaluada en piscina, con una profundidad del Nodo Sensor similar, es la que tiene un factor de RSNR más estable, el cual permite llegar a valores de -20dB a distancias más prolongadas como los es 11.4m. También se observa que la señal SF12 a 0.8m de profundidad evaluada en la Laguna de

San Pablo tiende a llegar a los -18dB a una distancia de 4.5 de distancia, siendo un valor intermedio entre la señal evaluada en piscina respecto a la de Yahuarcocha.

Las señales que se han evaluado en otras profundidades permiten visualizar como el valor de RSNR afecta a este conforme dicha profundidad esta más cercana a la superficie del agua, dando como resultado que una de las que más se acerca al entrono de pruebas en piscina es la evaluada a 0.25m de profundidad en la Laguna de San Pablo y en la Laguna de Yahuarcocha (ver Figura 139).

Figura 139.

Grafica comparativa de RSNR para SF12 – 3 Escenarios.



Nota: En la figura se puede visualizar la comparación de los resultados de RSNR evaluados desde 0.1m a 13m de distancia en una configuración SF12 evaluados en los 3 escenarios.

Por último, en la Tabla 27 se observa un resumen de los datos obtenidos en cada uno de los SF12 evaluados en los 3 escenarios, para tener una comparación de los promedios generales que arrojaron dichas pruebas en cada uno de los parámetros. Aquí es posible observar las distancias a las cuales la tecnología LoRa es viable en dichos escenarios.

Tabla 27.*Comparación de datos SF12 - 0.8m obtenidos en los 3 escenarios.*

DATO	SF/Profundidad		
	Piscina SF12 (0.8m)	Laguna San Pablo SF12 (0.8m)	Laguna Yahuarcocha SF12 (0.8m)
Distancia máxima de transferencia de datos referencial.	11.4m	4.5m	1.2m
Distancia máxima de transferencia de datos real.	11.42m	4.55m	1.39m
RSSI mínimo alcanzado.	-116 dBm	-116 dBm	-116 dBm
RSNR mínimo alcanzado.	-20 dB	-18 dB	-18 dB
Delay promedio	5942ms	6237ms	5650ms

Nota: En la tabla se especifica una comparación del promedio de datos obtenidos según las pruebas realizadas en los 3 escenarios con SF12.

Una vez culminadas las pruebas en cada uno de los escenarios, es posible realizar la comparativa con el entorno simulado en MATLAB, el cual establecía que la máxima distancia alcanzada por la señal sería de 12.5m de distancia, teniendo en cuenta que se trabajó en un entorno ideal, evaluando el medio mediante la conductividad. Dichas pruebas simuladas corresponden a las evaluadas en los ambientes reales, ya que las distancias máximas alcanzadas están por debajo de los 13m.

Por otro lado, uno de los entornos de prueba que arrojaron valores intermedios de distancias de propagación, es la Laguna de San Pablo, en la cual mediante el SF12 se alcanzan distancias máximas de 4.5m de distancia a 0.8m de profundidad, 7m de distancia a 0.5m de profundidad y 13m de distancia a 0.25m de profundidad (ver Tabla 28). Con estos valores es posible aplicar una regresión exponencial, la cual permite tener una idea de cuál sería la distancia alcanzada si el Nodo Sensor se sumerge a más profundidad de la evaluada.

Tabla 28.

Datos de distancia según la profundidad - Laguna de San Pablo.

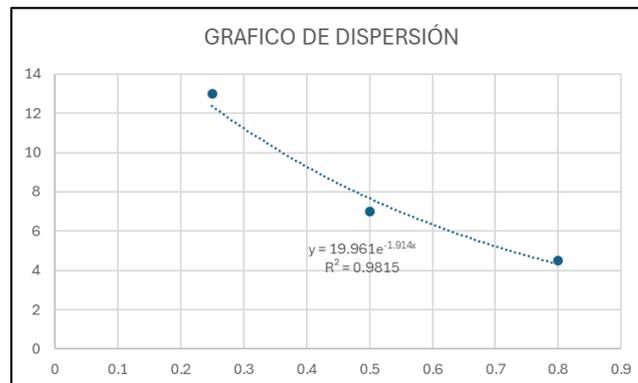
Profundidad (m)	Distancia alcanzada (m)
0.25 m	13 m
0.5 m	7 m
0.8 m	4.5 m

Nota: En la tabla se observan los valores de distancia correspondientes a cada una de las profundidades evaluadas en la Laguna de San Pablo con un SF12.

Con la ayuda de Excel es posible realizar un gráfico de dispersión (ver Figura 139) que permite obtener la ecuación, con la cual se puede calcular la tendencia que siguen los datos, lo que permite generar un estimado de cuál sería la distancia de propagación de la señal a distintas profundidades.

Figura 140.

Grafica de dispersión de la Tabla 28.



Nota: En la figura se observa el gráfico de dispersión generado en Excel a partir de los datos de la Tabla 28.

La ecuación que se obtiene es del tipo $y = a * b^{bx}$, específicamente $y = 19.961e^{-1.914x}$, donde x = al valor de profundidad que se quiere evaluar para obtener la distancia de separación correspondiente a la cual la señal se puede propagar. De aquí es posible obtener la Tabla 29, en la cual se enlistan las distancias que se esperarían obtener.

Tabla 29.

Datos de distancia según la profundidad – regresión exponencial.

Profundidad (m)	Distancia alcanzada ()
0.9 m	3.57 m
1 m	2.94 m
1.2 m	2.01 m
1.4 m	1.37 m
1.6 m	0.93 m
1.8 m	0.64 m
2 m	4.5 m

Nota: En la tabla se observan los valores de distancia correspondientes a cada una de las profundidades evaluadas en la Laguna de San Pablo con un SF12.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos de la regresión exponencial aplicada en la Tabla 29, es factible afirmar que a partir de los 1.4m de profundidad, La Boya De Comunicaciones no podría moverse de forma horizontal y debería estar estática justo encima del punto en el que el Nodo Sensor se sumerge, por lo que la comunicación dejaría de ser factible desde dicha distancia.

4.9 Trabajos futuros.

Una vez culminado el trabajo de grado, es factible destacar que el sistema puede mejorar en varios aspectos, el principal es generar pruebas mediante redes de Nodos LoRa, puesto que si se tienen nodos conectados por los cuales los paquetes de datos puedan realizar saltos, cabe la posibilidad de que se puedan cubrir distancias más largas, teniendo en cuenta que este trabajo no evaluó la eficiencia del sistema con 2 nodos sumergidos a la misma profundidad. De igual forma la implementación de pruebas en entornos marinos, lo que permitiría ver cómo se desenvuelve la tecnología cuando el índice de salinidad del agua es elevado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Luego de realizar una investigación referente las tecnologías empleadas para la comunicación subacuática, se concluye que una de las más importantes utilizadas en este medio es la comunicación mediante ondas acústicas (sonares), sin embargo el estudio de la transferencia de datos mediante tecnologías electromagnéticas incitó al desarrollo de este trabajo de grado, dando como resultado la implementación de la tecnología LoRa.

El resultado de este trabajo de grado se traduce en la implementación de un prototipo de monitoreo acuático hermético, que gracias a la implementación de la tecnología LoRa, permitió evaluar la viabilidad de dicha tecnología en este ambiente. Se presento un Nodo Sensor que es posible sumergir en el agua y que permite proteger los componentes electrónicos que componen al dispositivo. Dicho dispositivo permite la toma de datos subacuáticos mediante el uso de sensores y al mismo tiempo se estableció una plataforma de monitoreo de dichas variables en tiempo real gracias a la implementación de una Boya de Comunicaciones que actuó como enlace de datos entre el Nodo Sensor y la Base de Datos de Firebase.

En conclusión, luego de las pruebas generadas mediante el sistema, se puede observar que el factor SF (Spreading Factor) que LoRa implementa en su modulación, afecta significativamente en la propagación de la señal transmitida, dando como resultado que el mayor factor SF12, es el que más alcance permite en el medio acuático, tanto en un ambiente controlado como en piscina como en un ambiente real como una laguna.

En el caso del ambiente real, se concluye que la profundidad a la cual la antena del nodo se encuentra sumergida en el agua, afecta el alcance de la señal de datos, ya que mientras más profundo se encuentre la antena, la señal reduce su rango de alcance

significativamente. En el caso de las pruebas realizadas, el alcance más corto observado fue en una profundidad de 0.8m en el entorno de la Laguna de Yahuarcocha, alcanzando 1.2m de distancia entre nodos.

