



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN  
DE LA CALIDAD DEL AGUA ORIENTADO A LA PRODUCCIÓN  
ACUÍCOLA.**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

**P R E S E N T A:**

**ALEJANDRO DE LA CRUZ MENESES**

Director de Tesis:

**DR. JOSÉ JAIME CAMACHO ESCOTO**

Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS),  
UNAM

Ciudad Universitaria, CD. MX. 1 Noviembre, 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Agradecimientos

Agradezco a mi familia en general, todo el apoyo brindado durante mi formación académica, pero en especial a mi hermana Jazmín y a mi mamá Eve, ya que sin su apoyo no habría podido alcanzar esta meta. A Cinthya por la motivación que me brindó durante la escritura de este trabajo y a su familia, por el apoyo brindado en los experimentos realizados para la caracterización del sistema. A mis amigos de la universidad Omar, Luis, Alan, José, Javier y Alejandro, por sus consejos y apoyo durante el diseño, construcción e implementación del prototipo. A Edgar Soto y a su esposa Evelyn por su soporte y acompañamiento durante los momentos más difíciles de este trabajo.

Quiero agradecer a la Doctora Carmen Guadalupe Paniagua Chávez por confiar en mi trabajo y brindarme la oportunidad de probar el prototipo en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada bajo su tutela. A los investigadores que me permitieron instalar mi sistema en sus cultivos experimentales el Doctor Misael Rosales Leija, el Maestro Jesús Roberto Oyervides Figueroa y el Maestro Damián Hernández Bautista. A mis compañeros de laboratorio Jorge, Adrián y Galilea con los cuales conviví y trabajé todos los días. Al personal del CICESE que me brindó su apoyo durante las pruebas, en especial al conductor del CICESE móvil y a los cocineros del kiosko dos. A mis amigos de Ensenada Alfredo, Napoleón, Yesica, José, Yael, Andrés, Mariana y Blanca, por su constante apoyo.

Me gustaría agradecer especialmente a mi asesor de tesis el Doctor José Jaime Camacho Escoto por la ayuda que me brindó durante el desarrollo y la construcción del sistema de monitoreo de la calidad del agua y al Maestro Salvador Villasuso Palomares, por su apoyo, guía y tutela durante los distintos experimentos que se realizaron en las instalaciones del CICESE para evaluar el rendimiento del sistema realizado.

Asimismo, las aportaciones y recomendaciones que surgieron durante la revisión de este trabajo para mejorarlo por parte de los sinodales. Por otro lado, agradezco al CONACyT por el apoyo económico brindado en el programa "Becas Nacionales" durante 2 años, para poder realizar mi Maestría. También agradezco el apoyo económico brindado por el PAEP que me otorgó la Coordinación General de Estudios de Posgrado (CGEP) de la UNAM y la beca de estancia de investigador otorgada por el CICESE, para poder realizar la actividad académica: "Pruebas de un prototipo para la medición de la calidad del agua orientado a la producción acuícola en cultivos del CICESE".

# Índice general

<b>Resumen</b> . . . . .	5
<b>Abstract</b> . . . . .	6
<b>1. Introducción</b> . . . . .	<b>7</b>
1.1. Definición del problema . . . . .	9
1.2. Hipótesis . . . . .	9
1.3. Objetivos . . . . .	9
1.3.1. Objetivo general . . . . .	9
1.3.2. Objetivos particulares . . . . .	9
1.4. Metodología . . . . .	10
1.5. Contribución . . . . .	10
1.6. Descripción del contenido . . . . .	11
<b>2. IoT en acuicultura</b> . . . . .	<b>12</b>
2.1. Internet of Things . . . . .	12
2.1.1. Tecnología de comunicación para IoT . . . . .	13
2.1.2. Comparación del desempeño de distintas tecnologías de comunicación . . . . .	14
2.2. Acuicultura . . . . .	15
2.2.1. Modalidades de acuicultura . . . . .	15
2.2.2. Calidad del agua . . . . .	16
2.2.3. Parámetros de la calidad del agua . . . . .	16
2.3. Estado del arte . . . . .	17
<b>3. Marco teórico</b> . . . . .	<b>20</b>
3.1. LoRa . . . . .	20
3.1.1. Regulaciones . . . . .	20
3.1.2. Tasas de datos . . . . .	21
3.2. LoRaWAN . . . . .	21
3.2.1. Topología . . . . .	21
3.2.2. Clase de dispositivos . . . . .	23
3.2.3. Seguridad y autenticación . . . . .	24
3.3. ChirpStack . . . . .	24
3.4. Sistema de comunicación (elementos) . . . . .	25
3.4.1. Raspberry Pi 3B+ . . . . .	25
3.4.2. HT-M01 . . . . .	26
3.4.3. Wireless Stick Lite . . . . .	27
3.5. Sensores . . . . .	29
3.5.1. Atlas Scientific . . . . .	29
3.5.2. KS0429 keyestudio TDS Meter V1.0 . . . . .	32
3.5.3. Características técnicas de los sensores . . . . .	32
3.6. Sistema de alimentación . . . . .	33
3.6.1. Módulo de gestión de energía solar . . . . .	33
3.7. Sistema de alertas . . . . .	35
3.7.1. Pushbullet . . . . .	35
3.7.2. Simple Mail Transfer Protocol (SMTP) . . . . .	35

3.8. Tecnologías utilizadas para la implementación de la aplicación final . . . . .	35
3.8.1. MQTT . . . . .	35
3.8.2. Servidor LAMP . . . . .	36
<b>4. Implementación y construcción del sistema de monitoreo IoT</b>	<b>37</b>
4.1. Instalación y configuración de los componentes del servidor ChirpStack . . . . .	38
4.1.1. <i>Packet Forwarder</i> . . . . .	39
4.1.2. <i>ChirpStack Gateway Bridge</i> . . . . .	40
4.1.3. <i>ChirpStack Network Server</i> . . . . .	41
4.1.4. <i>ChirpStack Application Server</i> . . . . .	42
4.2. Configuración del <i>End Device</i> . . . . .	44
4.3. Protocolo de comunicación . . . . .	45
4.3.1. Transmisión . . . . .	45
4.3.2. Recepción . . . . .	46
4.4. Procesamiento de los datos . . . . .	47
4.4.1. Depuración de la información . . . . .	47
4.4.2. Almacenamiento de la información . . . . .	50
4.4.3. Sistema de alertas . . . . .	51
4.5. Diseño y construcción del dispositivo IoT . . . . .	53
4.5.1. Sistema de registro de datos . . . . .	53
4.5.2. Requerimiento energético . . . . .	55
4.5.3. Diseño y construcción de la estructura de alojamiento del dispositivo IoT . . . . .	58
4.6. Interfaz gráfica de usuario . . . . .	60
4.6.1. Reportes . . . . .	61
4.6.2. Configuración . . . . .	63
<b>5. Resultados y análisis de datos</b>	<b>67</b>
5.1. Fase de evaluación en condiciones controladas . . . . .	67
5.1.1. Diseño experimental . . . . .	67
5.1.2. Construcción del escenario experimental . . . . .	68
5.1.3. Prueba de control . . . . .	73
5.1.4. Prueba con piedra de aireación y suministro de aire . . . . .	78
5.1.5. Prueba con piedra de aireación y suministro de dióxido de carbono . . . . .	83
5.1.6. Análisis general . . . . .	88
5.1.7. Prueba de servicio con tanques de agua marina. . . . .	89
5.2. Fase de evaluación en ambientes de acuicultura . . . . .	91
5.2.1. Cultivo experimental de camarón . . . . .	91
5.2.2. Cultivo experimental de abulones . . . . .	94
5.2.3. Estanque ornamental de carpas koi . . . . .	97
5.2.4. Cultivo experimental de lobina rayada . . . . .	103
5.2.5. Cultivo experimental de almejas pismo . . . . .	106
<b>6. Conclusiones</b>	<b>110</b>
6.1. Conclusiones generales . . . . .	110
6.2. Verificación de la hipótesis . . . . .	110
6.3. Trabajo futuro . . . . .	112