Uno de los factores que influye en la propagación de la señal LoRa en el entorno subacuático es el nivel de partículas suspendidas en el agua o la turbidez de la misma, ya que al comparar los 2 entornos evaluados con las mismas configuraciones, se obtuvo que la señal logra menos alcance en aguas altamente turbias como la de la Laguna de Yahuarcocha, mientras que con aguas totalmente claras como las tratadas en una piscina la señal logra ganar distancia.

En el caso de la simulación planteada, es factible concluir que el factor de conductividad del agua, esta estrictamente relacionado a la distancia de propagación de la señal, puesto que si el agua contiene mayores índices de conductividad la señal reduce su alcance.

Una vez culminado este trabajo de grado, se concluye que la tecnología LoRa, es factible para el uso de comunicaciones subacuáticas en entornos controlados por debajo de los 11.4m de separación entre los nodos, mientras que para un entorno más hostil como el de una Laguna, la factibilidad dependerá de factores como la turbidez del agua y la profundidad de la antena de transmisión del nodo sumergido. Es decir que la viabilidad de la tecnología solo es posible a distancias de transmisión realmente cortas.

Recomendaciones

Al finalizar este trabajo de grado, una de las recomendaciones principales para un posible despliegue de sensores en un entorno acuático con el uso de la tecnología LoRa es mediante una red MESH, ya que esta permitiría ubicar los nodos a distancias relativamente cortas que permitan el envío de datos mediante saltos entre nodos a distancias mayores, pudiendo comunicarse con un Gateway ubicado al otro extremo de la red, esto teniendo en cuenta que al ubicar 2 nodos sumergidos a la misma profundidad, la distancia de propagación de la señal podría disminuir significativamente.

También es de tener en cuenta que, los sensores no necesariamente deben estar cercanos a la superficie del agua, puesto que solo se necesita que la antena de transmisión tenga la profundidad correcta, por lo que es factible recomendar el diseño de un Nodo Sensor con una antena flotante cercana a la superficie, que permita sumergir el dispositivo de monitoreo a varios metros, mientras que la antena de transmisión pueda ganar distancia de propagación al estar más cercana a la superficie, teniendo en cuenta los posibles daños causados por vehículos acuáticos o actividades de pesca que pudieran interferir o dañar la antena.

Por último, es recomendable generar pruebas con esta tecnología en medios acuáticos con altos índices de salinidad, puesto que este trabajo de grado está enfocado a cuerpos de agua dulce. Esto con el objetivo de generar los resultados que permitan ver la viabilidad de la tecnología en ambientes marinos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aaron, L. (2024). *GitHub - HelTecAutomation/ESP32_LoRaWAN: Transplanted from Semtech LoRaWAN. Heltec Automation.*
https://github.com/HelTecAutomation/ESP32_LoRaWAN
- Aayala. (2021a, October 7). *EL PROYECTO DE RECUPERACIÓN DE YAHUARCOCHA AVANZA CON LA REMEDIACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE JARDINES FLOTANTES - Ibarra, Ciudad blanca a la que siempre se vuelve.* Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal San Miguel de Ibarra.
<https://www.ibarra.gob.ec/site/2021/10/el-proyecto-de-recuperacion-de-yahuarcocha-avanza-con-la-remediacion-ambiental-mediante-jardines-flotantes/>
- Aayala. (2021b, October 7). *EL PROYECTO DE RECUPERACIÓN DE YAHUARCOCHA AVANZA CON LA REMEDIACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE JARDINES FLOTANTES - Ibarra, Ciudad blanca a la que siempre se vuelve.* Gobierno Autónomo Descentralizado de Ibarra.
<https://www.ibarra.gob.ec/site/2021/10/el-proyecto-de-recuperacion-de-yahuarcocha-avanza-con-la-remediacion-ambiental-mediante-jardines-flotantes/>
- AECOC. (2023). *¿Sensores para el medio ambiente?* AECOC INNOVATION HUB.
<https://www.aecoc.es/innovation-hub-noticias/sensores-para-el-medio-ambiente/>
- AIPD. (2005). *Principles of Radio Wave Propagation (SC:25C): Vol. B* (United States Army Signal Center and Fort Gordon, Ed.; B). Army Correspondence Course Program.

- Akyildiz, I. F., Pompili, D., & Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. *ScienceDirect*, 3(3), 257–279. <https://doi.org/10.1016/J.ADHOC.2005.01.004>
- Alvarez, H., & Loor, A. (2023). Desarrollo de un banco de pruebas utilizando el Chip ESP-32 y el asistente virtual Alexa para el laboratorio de domótica. *Universidad Politécnica Salesiana Ecuador*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24026>
- Alvarez, R. (2020). *¿Las ondas de radio se transmiten debajo del agua?* - Quora. Quora. <https://es.quora.com/Las-ondas-de-radio-se-transmiten-debajo-del-agua>
- Amazon. (2022). *Seamuing ESP32 LoRa Scheda di Sviluppo SX1262 863 928 MHZ Wifi Modulo IoT Scheda Dual Core 240 MHz Basso consumo energetico con 0.96" OLED Display e Antenna per Arduino: Amazon.it: Informatica*. <https://www.amazon.it/Seamuing-Sviluppo-Consumption-pollice-Display/dp/B099ZMYQ4L>
- Arcotel. (2021). PLAN NACIONAL DE FRECUENCIAS. *Dirección Técnica de Regulación Del Espectro Radioeléctrico*. https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2021/10/PNF-V.6.0_14-07-21_v.1.pdf
- Arduino. (n.d.). *What is Arduino?* | *Arduino*. Arduino. Retrieved March 2, 2025, from <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Arduino. (2018, August 22). *WiFi* | *Arduino Documentation*. Arduino Docs. <https://docs.arduino.cc/libraries/wifi/>
- Arduino. (2024, September 11). *Documentación de Arduino* | *WiFiUDP*. Arduino Docs. <https://docs.arduino.cc/language-reference/en/functions/wifi/udp/>

- Arias, R. A. (2022). Caracterización de sistemas de comunicación RF y ópticos en aplicaciones submarinas. *Universidad Politécnica de Catalunya BarcelonaTech*.
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/372768>
- Asamblea Nacional. (2014). LEY ORGÁNICA DE RECURSOS HÍDRICOS, USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA. *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento Del Agua, Of. No. SAN-2014-1178*. www.fielweb.com
- Asamblea Nacional. (2017). CODIGO ORGANICO DEL AMBIENTE. *Codigo Orgánico Del Ambiente, Ley 0, Registro Oficial Suplemento 983*. www.lexis.com.ec
- Asamblea Nacional Constituyente. (2008). CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR 2008. *Ciudad Alfaró, Montecristi, Provincia de Manabí. Decreto Legislativo 0 Registro Oficial 449*. www.lexis.com.ec
- Balanis A, C. (2016). *ANTENNA THEORY* (Inc. , H. N. J. John Wiley & Sons, Ed.; 4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Balanis, C. A. (2012). *Advanced Engineering Electromagnetics* (I. John Wiley & Sons, Ed.; 2nd ed.). Wiley. https://biblioteca.yachaytech.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=506&shelfbrowse_itemnumber=1271
- Baltuille, P. (2023, June 15). *LoRaWAN y su aportación a las tecnologías IIoT | INCIBE-CERT | INCIBE*. INCIBE. <https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/lorawan-y-su-aportacion-las-tecnologias-iiot>
- Beltrán, A. (2023). *Exploración del canal de radio inalámbrico a través de la tecnología LoRa* [Universidad de Sevilla].
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/94733/fichero/TFG-4733+Beltr%C3%A1n+Florido.pdf>