# Índice de figuras

3.1. Arquitectura de red LoRaWAN. . . . .	22
3.2. <i>Stack</i> del protocolo LoRa. . . . .	23
3.3. Comportamiento de las ventanas de recepción de la clase A. . . . .	23
3.4. Ventana de recepción clase B. . . . .	24
3.5. Ventana de recepción clase C. . . . .	24
3.6. Conexión de los componentes del servidor de red ChirpStack LoRaWAN. . . . .	25
3.7. Placa Raspberry Pi modelo 3B+. . . . .	26
3.8. Gateway HT-M01 controlado a través de SPI por una Raspberry Pi ZERO W [Obtenido de [1]]. . . . .	27
3.9. Gateway HT-M01 controlado a través de USB por una Raspberry Pi modelo 3B+. . . . .	27
3.10Arquitectura de la placa <i>Wireless Stick Lite</i> [Obtenido de [2]]. . . . .	28
3.11Distribución de pines de la placa <i>Wireless Stick Lite</i> . [Obtenido de [2]] . . . . .	28
3.12.Componentes utilizados para medir el oxígeno disuelto. . . . .	30
3.13.Componentes utilizados para medir el pH. . . . .	30
3.14.Sensor de temperatura <i>EZO-RTD</i> . . . . .	31
3.15.Conexión entre la sonda industrial <i>ENV-50-pH</i> y los circuitos <i>EZO-PH</i> y <i>EZO-RTD</i> . [Obtenido de [3]]. . . . .	31
3.16.Circuitos <i>EZO-PH</i> , <i>EZO-RTD</i> y <i>EZO-DO</i> montados sobre la placa de aislamiento eléctrico. . . . .	32
3.17.Componentes utilizados para medir los TDS. . . . .	32
3.18.Distintas formas de alimentar al módulo de gestión de energía. . . . .	33
3.19Arquitectura del módulo de gestión de energía. [Obtenido de [4]]. . . . .	34
3.20Arquitectura de publicación/suscripción de MQTT. . . . .	36
4.1. Diagrama del sistema propuesto . . . . .	38
4.2. Arquitectura utilizada para el diseño del servidor <i>ChirpStack</i> . . . . .	39
4.3. Ejemplo de <i>Gateway.id</i> [Obtenido de [1]]. . . . .	39
4.4. Estado activo y corriendo del servicio <i>lrgateway</i> . . . . .	39
4.5. Información del <i>ChirpStack Gateway Bridge</i> en el archivo <i>global.conf.json</i> . . . . .	40
4.6. Proceso de comunicación entre el <i>Gateway Bridge</i> y el <i>Network Server</i> . . . . .	40
4.7. Estado activo y corriendo del <i>broker</i> MQTT. . . . .	41
4.8. Estado activo y corriendo del servicio <i>Gateway Bridge</i> . . . . .	41
4.9. Estado activo y corriendo del servicio <i>Network Server</i> . . . . .	42
4.10.Comunicación del <i>Application Server</i> con los distintos del servidor <i>ChirpStack</i> . . . . .	42
4.11Estado activo y corriendo del servicio <i>Application Server</i> . . . . .	43
4.12Interfaz <i>web</i> de <i>ChirpStack</i> para la administración de usuarios, organizaciones, aplicaciones y dispositivos. . . . .	43
4.13Rutina de funcionamiento del dispositivo IoT. . . . .	44
4.14.Configuración de las claves necesarias para que el <i>end device</i> se pueda comunicar con el <i>gateway</i> . . . . .	45
4.15Estructura de la trama utilizada para la transmisión de datos. . . . .	46
4.16Estructura del objeto que retorna la función <i>Encode</i> . . . . .	47
4.17.Ubicación de los datos requeridos en la plataforma <i>web</i> de <i>ChirpStack</i> para la suscripción al tema de publicación. . . . .	48

4.18	Ejemplo de evento <i>join</i> recopilado por medio de <i>Mosquitto</i> y <i>ChirpStack</i> . . . . .	49
4.19	Evento <i>up</i> registrado a través de <i>Mosquitto</i> . . . . .	49
4.20	Modelo conceptual de la base de datos . . . . .	50
4.21	Modelo lógico de la base de datos . . . . .	51
4.22	Ubicación del <i>token</i> de acceso en <i>Pushbullet</i> . . . . .	52
4.23	Ejemplo de mensajes enviados a través del sistema de alertas. . . . .	53
4.24	Diagrama de conexiones que muestra los sensores conectados al sistema de registro de datos. . . . .	54
4.25	Esquema de conexiones realizado en el <i>software EasyEDA</i> . . . . .	55
4.26	PCB generada a partir del diseño esquemático en <i>EasyEDA</i> . . . . .	55
4.27	Rutina que ejecuta el sistema de recolección de datos. . . . .	56
4.28	Sistema de alimentación para el dispositivo <i>IoT</i> . . . . .	58
4.29	Ejemplos de granjas de cultivo acuícola . . . . .	58
4.30	Perspectiva interna de la carcasa que alberga los componentes del dispositivo <i>IoT</i> . . . . .	59
4.31	Secciones internas de la boya . . . . .	59
4.32	Dispositivo <i>IoT</i> en su versión de boya para la medición de los parámetros de la calidad del agua. . . . .	60
4.33	<i>Login</i> de la interfaz gráfica de usuario . . . . .	61
4.34	Pestaña de la interfaz <i>web</i> para consultar los datos recopilados por los dispositivos <i>IoT</i> en formato de tabla y gráfica. . . . .	62
4.35	Pestaña de la interfaz <i>web</i> para consultar el histórico de las calibraciones realizadas a los sensores. . . . .	63
4.36	Pestaña de la interfaz <i>web</i> para consultar las alertas. . . . .	63
4.37	Pestaña de la interfaz <i>web</i> para modificar el rango de los valores de alerta. . . . .	64
4.38	Pestaña de la interfaz <i>web</i> para añadir un nuevo sensor a un dispositivo <i>IoT</i> . . . . .	64
4.39	Pestaña de la interfaz <i>web</i> para añadir dispositivo <i>IoT</i> . . . . .	65
4.40	Pestaña de la interfaz <i>web</i> para modificar el estatus de las notificaciones. . . . .	65
4.41	Pestaña de la interfaz <i>web</i> para añadir un nuevo correo al cual notificar en caso de que se presente una alerta. . . . .	65
4.42	Pestaña de la interfaz <i>web</i> para cambiar el periodo entre el registro de datos por parte de un dispositivo <i>IoT</i> . . . . .	66
4.43	Pestaña de la interfaz <i>web</i> para calibrar los sensores. . . . .	66
5.1.	Diagrama de experimentos. . . . .	68
5.2.	Configuración base del sistema cerrado. Enfriador (1), control del enfriador (2), tanque de agua (3), tubería para la conexión de la bomba (4) y bomba magnética (5). . . . .	69
5.3.	Equipo de medición utilizado durante la primera fase de experimentación. . . . .	69
5.4.	Configuración externa del sistema cerrado utilizado para la prueba de control. Enfriador (1), tubería para la conexión de la bomba (2), control del enfriador (3), tanque de agua (4), medidor de pH <i>Aqua Medic</i> (5), prototipo en <i>protoboard</i> y multiparamétrica ProDSS YSI (7). . . . .	70
5.5.	Componentes del interior del tanque de agua. Sonda del <i>chiller</i> para detectar la temperatura del agua (1), sondas que conforman al prototipo (2), cabezal de la multiparamétrica ProDSS YSI (3), sonda del medidor de pH <i>Aqua Medic</i> (4) y piedra de aireación (5). . . . .	70
5.6.	Configuraciones del escenario de pruebas para el suministro de aire y dióxido de carbono al sistema. Llave de paso de aire (1), manguera (2), sistema de tubería para la administración de aire (3), válvula reguladora (4) y tanque de dióxido de carbono (5). . . . .	71
5.7.	Integración del calentador al sistema de experimentación. Sonda del <i>chiller</i> para detectar la temperatura del agua (1), sondas que conforman al prototipo (2), cabezal de la multiparamétrica ProDSS YSI (3), sonda del medidor de pH <i>Aqua Medic</i> (4) y resistencia del calentador (5). . . . .	71
5.8.	Posición del <i>end device</i> (punto A), con respecto al <i>gateway</i> (punto B). . . . .	72
5.9.	Soluciones utilizadas para la calibración de los equipos de medición. . . . .	72