- Buñay, A. S. (2023, June 15). *Estado del Arte de las Comunicaciones Acústicas Submarinas | Chone, Ciencia y Tecnología*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. . <https://www.cct-uileam.info/index.php/chone-ciencia-y-tecnologia/article/view/17/78#toc>
- Calero, H. M. (2023). Red sensores multiservicio LPWAN LoRa, LoRaWAN, TTN y MQTT. *Universitat Oberta de Catalunya*. <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/147334/6/caleroherruzo20TFM0123memoria.pdf>
- Carrasquero, S. J., Marín, J. C., Muñoz, C., Vargas, R., Vargas, C., & Tuviñez, P. (2016). Parámetros químicos medidos en las aguas de piscinas de los dos... | Download Scientific Diagram. *ResearchGate*, 56. https://www.researchgate.net/figure/Parametros-quimicos-medidos-en-las-aguas-de-piscinas-de-los-dos-complejos-recreacionales_fig1_325654330
- Chletsou, A., Locke, J. F., & Papapolymerou, J. (2022). Effects of plastic vehicular covers on radiation characteristics of lightweight, dual-band antenna for vehicular communications. *The Journal of Engineering*, 2022(10), 1017–1031. <https://doi.org/10.1049/TJE2.12192>
- Correa Rubio, L. I. (2021). *Estudio de los parámetros de LoRaWAN en un entorno urbano* [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/174439>
- Delgado, M., Chango, S., & Benavidez. Mateo. (2024). Uso de la banda de 433MHz para comunicaciones subacuáticas en ambientes controlados. *Universidad de Las Fuerzas Armadas (ESPE)*, 14(2), 1–6. <https://doi.org/10.24133/MASKAY.V14I2.3176>

- DFRobot. (2024). Turbidity sensor. *DF ROBOT Drive The Future*.
https://wiki.dfrobot.com/Turbidity_sensor_SKU__SEN0189
- DigitalConcepts. (2025). *Arduino ~ LoRa*. Digital Concepts.
<https://digitalconcepts.net.au/arduino/index.php?op=LoRa>
- Ecuavisa EC. (2022, August 21). *Alerta: Laguna de Yaguarcocha presenta un grave deterioro ambiental*. Ecuavisa EC.
<https://www.ecuavisa.com/noticias/ecuador/alerta-laguna-de-yaguarcocha-presenta-un-grave-deterioro-ambiental-IB2672785>
- El Comercio. (2020, December 11). *La laguna de Yahuarcocha presenta un deterioro de la calidad del agua; un plan de conservación de lagos se aplicará - El Comercio*. El Comercio. <https://www.elcomercio.com/tendencias/ambiente/laguna-yahuarcocha-deterioro-calidad-agua.html>
- Escalante, F. J. (2019). Redes inalámbricas de sensores: aplicaciones, protocolos de enrutamiento y seguridad. *Universidad Autónoma Del Estado de Quintana Roo*, 57–79. <https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>
- Farahani, S. (2008). Redes inalámbricas y trancceptores ZigBee. *ScienceDirect*, 137–170. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8393-7.00004-2>
- Fawwaz T, U., & Ravaioli, U. (2015). *Fundamentals Of Applied Electromagnetics* (Library of Congress Cataloging-in-Publication Data on File, Ed.; 7th ed.). Pearson Education, Inc.
[http://ael.chungbuk.ac.kr/lectures/graduate/%EA%B3%A0%EA%B8%89%EC%A0%84%EC%9E%90%EA%B8%B0%ED%95%992/textbooks/fundamentals%20of%20applied%20electromagnetics%207e%20\(ulaby\).pdf](http://ael.chungbuk.ac.kr/lectures/graduate/%EA%B3%A0%EA%B8%89%EC%A0%84%EC%9E%90%EA%B8%B0%ED%95%992/textbooks/fundamentals%20of%20applied%20electromagnetics%207e%20(ulaby).pdf)

- Fialho, V., & Fortes, F. (2020). Battery Lifetime Estimation for LoRaWAN Communications. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(12), 306–310. <https://doi.org/10.35940/IJITEE.K7824.0991120>
- Firebase. (2024). *Firestore Realtime Database*. Firebase. <https://firebase.google.com/docs/database?hl=es-419>
- FM, S. (2024, August 4). *Para qué sirve la resina de poliéster | Productos FM*. <https://productosfm.com/para-que-sirve-la-resina-de-poliester/>
- Fontoura, A. (2023, April 27). *¿Qué es la metodología? ¿Cuál es su importancia? – FM2S*. FM2S. <https://www.fm2s.com.es/que-es-la-metodologia/>
- GAD Imbabura. (2022, April 11). *Prefectura de Imbabura - IMBABURA GEOPARQUE MUNDIAL DE LA UNESCO CELEBRA EL TERCER ANIVERSARIO DE ESTA ACREDITACIÓN*. GAD Provincial de Imbabura. <https://www.imbabura.gob.ec/index.php/noticias/blog-noticias/27-geoparque/724-imbabura-geoparque-mundial-de-la-unesco-celebra-el-tercer-aniversario-de-esta-acreditacion>
- Gelen, S. D. (n.d.). *ANÁLISIS NUMÉRICO Y ASINTÓTICO DE LA PROPAGACIÓN DE PAQUETES DE ONDAS EN AGUAS SOMERAS*. E-REDING. Biblioteca de La Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Retrieved August 4, 2024, from <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70117/>
- Geoparque Imbabura. (2018). *Laguna de Yahuarcocha*. Imbabura Geoparque Mundial. <https://geoparque.imbabura.gob.ec/index.php/geoproductos/laguna-de-yahuarcocha/>

- González, V., Quiñonez, M., Peralta, M., & Quiñonez, S. (2015, October 29). *Integración de Redes de Sensores para visualización de datos meteorológicos en tiempo real y su uso en Infraestructura de Datos Espaciales*. *Revista GEOESPACIAL* (2015) 12:45 - 56.
https://www.researchgate.net/publication/298212354_Integracion_de_Redde_sensores_para_visualizacion_de_datos_meteorologicos_en_tiempo_real_y_su_uso_en_Infraestructura_de_Datos_Espaciales
- Haxhibeqiri, J., De Poorter, E., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2018). A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. *Sensors* 2018, Vol. 18, 18(11).
<https://doi.org/10.3390/S18113995>
- Heltec. (2022). HTIT-WB32LA_V3 LoRa Node Development Kit. *Heltec Automation*, 1.1. <https://heltec.org>
- Hernandez, J. (2019, September). *Diseño y cálculo de flotabilidad de boya marina*. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial CIDESI - Gobierno de Mexico.
<https://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1024/396>
- IEEE 29148. (2018). ISO/IEC/IEEE 29148:2018(E): ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering : Life cycle processes : Requirements engineering. *IEEE*, 104.
- Ikiss, J. (2020). Sistema de adquisición de datos con ESP32. *Universidad Politécnicade Catalunya Barcelonatech*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/344400>
- Imbabura Geoparque, M. (2018). *Imbabura Geoparque Mundial UNESCO*. Imbabura Geoparque Mundial.
<https://geoparque.imbabura.gob.ec/index.php/geoparque/informacion-basica>

Imbabura GM. (2008). *Laguna de Yahuarcocha*. Imbabura GM.
<https://geoparque.imbabura.gob.ec/index.php/geoproductos/laguna-de-yahuarcocha/>

Instituto de Tecnologías Educativas. (n.d.). *6.1. Absorción de luz en el medio acuático | Temas de Ecología*. Ministerio de Educación - Gobierno de España. Retrieved August 4, 2024, from https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/61_absorción_de_luz_en_el_medio_acuatico.html

Jiménez Ballart, D. A. (2018). *Estudio de la cobertura de la modulación LoRa en la banda de 915[Mhz] en un ambiente urbano* [Universidad de Chile].
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168163>

La Hora. (2022a, February 18). *Tecnología de punta para descontaminar Yahuarcocha – Diario La Hora*. La Hora. <https://www.lahora.com.ec/imbabura-carchi/descontaminar-yahuarcocha-equipos-ultrasonido/>

La Hora. (2022b, December 5). *Yahuarcocha se descontamina a paso lento – Diario La Hora*. La Hora. <https://www.lahora.com.ec/imbabura-carchi/yahuarcocha-descontamina-paso-lento/>

La Hora. (2023a). *Analizan nuevas estrategias para descontaminar Yahuarcocha – Diario La Hora*. La Hora. <https://www.lahora.com.ec/imbabura-carchi/analizan-nuevas-estrategias-descontaminar-yahuarcocha-julio-2023/>

La Hora. (2023b, July 21). *Analizan nuevas estrategias para descontaminar Yahuarcocha – Diario La Hora*. Redacción Ibarra, La Hora. <https://www.lahora.com.ec/imbabura-carchi/analizan-nuevas-estrategias-descontaminar-yahuarcocha-julio-2023/>