5.10	Representación gráfica de la temperatura medida por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de control en los experimentos realizados. . . .	73
5.11	Representación gráfica del pH medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de control en los experimentos realizados. . . . .	74
5.12	Representación gráfica del oxígeno disuelto medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de control en los experimentos realizados. . . .	75
5.13	Representación gráfica del total de sólidos disueltos medido por el prototipo, durante la prueba de control en los experimentos realizados. . . . .	77
5.14	Representación de la perturbación presentada en las sondas del prototipo. . . .	78
5.15	Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el equipo de la institución y el prototipo en el experimento de agua dulce a 12°C, en la prueba con la piedra de aireación. . . . .	79
5.16	Representación gráfica de la temperatura medida por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de aireación en los experimentos realizados. . .	80
5.17	Representación gráfica del pH medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de aireación en los experimentos realizados. . . . .	81
5.18	Representación gráfica del oxígeno disuelto medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de aireación en los experimentos realizados. . .	82
5.19	Representación gráfica del total de sólidos disueltos medido por el prototipo, durante la prueba de aireación en los experimentos realizados. . . . .	83
5.20	Representación gráfica de la temperatura medida por el equipo de la institución y el prototipo, durante la inyección de dióxido de carbono en los experimentos realizados. . . . .	84
5.21	Representación gráfica del pH medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la inyección de dióxido de carbono en los experimentos realizados. .	85
5.22	Imagen ilustrativa del problema de calibración entre el equipo <i>Aqua Medic</i> y el prototipo. . . . .	86
5.23	Representación gráfica del oxígeno disuelto medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba con el suministro de dióxido de carbono en los experimentos realizados. . . . .	87
5.24	Representación gráfica del total de sólidos disueltos medido por el prototipo, durante la prueba con el suministro de dióxido de carbono en los experimentos realizados. . . . .	88
5.25	Zona de acondicionamiento de agua marina. . . . .	89
5.26	Elementos del sistema de monitoreo de la calidad del agua. . . . .	90
5.27	Ubicación del <i>gateway</i> y del <i>end-device</i> con uno de los tanques como interferencia.	90
5.28	Posicionamiento de la boya en medio de los tanques de agua marina. . . . .	91
5.29	Sistema acuícola para el mantenimiento de camarones. Tanque de compensación (1) y tanque de cultivo (2). . . . .	92
5.30	Camarones en el interior del tanque de cultivo . . . . .	92
5.31	Adaptación del sistema recolector de datos en un gabinete. . . . .	93
5.32	Configuración del escenario de experimentación realizada durante el experimento en el cultivo de camarones. Tanque de compensación (1), sistema de recolección de datos (2) y <i>gateway</i> (3). . . . .	93
5.33	Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el prototipo en el cultivo experimental de camarones. . . . .	94
5.34	Cultivos experimentales de abulón . . . . .	95
5.35	Configuración del escenario de experimentación realizada en el cultivo de abulones. Sistema de recolección de datos (1), tanque de compensación (2), cultivos de abulones (3) y <i>gateway</i> . . . . .	95
5.36	Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el prototipo en el cultivo experimental de abulones. . . . .	96
5.37	Estanque ornamental ubicado en la entrada del edificio SUBNARGENA del CI-CESE. . . . .	97
5.38	Prueba de flotabilidad e impermeabilidad del cuerpo impreso en 3D. . . . .	98
5.39	Prueba de hermeticidad de la boya. . . . .	98

5.40	Proceso de armado del dispositivo IoT en su versión de boya. . . . .	99
5.41	Escenario implementado para probar la conectividad entre el <i>gateway</i> y el sistema de recolección de datos. . . . .	100
5.42	Escenarios propuestos para evaluar la robustez del enlace de comunicación entre el <i>gateway</i> y el <i>end device</i> . . . . .	100
5.43	Estación de monitoreo montada al interior del edificio SUBNARGENA durante el experimento en el estanque de carpas koi. . . . .	101
5.44	Estanque ornamental de carpas koi. . . . .	102
5.45	Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el prototipo en el estanque ornamental de carpas koi. . . . .	103
5.46	Composición del cultivo experimental de lobina rayada . . . . .	104
5.47	Configuración inicial del escenario de experimentación realizada en el cultivo de lobina rayada. . . . .	104
5.48	Línea de vista directa entre las antenas del <i>end device</i> y el <i>gateway</i> . Posición del dispositivo <i>IoT</i> (A) y posición del <i>gateway</i> (B). . . . .	105
5.49	Cultivo experimental de lobina rayada . . . . .	105
5.50	Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el prototipo en el cultivo experimental de lobina rayada. . . . .	106
5.51	Configuración base del sistema cerrado. Enfriador (1), control del enfriador (2), tanque de agua (3), tubería para la conexión de la bomba (4), bomba magnética (5), biofiltro (6), equipo <i>Aqua Medic</i> (7) y tanque con los organismos (8). . . . .	107
5.52	Cultivo experimental de almejas pismo . . . . .	107
5.53	Ubicación de los componentes del sistema de monitoreo en el cultivo de almejas pismo. Posición del dispositivo <i>IoT</i> (A) y posición del <i>gateway</i> (B). . . . .	108
5.54	Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el prototipo en el cultivo experimental de almejas pismo. . . . .	109