- Lang-Álvarez, E. (2021). Diseño de un módulo de grabación para un sistema BRUVS personalizado a las necesidades del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología para un sistema BRUVS personalizado a las necesidades del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología. *Instituto Tecnológico de Costa Rica*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/13263>
- López, G. F. (2023). Implementación de Software de Código Abierto en la Internet de las Cosas. *Revista Boaciencia. Negocios e Tecnología* , 3(1), 64–84. <https://doi.org/10.59801/TYN.V3I1.105>
- López, T. A. I. (2017). Propagación de ondas acústicas en espacios subacuáticos. *Universidad de La Laguna - Santa Cruz de Tenerife - España*. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/5941>
- LoRa Alliance. (2015). A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ What is it? *LoRa Alliance - Wide Area Networks for IoT*.
- Mane, S. Y. (2021). LPWAN's - Overview, Market Scenario and Performance Analysis of Lora, Sigfox Using NB-Fi Range Calculator. *2021 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking, SMART GENCON 2021*. <https://doi.org/10.1109/SMARTGENCON51891.2021.9645902>
- Martins, J. (2024, January 19). *¿Qué es la metodología Kanban y cómo funciona? [2024]*
• *Asana*. ASANA. <https://asana.com/es/resources/what-is-kanban>
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (2021, June 16). *Se fortalecen las acciones para la preservación de la Laguna de Yahuarcocha – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. Ministerio Del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. Boletín 227. <https://www.ambiente.gob.ec/se-fortalecen-las-acciones-para-la-preservacion-de-la-laguna-de-yahuarcocha/>

- Mobizt. (2025, January 8). *Cliente Firebase ESP32 | Documentación de Arduino*.
Arduino Docs. <https://docs.arduino.cc/libraries/firebase-esp32-client/#Compatibility>
- Mulligan, T. (2018, March 12). *Océano digital: hacer que los datos submarinos sean más fácilmente accesibles*. MARINE TECHNOLOGY.
<https://es.marinetechnews.com/news/oc%C3%A9ano-digital-hacer-que-los-datos-submarinos-sean-237775>
- Naciones Unidas. (2015, September 25). *OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE - Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Organización de Naciones Unidas (ONU).
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Navarro, E. (2017). *Desarrollo de un simulador de radar de apertura sintética y propuesta de diseño de radio frecuencia*. [Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicaciones].
https://oa.upm.es/52922/1/TFG_EDUARDO_NAVARRO_SABARIEGOS.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Nelson, S. O. (1991). Dielectric Properties of Agricultural Products: Measurements and Applications. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 26(5), 845–869.
<https://doi.org/10.1109/14.99097>
- Nuamah, J., & Seong, Y. (2017). Human machine interface in the Internet of Things (IoT). *2017 12th System of Systems Engineering Conference, SoSE 2017*.
<https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2017.7994979>
- oddlama. (2025). *GitHub - espressif/arduino-esp32: Arduino core for the ESP32*.
Arduino Esp32. <https://github.com/espressif/arduino-esp32>

- Otnes, R., Asterjadhi, A., Casari, P., Goetz, M., Husøy, T., Nissen, I., Rimstad, K., van Walree, P., & Zorzi, M. (2012). *Underwater Acoustic Networking Techniques* (Springer, Ed.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25224-2>
- Pabón, J. (2015). Distribución y evaluación de la vegetación macrofítica en el lago de Yahuarcocha, Provincia de Imbabura. *Universidad Técnica Del Norte, Recursos Naturales Renovables*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6943>
- Pabón, J. P. (2015). *Distribución y evaluación de la vegetación macrofítica en el lago de Yahuarcocha, Provincia de Imbabura* [Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6943>
- Pérez Vargas, N. A., & Torres Pachar, B. D. (2020). Desarrollo de un prototipo para la geolocalización y monitorización de frecuencia cardiaca de mascotas en la ciudad de Quito. *Universidad Politécnica Salesiana Del Ecuador*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19072>
- Polygenis, T. (2019). Life Cycle Impact Assessment of Polylactic Acid (PLA) Produced from Sugarcane in Thailand. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(11), 2523–2539. <https://doi.org/10.1007/S10924-019-01525-9>
- Pronin, A. (2024). *SSD1306wire | Arduino Documentation*. Arduino Docs. <https://docs.arduino.cc/libraries/ssd1306wire/>
- Quimbiamba, N. P., & Sánchez, A. E. (2023). Análisis espacio temporal de la calidad de agua del Lago Yahuarcocha utilizando métodos convencionales y sensores remotos. *Universidad Técnica Del Norte*. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13660>

- REYAX. (2019). RYLR896 UART Interface 868/915MHz LoRa® Antenna Transceiver Module Datasheet. *RYLR896*. <https://reyax.com/products/RYLR896>
- REYAX. (2024). RYLR998 UART Interface 868/915 MHz LoRa® Antenna Transceiver Module. *RYLR998*. <https://reyax.com/products/RYLR998>
- Richard3366. (2024, December). *GitHub - HelTecAutomation/Heltec_ESP32: Arduino library for Heltec ESP32 (or ESP32+LoRa) based boards*. HelTec Automation. https://github.com/HelTecAutomation/Heltec_ESP32
- Ruiz, S., & Muñoz, M. (2022). Análisis de propagación de las comunicaciones ópticas subacuáticas. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*. <https://doi.org/10.47187/perspectivas.5.2.200>
- Salazar, J. (2016). REDES INALÁMBRICAS. *Techpedia - České Vysoké Učení Technické v Praze Fakulta Elektrotechnická*. <http://www.techpedia.eu>
- Saunders, S. R., & Aragón, A. (2007). *ANTENNAS AND PROPAGATION FOR WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS* (John Wiley & Sons Ltd., Ed.). John Wiley & Sons Ltd. www.wiley.com
- Sawers. (2022, March 11). *Modulo PH analogico PH-4502C : Soporte Sawers Bolivia*. Soporte Sawers Bolivia. <https://sawerssrl.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000164678-modulo-ph-analogico-ph-4502c>
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021, September 20). *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025 – Secretaría Nacional de Planificación*. Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025, Quito - Ecuador. <https://www.planificacion.gob.ec/plan-de-creacion-de-oportunidades-2021-2025/>

Semtech. (2021, December). *SX1261/2 Long Range, Low Power, Sub-GHz RF Transceiver*. Datasheet.

<https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000Je1G/a/2R000000Un7F/yT.fKdAr9ZAo3cJLc4F2cBdUsMftpT2vsOICP7NmvMo>

Sendra, C. S. (2011). “Comunicaciones inalámbricas subacuáticas a 2,4 GHz para la transmisión de datos con altas tasas de transferencia” TRABAJO FINAL DE GRADO. *Universidad Politecnica de Valencia*.
<https://riunet.upv.es/handle/10251/14605>

Serrano, M. (2015, February 17). *¿Qué es la protección IP65? ¿En qué se diferencia con IP67? - IkoCrane*. IkoCrane. <https://www.ikolcrane.com/aprender/que-es-la-proteccion-ip65>

Shanmuga, J. P., Du, W., & Zhao, Z. (2020). A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(1), 371–388. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2949598>

Silvio, G. (2022, September 12). *Por qué considerar a LoRa como la mejor opción para las soluciones de monitoreo ambiental*. MOKO LORA.
<https://www.mokolora.com/es/lora-environmental-monitoring-solutions/#:~:text=Las%20comunicaciones%20de%20largo%20alcance,como%20gases%20t%C3%B3xicos%20y%20part%C3%ADculas.>

Ulaby, F. T., & Ravaioli, U. (2023). *FUNDAMENTALS OF APPLIED ELECTROMAGNETICS Eighth Edition* (Pearson Education Limited 2023, Ed.). Pearson Education. www.pearsoned.com/permissions/.

UNIT Electronics. (2024). *PH-4502C Sensor de PH Liquido con electrodo E201-BNC*. UNIT Electronics. <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-ph-liquido/>

- Urick, R. J. (1983). Principles of underwater sound. *Peninsula Publishing*.
https://books.google.com/books/about/Principles_of_Underwater_Sound.html?hl=es&id=MBBgQgAACAAJ
- Vargas, J. (2022). Desarrollo de un sistema de comunicación inalámbrico basado en tecnología LoRa para el sensado remoto de variables eléctricas. *Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador)*.
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23691>
- Velasco, Á. J. (2022). Diseño de una aplicación académica para el estudio de redes de sensores inalámbricos subacuáticos en Matlab. *Universidad Técnica Del Norte*.
<https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13402>
- Weinberg Fabrice. (2022, April 22). *NTPClient | Arduino Documentation*. Arduino Docs.
<https://docs.arduino.cc/libraries/ntpcient/>
- Weis, O. (2024, August 20). *Comunicación serie en el desarrollo embebido*. Virtual Serial Port. https://www.virtual-serial-port.org/es/articles/serial-communication-in-embedded-development/?utm_source=chatgpt.com

ANEXOS

ANEXO 1. Ficha de Requerimientos

Proyecto de titulación: “Análisis de la implementación de la tecnología LoRa para comunicación subacuática que permita el monitoreo de variables ambientales en la laguna de Yahuarcocha”

Objetivo de análisis: Tener una referencia clara que permita una correcta comprensión de los requerimientos planteados para el desarrollo del sistema y permitir así que este pueda ser implementado cumpliendo los objetivos del trabajo de grado.

Fecha de realización: 15 de octubre del 2024.

Artículos consultados:

1. Comunicaciones Inalámbricas subacuáticas a 2.4 GHz para la transmisión de datos con altas tasas de transferencia.
2. Plan Nacional de Frecuencias (Arcotel).
3. Battery Lifetime Estimation for LoRaWAN Communications.
4. Distribución y evaluación de la vegetación macrofítica en el Lago de Yahuarcocha.
5. Diseño de un módulo de grabación para un sistema BRUVS personalizado a las necesidades del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología.
6. Estableciendo la comunicación serie en el desarrollo embebido.

7. Human Machine Interface in the Internet of Things (IoT).
8. Desarrollo de un prototipo para la geolocalización y monitorización de frecuencia cardiaca de mascotas en la ciudad de Quito.
9. Integración de redes de sensores para visualización de datos meteorológicos en tiempo real y su uso en infraestructura de datos espaciales.
10. Use of the 433MHz band for underwater communications in controlled environments.
11. Redes inalámbricas de sensores: Aplicaciones, protocolos de enrutamiento y seguridad.
12. Underwater acoustic sensor networks: research challenges.
13. Implementación de Software de Código Abierto en la Internet de las Cosas.
14. Desarrollo de un banco de pruebas utilizando el chip ESP-32 y el asistente virtual Alexa para el laboratorio de domótica.
15. Redes inalámbricas y transceptores ZigBee.
16. Sistema de adquisición de datos con ESP32.
17. Diseño y cálculo de flotabilidad de boya marina.
18. Modelo de canal acústico subacuático vertical en redes de sensores para monitoreo costero.
19. Análisis de propagación de las comunicaciones ópticas subacuáticas.
20. Red sensores multiservicio LPWAN.

Lista Stakeholders:

Abreviaturas	Descripción
StSR	- Requerimientos de Stakeholders.
SySR	- Requerimientos del Sistema.
SRSR	- Requerimientos de Hardware y Software.

REQUERIMIENTOS OPERACIONALES (StSR)			
N°	Requerimiento	Referencia	Prioridad
StSR1	El Nodo Sensor y la antena ubicada en la boya requieren estar sumergidos bajo el agua.	El trabajo de grado titulado “Comunicaciones Inalámbricas subacuáticas a 2.4 GHz para la transmisión de datos con altas tasas de transferencia” se centra en el uso de 2 antenas monopolo que pueden estar sumergidas en el agua. En su resultado se resalta que si la antena está en contacto con el agua directamente a pesar de emitir de forma normal es necesario un recipiente hermético que permita contacto con una porción de aire para que la antena pueda ser sumergida y empiece a emitir sobre la porción de aire y permita la propagación hacia el medio acuático (Sendra, 2011).	Alta
StSR2	Debe existir una conexión inalámbrica entre el Nodo Sensor y la boya para transferencia de datos respetando la normativa de bandas libres ISM (902 – 928 MHz) que rige en Ecuador.	El Plan Nacional de Frecuencias en su Capítulo 4, numeral 5.150 designa a las bandas 902-928 MHz en la Región 2 para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM), todos los equipos que operen en esta banda deben aceptar interferencias por dicha aplicación (Arcotel, 2021).	Alta
StSR3	Tanto el Nodo Sensor como la boya deben estar alimentados con baterías.	Los proyectos u aplicaciones que no pueden tener acceso a la red eléctrica para su funcionamiento necesitan acoplarse al uso de baterías. Fialho & Fortes (2020) concluyen en su trabajo que una red IoT basada en LoRaWAN necesita optimizar el número de mensajes manipulando el Spreading Factor y ancho de banda si se quiere reducir el consumo y recomiendan la inclusión de paneles solares con fines de prolongar la vida útil de las baterías.	Alta

StSR4	El sistema debe estar preparado para funcionar a bajas temperaturas.	A partir de las condiciones abióticas analizadas se establece que existe un clima mesotérmico semihúmedo, precipitación que va entre 500 a 700mm, la temperatura promedio es de 15°C (J. Pabón, 2015). El Geoparque Imbabura manifiesta por lo contrario que la Laguna de Yahuarcocha rodea los 11°C (Imbabura Geoparque, 2018). Partiendo de estos datos se considera el funcionamiento del equipo a bajas temperaturas.	Alta
StSR5	El sistema debe ser hermético y trabajar en condiciones de alta humedad.	Ya que se espera trabajar en condiciones subacuáticas, el sistema debe ser capaz de resistir altas presiones de este medio y mantenerse hermético para proteger la electrónica en su interior (Lang-Álvarez, 2021).	Alta
REQUERIMIENTOS DE USUARIO (StSR)			
StSR6	Los datos del sistema se deben visualizar vía computador ya sea por conexiones serial o inalámbrica.	Es necesario realizar un monitoreo por medio del puerto serial, para verificar el correcto funcionamiento del sistema. Weis (2024) afirma que los desarrolladores que trabajan con sistemas embebidos necesitan poder visualizar el comportamiento de sus sistemas, una interfaz serial bien podría ser la única forma de comunicación con el sistema embebido.	Media
StSR7	El sistema debe contar con una interfaz de usuario intuitiva.	Todo dato que un sensor recopile debería transformarse en información significativa y relevante, para lo cual esta debe presentarse en formatos que un operador humano pueda interpretar (Nuamah & Seong, 2017).	Baja
StSR8	La Boya de Comunicaciones debe enviar los datos a una plataforma de visualización.	Puesto que los equipos se encuentran en un entorno poco accesible como una laguna, es preferible que los datos sean enviados hacia una plataforma donde puedan ser manipulados. Firebase Realtime Database almacena datos como objetos JSON, estos se conceptualizan a modo de árbol y se alojan en la nube (Pérez Vargas & Torres Pachar, 2020).	Media
StSR9	El sistema debe ser manipulado con el objetivo de mantener una comunicación inalámbrica bajo el agua.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento StSR1, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Media