# Índice de tablas

3.1. Alcance de la tecnología LoRa en distintos entornos. . . . .	20
3.2. Frecuencias destinadas a la banda ISM en las distintas regiones del mundo. . .	21
3.3. Spreading Factor contra la tasa de datos y el tiempo en aire. . . . .	21
3.4. Características y especificaciones de los sensores utilizados para el desarrollo del prototipo de medición de la calidad del agua. . . . .	33
5.1. Comparación del registro de la temperatura del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba de control. . . . .	74
5.2. Comparación del registro del pH del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba de control. . . . .	75
5.3. Comparación del registro del oxígeno disuelto en el agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba de control. . . .	76
5.4. Registro de los TDS en el agua del prototipo durante los experimentos en la prueba de control. . . . .	76
5.5. Variables de la calidad del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante el experimento de agua dulce a 12°C en la prueba con la piedra de aireación. . . . .	79
5.6. Comparación del registro de la temperatura del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de aire. . . . .	79
5.7. Registro de los TDS en del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono. . . . .	81
5.8. Comparación del registro del oxígeno disuelto del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de aire. . . . .	81
5.9. Registro de los TDS en del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono. . . . .	83
5.10. Comparación del registro de la temperatura del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono. . . . .	84
5.11. Comparación del registro del pH del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono. . . . .	84
5.12. Comparación del registro del oxígeno disuelto del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono. . . . .	86
5.13. Registro de los TDS en del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono. . . . .	87

# Acrónimos

**ABP** Activation By Personalization. 1, 24, 44

**ADR** Adaptive Data Rate. 1, 21, 45

**API** Application Programming Interface. 1, 25, 35, 42, 51

**BLE** Bluetooth Low Energy. 1, 26

**BPSK** Binary Phase-Shift Keying. 1, 13

**CFH** Cubic Feet Per Hour. 1, 71

**CICESE** Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 1, 5, 6, 67, 89, 91, 97, 103, 106

**CONAPESCA** Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. 1, 8

**CRC** Cyclic Redundancy Check. 1, 57

**CSS** Chirp Spread Spectrum. 1, 13, 20

**CSV** Comma Separated Values. 1, 61

**DSN** Data Source Name. 1, 41

**EC-GSM** Extended Coverage Global System for Mobile communications. 1, 14

**EIRP** Effective Isotropic Radiated Power. 1, 20

**FAO** Food and Agriculture Organization of United Nations. 1, 7, 15

**FSK** Frequency Shifting Keying. 1, 20

**GPIO** General Purpose Input/Output. 1, 26

**GPS** Global Positioning System. 1

**gRPC** gRPC Remote Procedure Calls. 1, 42

**GSM** Global System for Mobile communications. 1, 19

**GUI** Graphical User Interface. 1, 60

**HDMI** High-Definition Multimedia Interface. 1, 26

**HESS** Hybrid Energy Storage System. 1, 55, 56

**HTML** HyperText Markup Language. 1, 37, 60

**HTTP** Hypertext Transfer Protocol. 1, 25

- I<sup>2</sup>C** Inter-Integrated Circuit. 1, 26, 29, 37, 53, 54
- IDE** Integrated Development Environment. 1, 29, 44, 53
- IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1, 14
- IoT** Internet of Things. 1, 5, 6, 8, 9, 11–13, 18, 19, 26, 35, 44, 56–58, 60–67, 99, 102–105, 107, 108, 110, 111
- IP** Internet Protocol. 1, 13, 40–42
- ISM** Industrial Scientific and Medical. 1, 13, 14, 20, 26, 29, 38, 45
- JSON** JavaScript Object Notation. 1, 40, 42, 47–50
- LAM** LoRA Additional Module. 1, 18, 19
- LAMP** Linux, Apache, MySQL y PHP. 1, 36, 51, 60
- LAN** Local Area Network. 1, 26
- LCD** Liquid-Crystal Display. 1, 26
- LED** Light-Emitting Diode. 1, 28, 34
- LoRa** Long Range. 1, 10, 13, 14, 18–23, 25–29, 38
- LoRaWAN** Long Range Wide Area Network. 1, 5, 6, 9, 10, 14, 15, 18, 19, 21–27, 37, 41, 44, 47, 53, 91, 110, 111
- LPWAN** Low Power Wide Area Network. 1, 9, 13, 14, 20, 21
- LTE** Long Term Evolution. 1, 14
- M2M** Machine-to-Machine. 1, 13, 35
- MAC** Medium Access Control. 1, 24, 41
- MAMP** macOS, Apache, MySQL y PHP. 1, 36
- MIT** Massachusetts Institute of Technology. 1, 24
- MoT** MAC on Time. 1, 14
- MPPT** Maximum Power Point Tracker. 1, 33, 34
- MQTT** Message Queue Telemetry Transport. 1, 5, 6, 25, 35–37, 40–42, 47, 49, 64
- NB-IoT** Narrow Band Internet of Things. 1, 13–15, 19
- NIST** National Institute of Standards and Technology. 1, 29
- OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing. 1, 14
- OTAA** Over-The-Air-Activation. 1, 24, 44, 45
- PAIRS** Physical Analytics Integrated Repository and Services. 1, 19
- PCB** Printed Circuit Board. 1, 54, 55
- PDF** Portable Document Format. 1, 61
- PETG** Polyethylene Terephthalate Glycol. 1, 59

- pH** Potential of Hydrogen. 1, 8, 16, 17, 19, 30, 31, 46, 53, 67, 69, 70, 72, 74, 75, 78–81, 84, 85, 88, 89, 91, 94, 95, 97, 103, 105–111
- PHP** Hypertext Preprocessor. 1, 19, 36, 37, 60
- PoE** Power over Ethernet. 1, 26
- PVC** Polyvinyl Chloride. 1, 98
- QoS** Quality of Service. 1, 36
- ROUV** Remotely Operated Underwater Vehicle. 1, 18
- RPMA** Random Phase Multiple Access. 1, 14
- SC-FDMA** Single Carrier Frequency Division Multiple Access. 1, 14
- SCL** Serial Clock. 1, 54
- SD** Secure Digital. 1, 26
- SDA** Serial Data. 1, 54
- SF** Spreading Factor. 1, 14, 18, 21, 27, 29, 57, 111
- SMTP** Simple Mail Transfer Protocol. 1, 35, 37
- SoC** System on Chip. 1, 27
- SOFIA** The State of World Fisheries and Aquaculture. 1, 7
- SPI** Serial Peripheral Interface. 1, 26
- SQL** Structured Query Language. 1, 36, 51
- SRA** Sistema de Recirculación Acuícola. 1, 67, 104
- SUBNARGENA** Subsistema Nacional de Recursos Genéticos Acuáticos. 1, 97, 101, 102
- TCP/IP** Transmission Control Protocol/Internet Protocol. 1, 35
- TDS** Total Dissolved Solids. 1, 8, 16, 17, 46, 53, 54, 67, 69, 70, 77–79, 82, 87, 89, 91
- ToA** Time on Air. 1, 57
- UART** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. 1, 26, 29, 53
- UDP** User Datagram Protocol. 1, 25, 39, 40
- UNB** Ue-fdmltra-NarrowBand. 1, 13
- USB** Universal Serial Bus. 1, 26, 27, 33, 34, 39, 56
- WAMP** Windows, Apache, MySQL, and PHP. 1, 36

# Resumen

En acuicultura, el cuidado de la calidad del agua es de vital importancia para el éxito de las operaciones acuícolas. Cada variable de la calidad del agua puede influir en la salud de los organismos que se cultiven, es por ello, que se busca mantener un equilibrio entre las variables involucradas en un sistema acuícola para que los organismos acuáticos puedan desarrollarse plenamente y cuenten con buena salud. Sin embargo, el proceso para monitorear las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua en sistemas acuícolas, generalmente, han dependido de la intervención humana. Esto ha provocado que no se cuente con un registro constante de la calidad del agua y que en caso de que se presente una anomalía en los cultivos, no se pueda actuar inmediatamente para corregirla.