REQUERIMIENTOS DE INTERFAZ (SySR)			
N°	Requerimiento	Referencia	Prioridad
SySR1	La placa de la boya debe tener conexión serial para transferencia de datos hacia una computadora.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento StSR6, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Media
SySR2	El sistema debe contar con una interfaz para la visualización de datos recolectados en tiempo real.	González et al., (2015) concluye en su trabajo que los datos obtenidos en tiempo real convierten al sistema de redes de sensores inalámbricos y su visualización de datos en una herramienta fundamental para la toma de decisiones.	Media
SySR3	La transferencia de datos entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones debe ser inalámbrica y trabajar en las bandas de frecuencia libre ISM (902 – 928 MHz).	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento StSR2, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
REQUERIMIENTOS DE USO (SySR)			
SySR4	La conexión entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones debe ser estable.	La comunicación debe mantenerse estable en las distancias de prueba establecidas. Si se detecta inestabilidad en algún punto, esto indicaría que la comunicación entre el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones no es viable a esa distancia.	Alta
SySR5	Los datos se deben transmitir inalámbricamente en tiempo real desde el Nodo Sensor.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento SySR3, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
SySR6	El sistema debe recolectar los datos desde el Nodo Sensor y ser visualizados en conexión serial en la Boya de Comunicaciones.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento StSR6, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Media
REQUERIMIENTOS DE RENDIMIENTO (SySR)			
SySR7	La transmisión de los datos debe ser confiable desde el Nodo Sensor a la boya.	En conjunto con el requerimiento SySR4, la conexión y transferencia de datos debe ir desde el Nodo Sensor hacia la Boya de Comunicaciones sin pérdida. Existe una diferencia entre la potencia utilizada en el espacio libre	Alta

		con las que se usan en entornos subacuáticos, puesto que las pérdidas se expresan en mayor cantidad en el último, esto genera desventajas en la transmisión (Delgado et al., 2024)	
SySR8	El envío de datos desde el Nodo Sensor debe comenzar su envío cuando se haya establecido conexión entre este y la Boya de Comunicaciones.	Según Escalante, (2019) el objetivo principal de un Nodo Sensor es recopilar información de su entorno y transmitirlo a uno o más puntos de control centralizado.	Alta
SySR9	El funcionamiento de los módulos LoRa debe ser mediante el uso de baterías.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento StSR3, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
REQUERIMIENTOS DE MODO Y ESTADO (SySR)			
SySR10	El sistema debe tener 2 modos, uno de operación normal (comunicación inalámbrica entre Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones) y otro de desconexión (cuando el Nodo Sensor no este sumergido en el agua).	Eso se debe a que el Nodo Sensor debe ser diseñado para su funcionamiento en entornos subacuáticos, por lo que su funcionamiento fuera del agua no estaría acorde al objetivo de este trabajo.	Media
SySR11	El sistema debe alertar un estado de fallo de comunicaciones, un estado de batería baja y un estado de alerta por variables fuera de rango.	Esto está estructurado con el objetivo de mantener un control sobre el sistema, es decir que en caso de existir estos problemas se puedan solucionar al tener información de que existe uno de estos inconvenientes.	Media
REQUERIMIENTOS FISICOS (SySR)			
SySR12	El Nodo Sensor debe tener un diseño hermético y resistente al agua, que permita sumergir hasta 8 metros.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento StSR5, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
SySR13	El nodo debe tener salida para 2 sensores (PH y turbidez de agua) que estén en contacto permanente con el gua.	Como se expresa en el requisito SySR8, el objetivo de un Nodo Sensor es el de recopilar información y enviarla hacia uno o más puntos de control centralizado (Escalante, 2019). Es por esto por lo que se hace uso de sensores que puedan recopilar dicha información.	Alta

SySR14	El sistema debe operar a temperaturas por debajo de los $\pm 11^{\circ}\text{C}$ adecuándose a las condiciones de la laguna.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento StSR4, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
SySR15	La Boya de Comunicaciones debe estar flotando en la superficie del agua.	Puesto que es necesario enviar los datos recolectados desde el Nodo Sensor hacia una nube se tiene en cuenta que: Los Gateway son boyas de superficie que permiten la retransmisión de datos desde una red subacuática hacia una zona costera (Akyildiz et al., 2005).	Alta
SySR16	La antena del dispositivo LoRa que se encuentra en la Boya de Comunicaciones debe estar sumergida en la superficie del agua.	Como se expresa en el requerimiento StSR1 en el cual se resalta que la antena debe estar contenida en un recipiente hermético que permita contacto con una porción de aire para que la antena pueda ser sumergida y empiece a emitir sobre la porción de aire y la señal se propagación hacia el medio acuático (Sendra, 2011).	Alta

REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE (SRSH)			
N°	Requerimiento	Referencia	Prioridad
SRSH1	El lenguaje de programación debe ser open source.	G. F. López, (2023) afirma que El uso de tecnologías Open Source ha dado lugar a la reducción de costos de desarrollo de soluciones para el del IoT, y en consecuencia el abaratamiento de los costos para el usuario final.	Alta
SRSH2	El lenguaje de programación debe contar con las librerías necesarias para el funcionamiento de los sensores.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento SySR13, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
SRSH3	Se debe hacer uso del puerto serial para la lectura de datos, por lo que el IDE en el que se realiza la programación debe contar con lectura serial.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento SySR6, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Media
SRSH4	El módulo LoRa debe permitir la fácil integración con el lenguaje de programación y el IDE.	Gracias a la integración de ESP-32, es más factible que LoRa pueda permitir su programación en base a Arduino. El uso de ESP-32 permite su	Alta

		empleo en espacios reducidos y su fácil programación basado en el IDE de Arduino (H. Alvarez & Loor, 2023).	
REQUERIMIENTOS DE HARDWARE (SRSH)			
SRSH5	El dispositivo LoRa debe manejar una variedad de frecuencias de operación en las bandas libres ISM.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento StSR2, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
SRSH6	El hardware del dispositivo debe ser compatible con diferentes tecnologías aparte de LoRa (wifi).	Este requerimiento esta estrictamente relacionado a la Boya de Comunicaciones, puesto que esta debe realizar una conexión hacia Internet para el posterior envío de datos hacia la nube. Por ende es necesaria una tecnología que permita esta conexión.	Media
SRSH7	El dispositivo LoRa debe contar con entradas analógicas que permitan integrarse a la conexión de sensores.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento SySR13, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
SRSH8	Las antenas del dispositivo LoRa deben tener una alta sensibilidad.	La sensibilidad de un receptor es la potencia de señal recibida más baja que puede producir una tasa de error de menos del 1% (Farahani, 2008). Puesto que se está trabajando en un medio con altas perdidas como el agua, el receptor debe tener una alta sensibilidad.	Alta
SRSH9	El dispositivo LoRa debe tener un bajo consumo de energía.	Al tratarse de un módulo que se encuentra sumergido en el agua, el consumo de batería debe ser bajo para que su funcionamiento pueda prolongarse por periodos extensos de monitoreo.	Alta
SRSH10	El dispositivo debe soportar el procesamiento de varios datos a la vez.	Puesto que se está trabajando con 2 sensores, el módulo debe soportar la lectura de estos en simultaneo.	Alta
SRSH11	El sensor PH debe ser compatible con el dispositivo LoRa (Librerías).	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento SRSH2, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
SRSH12	El sensor de Turbidez de agua debe ser compatible con el dispositivo LoRa (Librerías).	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento SRSH2, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta

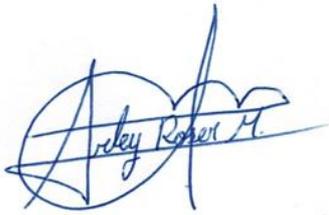
SRSH13	Los sensores deben estar conectados al dispositivo LoRa en simultaneo sin necesidad de otros módulos.	Según Ikiss, (2020) un microcontrolador con sensores tiene la función de leer las variables analógicas enviadas por estos, convertirlas a digitales y transmitir las a un equipo de supervisión.	Alta
REQUERIMIENTOS DE DISPONIBILIDAD (SRSH)			
SRSH14	Se requiere la disponibilidad de los componentes en el mercado.	Este requerimiento es esencial ya que, generalmente algunos módulos pueden tener un mejor rendimiento pero no se encuentran disponibles o no son de fácil acceso.	Alta
REQUERIMIENTOS DE ALIMENTACIÓN (SRSH)			
SRSH15	Se requiere una fuente de alimentación entre 3 A 5v.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento StSR3, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
REQUERIMIENTOS DE DISEÑO (SRSH)			
SRSH16	El Nodo Sensor debe tener una estructura hermética que permita la protección de todos los componentes en un ambiente subacuático.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento StSR5, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta
SRSH17	El material sobre el que debe estar construida la Boya de Comunicaciones debe tener flotabilidad.	Generalmente, una boya es hueca o está inflada con aire o gas neutro. Sin embargo, también es común encontrar boyas rellenas de materiales sólidos más ligeros que el agua, como la espuma de poliuretano, para evitar que se llenen de agua o se desinflen (Hernandez, 2019).	Alta
SRSH18	La Boya de Comunicaciones debe tener una parte sumergible que permita posicionar la antena de comunicaciones debajo del agua.	Este requerimiento tiene precedencia anclada al requerimiento SySR16, por lo que su referencia está estrechamente relacionada con dicho requerimiento que lo antecede.	Alta

Elaborado por: Diego Arbey Montezuma Rosero.

ANEXO 2. Repositorio GitHub.

En el enlace que se presenta a continuación, se encuentra el repositorio en GitHub, donde se puede acceder a los códigos de programación completos en C++ (Arduino IDE) que fueron utilizados para la programación de los módulos Heltec Wifi LoRa 32 V3 que fueron utilizados para el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones.

- **Repositorio:** https://github.com/ArbeyCr/LoRa_Subacuatico.git

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Arbey Robert M.", is written over a faint grid pattern.

ANEXO 3. Calibración de Sensores.

En el presente anexo, se presentan las imágenes correspondientes al proceso de calibración de la sonda de pH, para lo cual se hizo uso del Laboratorio de la carrera de Recursos Naturales y Renovables de la UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE. Para lo cual se hizo uso de un dispositivo Consort C562 (Analizador multiparamétrico de laboratorio) y soluciones de pH 4, 7 y 10.

1. Elementos para calibración de sonda de sensor pH, entre los cuales se visualizan las soluciones de pH, el Analizador multiparamétrico y la cubierta inferior del Nodo Sensor con el sensor de pH conectado.



2. Soluciones de pH 4, 7 y 10.



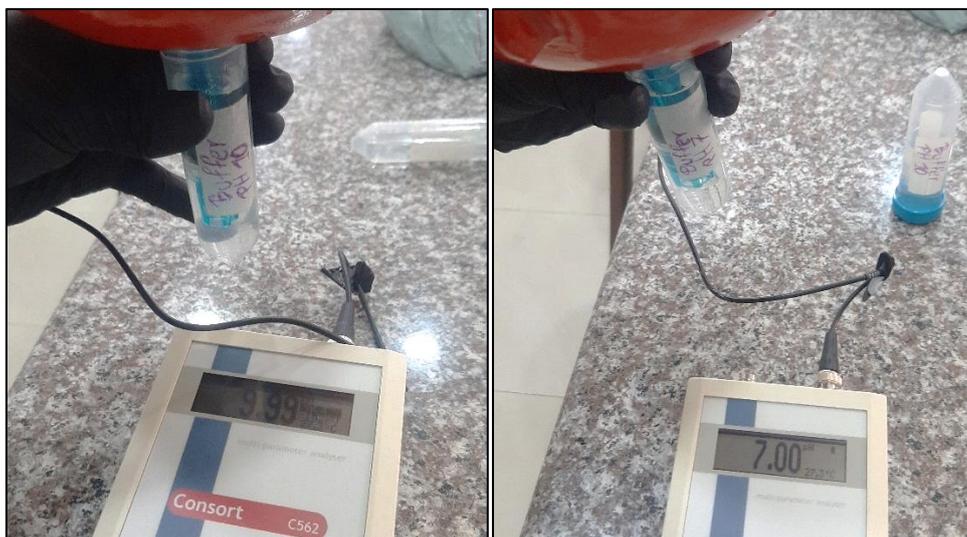
3. Sonda de pH sumergida en solución pH 7 y 10 con el uso del Analizador Multiparamétrico, marca datos fuera de rango.



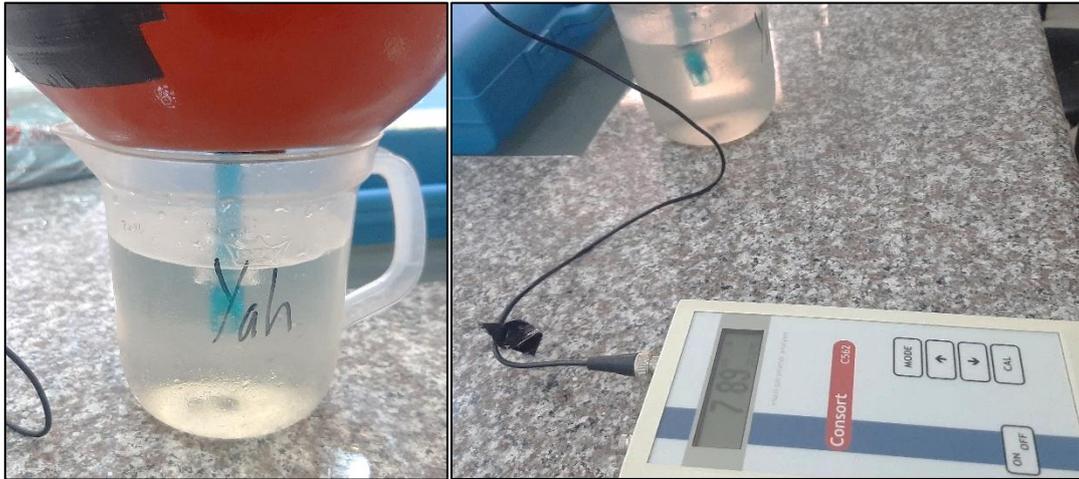
4. Calibración de sonda pH con el Analizador Multiparamétrico.



5. Datos arrojados por la sonda pH en cada solución después de la calibración.



6. Dato de pH del agua de la Laguna de Yahuarcocha recogida en el Laboratorio.



Arley Rojas M.

ANEXO 4. Aplicación de Resina Poliéster y Fibra de Vidrio.

En el presente anexo, se muestran las imágenes del proceso de recubrimiento con resina poliéster y fibra de vidrio de los módulos impresos en 3D tanto del Nodo Sensor como de la Boya de Comunicaciones.

1. Imagen de preparación de resina poliéster.



2. Imagen de Nodo Sensor impreso en PLA.



3. Imagen de recubrimiento del Nodo Sensor con resina poliéster y posterior pintado.



4. Aplicación de pasta de resina poliéster y fibra de vidrio al material flotante de la Boya de Comunicaciones.



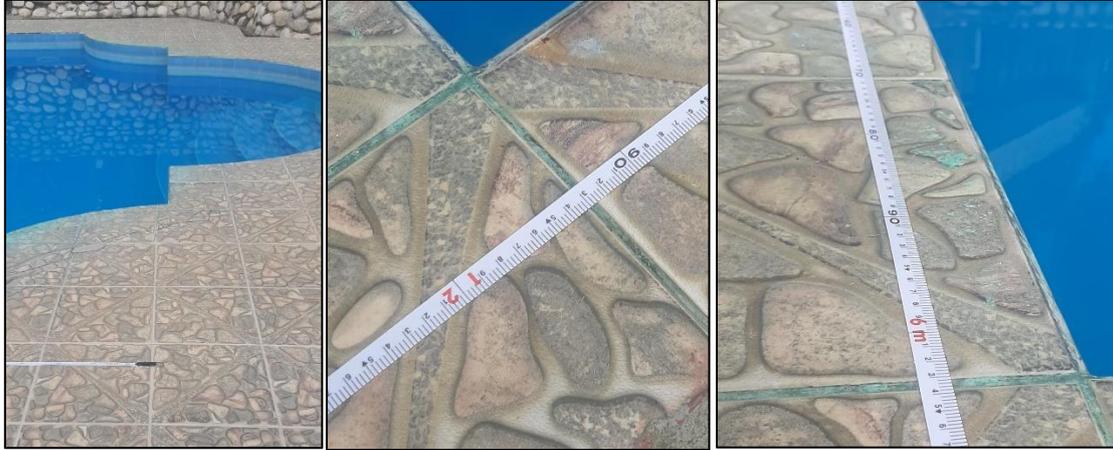
5. Imagen de material flotante de la Boya de Comunicaciones recubierto con resina poliéster y fibra de vidrio.



Handwritten signature in blue ink.

ANEXO 5. Pruebas en piscina.