Hoy en día, se han desarrollado proyectos en los que se aplican principios de ingeniería al área de acuicultura para mejorar el monitoreo, el control y la automatización de los procesos en un cultivo acuícola. En el área de acuicultura de precisión, a través del uso del IoT, se ha logrado la implementación de redes de sensores capaces de monitorear granjas acuícolas de las cuales se obtiene información en tiempo real, los datos se recopilan y almacenan para proporcionar a los acuicultores información específica de cada tanque o jaula de cultivo.

En este proyecto se presenta el desarrollo de un sistema para el monitoreo y recolección de datos. El sistema se compone de un dispositivo IoT para la medición de parámetros relacionados con algún fenómeno de interés denominado *end device*, de un *gateway* que se encarga de recibir los datos, un servidor de aplicación que almacena, muestra y activa alarmas en caso de ser necesario, y de un servidor de red que coordina al *gateway* y al servidor de aplicación. Como demostración del sistema, se muestra una aplicación de monitoreo de la calidad del agua en granjas de peces, sin embargo, el sistema propuesto es de propósito general, y puede ser usado en una gran variedad de aplicaciones IoT.

Para implementar la comunicación bidireccional entre el *gateway* y el *end device* se utiliza el protocolo LoRaWAN empleando dispositivos de clase A. El servidor de red se encarga de comunicar los datos que recibe a través del protocolo MQTT, el cual se basa en un sistema de suscripciones y publicaciones. Por medio de un *script* de *Python* se reciben los datos a través de MQTT, los cuales se procesan para verificar que se encuentren dentro de un rango deseable y, en caso contrario, activar una alarma. Aunado a esto, la información se almacenan en una base de datos en *MySQL*. Por último, para mostrar los datos al usuario final se diseñó una página web, la cual accede a la base de datos para mostrar la información recolectada.

El sistema de monitoreo de la calidad del agua, desarrollado en este trabajo, se implementó y evaluó en cultivos experimentales de camarón, abulón, lobina rayada, carpas koi y almejas pismo, ubicados en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Las mediciones fueron realizadas cada minuto, obteniendo alrededor de 1440 muestras por día contra dos que se acostumbra tomar de forma manual en dichos cultivos.

Con este proyecto se les permitió a los investigadores asociar algún problema que se generaba en sus tanques experimentales a un evento en particular (por ejemplo, el recambio del agua). Se observó que el prototipo es capaz de transmitir información en entornos donde se presente línea de vista directa y en lugares sin demasiada interferencia provocada por tanques de cultivo, paredes, entre otros elementos.

Por último, durante las pruebas se observó que al sellar por completo el sistema de recolección de datos, utilizando silicón, se presentó una desconexión del servicio de transmisión de datos, debido a que los mensajes del *gateway* ya no se recibían en el *end device*.

# Abstract

In aquaculture, water quality care is of vital importance for the success of aquaculture operations. Each variable of water quality can influence the health of the organisms being cultured, which is why a balance is sought between the variables involved in an aquaculture system so that aquatic organisms can develop fully and be in good health. However, the process of monitoring the physical, chemical and biological properties of water in aquaculture systems has generally depended on human intervention. This has meant that there is no constant record of water quality and that in the event of an anomaly in the cultures, it is not possible to act immediately to correct it.

Today, projects have been developed in which engineering principles are applied to the aquaculture area to improve the monitoring, control and automation of the processes in an aquaculture crop. In the area of precision aquaculture, through the use of IoT, it has been achieved the implementation of sensor networks capable of monitoring aquaculture farms from which information is obtained in real time, the data is collected and stored to provide aquaculturists with specific information of each tank or culture cage.

This project presents the development of a system for monitoring and data collection. The system is composed of a device for measuring parameters related to a phenomenon of interest called end device, a gateway that is in charge of receiving the data, an application server that stores, displays and triggers alarms if necessary, and a network server that coordinates the gateway and the application server. As a demonstration of the system, a fish farm water quality monitoring application is shown, however, the proposed system is general purpose, and can be used in a wide variety of IoT applications.

To implement bidirectional communication between the gateway and the end device, the LoRaWAN protocol using class A devices is used. The network server is responsible for communicating the data it receives through the MQTT protocol, which is based on a subscription and publication system. By means of a Python script, the data is received through MQTT, which is processed to verify that it is within a desirable range and, if not, to activate an alarm. In addition, the information is stored in a database in MySQL. Finally, to display the data to the end user, a web page was designed, which accesses the database to display the collected information.

The water quality monitoring system developed in this work was implemented and evaluated in experimental shrimp, abalone, striped bass, koi carp and pismo clams farms located in the CICESE. Measurements were taken every minute, obtaining about 1440 samples per day versus two that are usually taken manually in these cultures.

This project allowed the researchers to associate a problem in their experimental tanks with a particular event (e.g., water replacement). It was observed that the prototype is capable of transmitting information in environments where there is direct line of sight and in places without too much interference caused by culture tanks, walls, among other elements.

Finally, during the tests it was observed that when the data collection system was completely sealed, using silicone, the data transmission service was disconnected because the messages from the gateway were no longer received by the end device.

# Capítulo 1

## Introducción

En [5], la *Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO)* define a la acuicultura como el cultivo de organismos acuáticos, incluyendo peces, moluscos, crustáceos y plantas marinas. Esta actividad implica cierta intercesión en el proceso de cría con la finalidad de mejorar la producción, así como toda la planificación que conlleva madurar las especies hasta el periodo de cosecha. La acuicultura y la pesca son dos actividades diferentes con el mismo fin, ya que mientras en la pesca se aprovechan los recursos brindados por la naturaleza, la acuicultura se asemeja más a otras actividades como la agricultura o la ganadería, pues implica la crianza y la administración de los recursos en un espacio predestinado a la actividad.

En la actualidad se reconoce ampliamente la importancia de utilizar los recursos pesqueros y acuícolas de manera responsable. Sin embargo, esto no siempre fue así, ya que en el pasado se creía que los recursos provenientes del mar eran infinitos. La Segunda Guerra Mundial marcó un antes y un después en la gestión de los océanos, debido al crecimiento científico y tecnológico, los cuales impulsaron un gran desarrollo de la pesca y las flotas pesqueras [6]. Desde 1970, la sobreexplotación de los recursos acuáticos ha generado una crisis en la industria pesquera por el colapso de varias poblaciones de peces en todo el mundo. Lo anterior debido a que la captura de animales silvestres ha sido mayor a la capacidad natural de las poblaciones para reemplazarse a sí mismas a través de la reproducción. Esto provocó que se comprendiera que los recursos pesqueros, si bien son renovables, no son infinitos [7].

Además de los problemas provocados por la sobrepesca, los ambientes acuáticos enfrentan varias dificultades relacionadas con el incremento continuo de la humanidad. Por ejemplo, la contaminación por aguas residuales, pesticidas, derrames de petróleo, degradación debido al turismo, especies invasivas, el cambio climático, entre otros [8].

Recientemente, la *FAO* reportó en *The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA)* [9], que la producción mundial de pescado en 2020 fue aproximadamente de 178 millones de toneladas, de las cuales el 49% procedieron de la producción acuícola. Lo cual representó un gran incremento frente al 25.7% que se produjo en el año 2000. La producción pesquera y acuícola, proveniente de ecosistemas marinos y de agua dulce, son una de las mayores fuentes de proteína animal del mundo. En 2017, el pescado representó el 17% de la ingesta de proteínas animales de la población mundial y el 7% de todas las proteínas consumidas. Este rápido crecimiento ha generado retos que incluyen preocupaciones sobre el deterioro ambiental, las enfermedades, los parásitos y la necesidad de administrar los recursos eficientemente.

Los datos recopilados por el informe *SOFIA* de 2022 muestran, a nivel internacional, que México se posiciona dentro de los 20 mayores productores de pesca de captura marina y de pesca de captura en aguas continentales, ocupando la posición 18 y 15, respectivamente. Con una producción promedio anual de 1.35 millones de toneladas en la primera actividad y una producción de 0.15 millones de toneladas en la segunda. Sin embargo, la producción acuícola del país, no es lo suficientemente alta para destacar por sí sola y se agrupa junto con la producción de todos los países latinoamericanos y del Caribe, a excepción de Chile, dando un total de 2275.5 mil toneladas de pescado. Estas cifras son preocupantes, ya que el país depende en su mayoría de la producción que proviene de la pesca y no de la acuicultura, provocando que gran parte de la proteína procedente del mar no sea autosustentable. Sin

embargo, México cuenta con la infraestructura para poder llevar a cabo dicha actividad, ya que la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA), reportó en 2021 [10] que el país cuenta con aproximadamente 10634 instalaciones acuícolas, concentradas mayormente en los estados de Puebla y Sinaloa que cuentan con el 10.7% y el 14% de las instalaciones, respectivamente. México tiene un gran potencial para el desarrollo del sector acuícola. No obstante, dicho desarrollo está condicionado a las posibilidades y capacidades que tienen los acuicultores.

En la acuicultura, es fundamental la calidad del agua para garantizar el éxito de las operaciones, esta incluye todas las variables físicas, químicas y biológicas que influyen en la producción de especies acuáticas [11]. Existen diversas causas que pueden alterar las propiedades del agua. Además, algunas de estas propiedades pueden tener un impacto importante en los organismos. Por ejemplo, una variación repentina en la temperatura o en la concentración de oxígeno disuelto, puede provocar una mortalidad masiva de los organismos que se estén criando. Alteraciones menos severas pueden influir en la capacidad de los organismos para resistir enfermedades o pueden afectar en su crecimiento. Para conseguir una buena producción, es importante mantener las condiciones del ambiente acuícola dentro de los límites de tolerancia para la especie que se cultiva. Habitualmente, el cuidado de la calidad del agua ha requerido de la intervención humana y ha dependido en gran medida de la experiencia y la intuición del acuicultor para tomar decisiones y actuar debidamente. Además, a medida que crece el tamaño de la granja y se traslada más lejos de la costa, el monitoreo se vuelve más difícil de realizar, porque es más tedioso el manejo de muchas granjas y es más difícil desplazarse a lugares remotos [12].

La decisión de intervenir para adecuar o mejorar la calidad del agua de un cultivo debe de ser tomada sobre una base de información cuantitativa y confiable. Algo que no se puede realizar de la forma tradicional, ya que los acuicultores toman muestras de sus cultivos pocas veces al día y durante la noche las granjas se quedan sin supervisión. La evaluación periódica del agua, permite reunir datos importantes que indican las condiciones actuales, y con los que se pueden predecir los futuros cambios en la calidad del agua.

La acuicultura de precisión aprovecha principios y conceptos del *Internet of Things (IoT)* para recopilar información de las granjas por medio de redes de sensores que se despliegan en los cultivos [12]. Los sensores interconectados guardan y recolectan datos para proporcionar información específica y detallada de cada estanque o jaula. Con los datos recopilados se pueden tomar decisiones que mejoren la salud, el crecimiento y, por lo tanto, el rendimiento económico de la cosecha, además de reducir el impacto ambiental. Las granjas de países desarrollados se caracterizan por desplegar redes de cientos de sensores en sus instalaciones, los cuales se conectan a un sistema de niebla, nube o ambas.

Los objetivos de la acuicultura de precisión que se muestran en [13] son mejorar la precisión de las operaciones acuícolas, automatizar y optimizar las operaciones, y proporcionar un apoyo a la toma de decisiones más fiable, reduciendo la dependencia del trabajo manual y las evaluaciones subjetivas. Sin embargo, en [14] se habla de los retos a los que los sistemas de IoT en altamar se tienen que enfrentar y los cuales también se pueden aplicar a la acuicultura de precisión, estos son el desafío de energía disponible, la conectividad en tiempo real y la solidez del sistema frente a errores.

Hoy en día ya existen soluciones dedicadas al cuidado de la calidad del agua proporcionadas por empresas como *HOBO Data Loggers* y *HaibuSmart*. Desafortunadamente, dichas soluciones están diseñadas para ciertas condiciones del agua o adaptadas para los países en donde se implementan, además de que su costo puede llegar a ser muy elevado. La mayoría de los trabajos desarrollados en el área de acuicultura de precisión se han realizado en países de Europa, Estados Unidos, Canadá y Ecuador; sin embargo, hay muy pocos trabajos desarrollados y adaptados para México.

Es por lo anterior, que en este proyecto de tesis se propone el diseño y la realización de un prototipo de un sistema autosustentable de recolección de datos para la medición de la calidad del agua, tomando en cuenta los parámetros de temperatura, oxígeno disuelto, *pH* y sólidos disueltos totales (*TDS*). Este prototipo será caracterizado y puesto a prueba en instalaciones de acuicultura en México.

## 1.1. Definición del problema

La calidad del agua es clave para el buen desarrollo de la acuicultura, ya que cada propiedad de esta puede afectar directamente la salud de los organismos, habitualmente los procesos de crianza y cultivo han dependido de la experiencia, conocimiento e intuición de los acuicultores. Sin embargo, el tener registros constantes de la calidad del agua permitiría a los criadores notar cambios repentinos y tomar decisiones de manera rápida para que las acciones correctivas se puedan realizar a tiempo.

Existen propuestas tecnológicas para el monitoreo de la calidad del agua en el mercado, sin embargo, estas pueden llegar a ser muy costosas o están diseñadas específicamente para las regiones donde se implementan.

El sector acuícola, en México, ha quedado rezagado en cuanto a la adopción de sistemas para el monitoreo de sus cultivos, provocando que la producción que se obtenga sea menor a la que se genera con la pesca, la cual generalmente no es autosustentable. Por ello en esta tesis se busca desarrollar un prototipo de sistema de recolección de datos para el monitoreo remoto de la calidad del agua, que sea autosustentable, de bajo costo y esté caracterizado bajo las condiciones de producción que se utilizan en México.