1. Imágenes de medidas tomadas en la piscina, tanto de ancho como de largo mediante una cinta métrica.



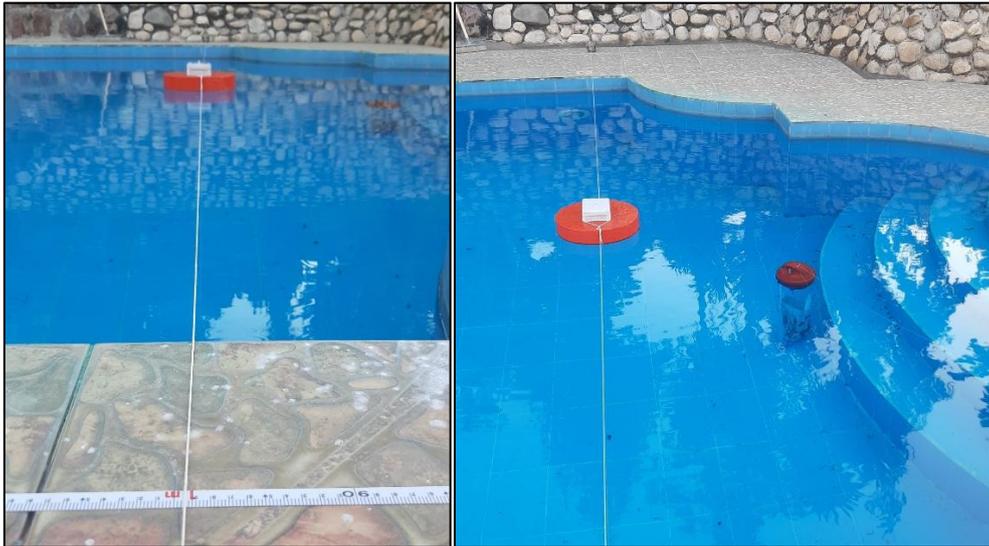
2. Imagen de medición de profundidad de piscina.



3. Imagen de nodos separados a 0.10m.



4. Imagen de nodos separados a 1m.



5. Imagen de nodos separados a 2m.



6. Imagen de nodos separados a 3m.



7. Imagen de nodos separados a 4m.



8. Imagen de nodos separados a 5m.



9. Imagen de nodos separados a 6m.



10. Imagen de nodos separados a 7m.



11. Imagen de nodos separados a 8m.



12. Imagen de nodos separados a 9m.



13. Imagen de nodos separados a 10m.



14. Imagen de nodos separados a 11m.



15. Imagen de nodos separados a 11.4m.



Arley Rojas H.

ANEXO 6. Pruebas en Yahuarcocha.

1. Imagen de escenario en Yahuarcocha.



2. Imagen de preparación de Boya de Comunicaciones.



3. Imagen de toma de medidas de Boya de Comunicaciones.



4. Imagen de Boya de Comunicaciones suspendida en la Laguna e Yahuarcocha.



5. Imagen de instalación del Nodo Sensor en la Laguna de Yahuarcocha.

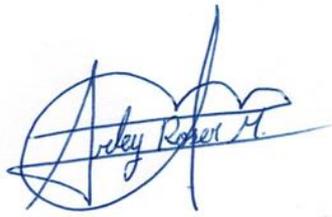


Ardley Rojas M.

ANEXO 7. Video de pruebas en Yahuarcocha.

En el enlace que se presenta a continuación, se encuentra un video demostrativo de cómo se instaló el Nodo Sensor y la Boya de Comunicaciones en la Laguna de Yahuarcocha, así como un vistazo de la toma de datos tanto de los sensores como de los parámetros de conexión en la interfaz de usuario.

- **Enlace:** <https://youtu.be/cVNp9EAA8Q4>

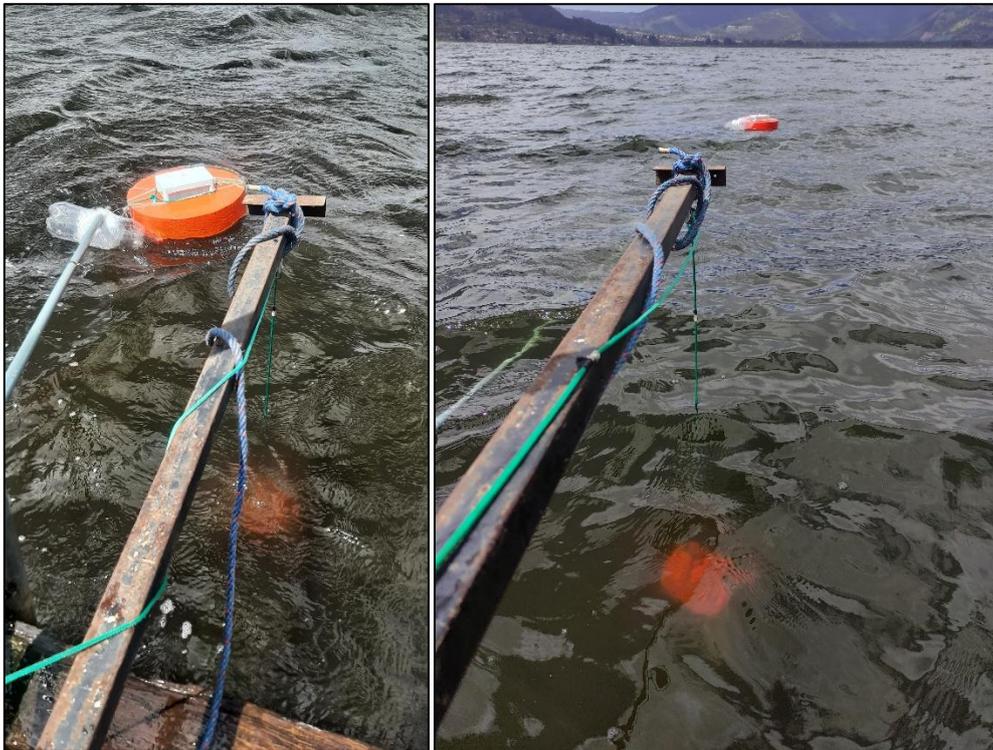


ANEXO 8. Pruebas en Lago San Pablo.

1. Imagen de instalación de Nodo Sensor en la Laguna de San Pablo.



2. Imagen de Nodo Sensor y Boya de Comunicaciones instaladas en la Laguna de San Pablo.



3. Imagen de Boya a varios metros de distancia en la Laguna de San Pablo.



Arley Robert M.

ANEXO 9. Tabla de medidas.

En la siguiente tabla se presentan las distancias reales luego de aplicar el teorema de Pitágoras referente a la profundidad del Nodo Sensor respecto a la distancia horizontal de la Boya de Comunicaciones.

PROFUNDIDAD (0.8m)			
Distancia referencial	Distancia real (D)	Distancia referencial	Distancia real (D)
0.2m	0.74m	1.8m	1.93m
0.3m	0.77m	1.9m	2.03m
0.4m	0.81m	2m	2.12m
0.5m	0.87m	2.1m	2.22m
0.6m	0.93m	2.4m	2.50m
0.7m	1m	2.7m	2.79m
0.8m	1.07m	3m	3.08m
0.9m	1.15m	4m	4.06m
1m	1.23m	5m	5.05m
1.1m	1.31m	6m	6.04m
1.2m	1.39m	7m	7.04m
1.3m	1.48m	8m	8.03m
1.4m	1.57m	9m	9.03m
1.5m	1.66m	10m	10.03m
1.6m	1.75m	11m	11.02m
1.7m	1.84m	11.4m	11.42m
PROFUNDIDAD (0.5m)			
0.1m	0.41m	3m	3.02m
1m	1.07m	3.5m	3.52m
2m	2.03m	4m	4.01m
PROFUNDIDAD (0.25m)			
0.1m	0.18m	2.7m	2.7m
0.3m	0.33m	2.9m	2.9m
0.6m	0.62m	3m	3m
1m	1.01m	3.1m	3.1m
1.3m	1.3m	3.3m	3.3m
1.6m	1.6m	4m	4m
1.9m	1.9m	5m	5m
2m	2m	6m	6m
2.1m	2.1m	7m	7m
2.3m	2.3m	8m	8m
2.5m	2.5m	8.5m	8.5m

ANEXO 10. Tabla de datos de la Laguna de San Pablo

Laguna de San Pablo	
Dato	Característica
- Altura sobre el nivel del mar.	- 2662m
- Área	- 583 hectáreas
- Profundidad máxima	- 35.2m
- Volumen de agua	- 140.106m ³
- Conductividad	- 300 a 320 ms
- Temperatura	- 18° C
- Alcalinidad	- 226 mg/l

Información tomada de:

- <https://geoparque.imbabura.gob.ec/index.php/es/geoproductos/lago-san-pablo-cascada-de-peguche>
- https://www.researchgate.net/publication/320186788_Vegetacion_acuatica_y_estado_trofico_de_las_lagunas_andinas_de_San_Pablo_y_Yahuarcocha_provincia_de_Imbabura_Ecuador