## 1.2. Hipótesis

El uso de la tecnología *LoRaWAN* permite que la comunicación en tiempo real se pueda llevar a cabo, ya que es un protocolo de largo alcance, bajo consumo de energía y bajas velocidades de datos, lo cual es perfecto para aplicaciones de *IoT*.

El dispositivo puede ser autosustentable, debido a que su sistema de alimentación se basará en un modelo híbrido basado en baterías y paneles solares, lo cual garantizará la disponibilidad de energía en cualquier momento gracias a la batería y la producción de esta durante el día por medio de los paneles solares. Además de que en interiores donde no se tenga acceso a luz del sol, se podrá conectar el dispositivo a una toma de corriente.

El contar con un sistema para la recolección, lectura y análisis de datos, en el proceso de crianza y cultivo de especies acuáticas, permitirá mejorar la toma de decisiones por medio de los parámetros recolectados. Además, se cuenta con el tiempo suficiente para actuar y evitar que la producción sufra algún daño, también se contará con datos actualizados constantemente las 24 horas del día.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un prototipo de un sistema de recolección de datos para el monitoreo remoto de la calidad del agua en ambientes de acuicultura.

### 1.3.2. Objetivos particulares

- Configurar el *stack* de servidores, que componen a la aplicación de código abierto ChirpStack, para el despliegue de una *LPWAN* con *LoRaWAN*.
- Desarrollar un protocolo de comunicaciones para la transmisión y recepción de datos entre el dispositivo *IoT* y el *gateway*.
- Programar el microcontrolador para la recolección y el envío de información.
- Almacenar en una base de datos la información recibida en el *gateway*.
- Crear un sistema de alertas para los valores de sensado fuera del rango permitido.
- Implementar un sistema de alimentación híbrido que permita la sustentabilidad del equipo *IoT*.

- Diseñar y construir una interfaz de usuario para el despliegue de los datos y la configuración remota de los dispositivos.
- Diseñar y construir la estructura del prototipo donde se alojarán los sensores.
- Caracterizar el comportamiento del prototipo del sistema en agua dulce y agua marina.
- Probar la autonomía energética del prototipo del sistema en ambientes de acuicultura a la intemperie.
- Probar y caracterizar el prototipo en cultivos experimentales de camarón, abulón, lobina rayada, carpas koi y almejas pismo.

## 1.4. Metodología

El proceso para el diseño y la implementación del prototipo de sistema de monitoreo de calidad del agua se puede separar en tres etapas.

Primero se llevó a cabo la investigación y cotización de los diferentes sensores disponibles en el mercado para la medición de parámetros del agua, además de la selección del *gateway* y el microprocesador. Posteriormente, se realizó la investigación sobre la técnica de modulación *Long Range (LoRa)* y sus propiedades, además de estudiar el protocolo de comunicación *Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)* y como se realiza la implementación de dicho protocolo en la aplicación de código abierto *ChirpStack*.

En la siguiente etapa se llevó a cabo la instalación y configuración de cada uno de los servidores, que componen el *stack* de la aplicación *ChirpStack*, en una Raspberry Pi 3 modelo B+. Y se configuraron el microprocesador, basado en LoRaWAN, y el *gateway* del mismo protocolo, para que se pudieran comunicar a través de los servidores de ChirpStack. Una vez terminado lo anterior, se realizó un *script* para que el microcontrolador se encargara del control y la recolección de datos por parte de los sensores, además del diseño y la implementación del protocolo de comunicaciones a través del cual se transmite la información entre el microprocesador y el *gateway*. Consecuentemente, se realizó un programa para que el gateway procesara, almacenara y alertara sobre alguna irregularidad encontrada en la información recibida por parte del *end device* y también se diseñó una interfaz web a través de la cual el usuario final puede consultar la información en tiempo real, además de poder configurar remotamente el *end device*.

En la última etapa, se caracterizó el consumo energético por parte del *end device* y se diseñó e implementó un sistema híbrido de alimentación que se encargue de dar energía al sistema. Después, se llevó a cabo el modelado y construcción del *case* en el que alojarían los sensores y el microprocesador (*end device*), encargados de recolectar los parámetros de la calidad del agua. Por último, se caracterizó el sistema completo a partir de las condiciones en las que usualmente se trabaja en ambientes acuícolas, para al final probar su desempeño frente a varios cultivos experimentales.

## 1.5. Contribución

Diseñar y construir un prototipo, al igual que implementar un sistema de comunicaciones para el sensado, recolección, análisis y monitoreo de parámetros de la calidad del agua, además de desarrollar una interfaz de usuario que permita la configuración remota del prototipo y muestre los datos recolectados en tiempo real.

Con esta herramienta los acuicultores podrán realizar un monitoreo constante de la calidad del agua de sus cultivos, y al ser un sistema equipado con alertas, cuando una irregularidad se presente en sus granjas, estos serán advertidos inmediatamente para que puedan realizar las operaciones correctivas adecuadas.

Gracias al sistema, los acuicultores podrán contar con un conjunto de datos mucho más grande con el cual podrán realizar mejores análisis de sus criaderos. Y aunado a esto, ya no tendrán que preocuparse por dejar sin supervisión sus cultivos durante la noche, ya que el

prototipo puede ser alimentado por baterías o por medio de una toma de corriente durante este periodo.

## **1.6. Descripción del contenido**

Este trabajo de tesis se estructura de la siguiente forma:

- En el capítulo 2, se brinda una definición sobre IoT y la calidad del agua, además de presentar trabajos relacionados con esta tesis.
- El capítulo 3, está conformado por una descripción en general de las tecnologías utilizadas para el desarrollo del prototipo de monitoreo de la calidad del agua.
- El capítulo 4, muestra el desarrollo del proceso de construcción que se llevo a cabo para llegar al producto final.
- El capítulo 5, presenta los experimentos propuestos y los resultados obtenidos, además de la explicación detallada de cada uno de estos.
- El capítulo 6, está conformado por las conclusiones, la verificación de la hipótesis y el trabajo futuro.

## Capítulo 2

# IoT en acuicultura

Actividades como la pesca y la acuicultura se han quedado rezagadas en la implementación de sistemas de monitoreo y recolección de datos eficientes, ya que hoy en día la tecnología ha evolucionado y ha hecho grandes avances en otras áreas como la agricultura, el sector de la salud, entre otras. Sin embargo, actualmente se han considerado las oportunidades que podrían brindar los sistemas basados en la nube, las cámaras y los sensores, el Internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en actividades como la generación e interpretación de datos. Además de la automatización de los procesos para ayudar a mejorar la sostenibilidad de la pesca y la acuicultura. La supervisión continua de los indicadores físicos, químicos y biológicos del agua, ayuda no solo a anticipar y controlar los problemas que se presenten en la acuicultura, sino que además se pueden prevenir daños ambientales y la pérdida de la producción.

### 2.1. Internet of Things

A través de tecnologías como la nube, la niebla, el *big data*, entre otras, los objetos pueden compartir y obtener datos con la mínima intervención humana. Lo cual es posible gracias a la integración de dispositivos informáticos en todo tipo de artículos.

El Internet de las cosas (*IoT*), por sus siglas en inglés, ha tomado gran importancia en los últimos años, ya que es un término que se relaciona con la conexión de elementos físicos cotidianos a una red (ya sea privada o pública como es Internet). Si se desglosa dicho término, se tiene el concepto de Internet, el cual alude a una red de computadoras conectadas a nivel mundial o mejor conocida como la red de redes a través de la cual los equipos de cómputo están interconectados [15]. Por otra parte, la palabra “cosas” hace referencia a dispositivos que van desde objetos domésticos habituales hasta herramientas industriales avanzadas. *Internet of things* también hace referencia a la red que conecta dispositivos, personas e incluso animales a través de tecnologías como la nube.

Los nodos *IoT* o dispositivos inteligentes son objetos que cuentan con sensores, circuitos integrados y conectividad que les permite recolectar e intercambiar información entre ellos o con otros dispositivos a través de Internet [16]. Estos dispositivos deben de ser capaces de monitorear el entorno que los rodea a través de los distintos sensores que los integran. También pueden tomar decisiones de manera óptima, considerando los parámetros que analizan. Un ejemplo de esto sería un refrigerador inteligente, que pueda estar al tanto de los alimentos que se tienen en su interior y que cuando algún producto se termine, pueda realizar la compra de este por medio de Internet.

En 1982 surge el primer dispositivo conectado de la historia, el cual se trataba de una máquina expendedora. A través de la cual, sus creadores podían conectarse de manera remota para verificar la existencia de botellas en su interior, además de recibir información sobre la temperatura de los refrescos [17]. Si bien, esta idea no tuvo una gran repercusión, fue un gran ejemplo del potencial que tenía el *IoT*.

El *IoT* ha proporcionado numerosos beneficios como las mencionadas en [18] los cuales

incluyen la recopilación de información precisa y en tiempo real del proceso que se esté monitoreando, la generación de gran cantidad de información que permita el mantenimiento predictivo, la reducción de costos debido a la comprensión de las ineficiencias operativas, la mejora de la efectividad de los servicios debido a la detección temprana de anomalías, entre otros.

El IoT tiene una amplia variedad de aplicaciones, tal que puede implementarse prácticamente en cualquier área. Cuenta con la capacidad de conectar sistemas embebidos, los cuales podrían recolectar información en diferentes entornos como en fábricas, en granjas, en el hogar, etcétera.

Las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN), por sus siglas en inglés, cuentan con un gran potencial para el desarrollo de aplicaciones IoT. Sin embargo, para seleccionar la tecnología idónea se tiene que realizar un estudio riguroso, ya que cada tecnología LPWAN tiene ciertas características, capacidades y limitaciones. Para seleccionar la tecnología se tienen que tomar consideraciones como la eficiencia energética de la transmisión inalámbrica, la escalabilidad de la red, la confiabilidad de la transmisión de datos, la baja latencia y el alcance de la transmisión. En especial, cuando se quieren transmitir pequeños paquetes de datos a través de largas distancias, utilizando baterías como fuente de poder.

Existen diferentes formas de comunicación entre dispositivos IoT, sin embargo los más comunes son *Device-to-Device*, *Device-to-Cloud* y *Device-to-Gateway* [19].

En el modelo *Device-to-Device* la comunicación se da entre dos o más dispositivos que se pueden conectar directamente y comunicarse entre sí, sin la necesidad de un intermediario, a través redes IP o Internet y pueden usar protocolos como *Bluetooth*. En la comunicación *Device-to-Cloud* los dispositivos se conectan a un servicio de Internet en la nube a través de conexiones *Wi-Fi* y la red IP para intercambiar datos y controlar el tráfico de datos. En el modelo *Device-to-Gateway* el nodo IoT se conecta a un servicio en la nube a través de un *gateway* local, el cual proporciona seguridad y otras funciones.

### 2.1.1. Tecnología de comunicación para IoT

La creación de tecnologías de comunicación entre dispositivos (máquina a máquina o *M2M*) han permitido el desarrollo de redes autónomas sin la intervención de un ser humano. Dichas tecnologías son de vital importancia en la implementación de una red de comunicación inalámbrica, ya que permiten automatizar los procesos sin la necesidad de la intervención humana. Esto debido a que los dispositivos pueden comunicarse entre ellos.

Hoy en día, existen una basta cantidad de tecnologías de comunicación para cumplir con los requerimientos de una red *Low Power Wide Area Network (LPWAN)*. Entre las más populares se pueden citar *Narrow Band Internet of Things (NB-IoT)*, *ZigBee* y *LoRa*, entre otras. A continuación se presentará una breve descripción de algunas de estas tecnologías.

#### 2.1.1.1. SigFox

SigFox [20] es una tecnología de banda ultra estrecha (*UNB*), la cual opera en la banda ISM y emplea la modulación BPSK. Esta tecnología es adecuada para transmitir paquetes de datos pequeños de entre 8 a 12 *bytes*, cuenta con un ancho de banda de alrededor de 100[Hz] y una tasa de transmisión de 100[bps]. Éstas características permiten que SigFox logre una cobertura de área amplia con bajo consumo energético.

Su área de cobertura teórica es de entre 30 y 50 kilómetros en entornos rurales y soporta hasta un millón de dispositivos conectados a un *gateway*. Debido a la regulación, el número de mensajes diarios que puede transmitir un dispositivo está limitado a 140.

#### 2.1.1.2. LoRaWAN

LoRaWAN [21], al igual que SigFox, opera en la banda ISM, además utiliza la tecnología Chirp Spread Spectrum (CSS) para la modulación de sus señales. Los dispositivos que utilizan esta tecnología no se asocian a ninguna puerta de enlace o *gateway*, dicha acción la realiza el *LoRa Network Server*, lo que significa menor procesamiento para los dispositivos finales.

LoRaWAN utiliza Spreading Factor (SF), para poder realizar un equilibrio entre el alcance de la señal y el ancho de banda que utiliza. Dependiendo del SF que se utilice, la tasa de datos puede variar entre los  $300[bps]$  y los  $50[kbps]$ , esto significa que cuanto más cerca esté un dispositivo de una puerta de enlace, mayor será la tasa de transmisión. LoRaWAN tiene permitido un tiempo total de transmisión de 36 segundos por cada hora. Finalmente, tiene una rango de cobertura teórico de más de 15 kilómetros en entornos rurales y una capacidad de hasta un millón de nodos.

#### 2.1.1.3. NB-IoT

Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) [22] es una tecnología celular, ya que hace uso de una ampliación de la red LTE estándar, pero con un ancho de banda limitado de  $200[kHz]$ . NB-IoT coexiste junto a la tecnología LTE, por lo que no requiere de modificaciones en la estructura de la red celular.

Usa la modulación OFDM para redes con baja densidad de dispositivos y en caso contrario, utiliza SC-FDMA. Las zonas celulares que proporcionan conectividad NB-IoT pueden soportar hasta 10000 conexiones. La transferencia de datos de esta tecnología es de aproximadamente  $250[kbps]$ .

#### 2.1.1.4. ZigBee

ZigBee se basa en el estándar IEEE 802.15.4 y trabaja en la banda ISM. Tiene una rango de cobertura teórico de más de 15 kilómetros en entornos rurales, sin embargo, utilizando la técnica de multisalto puede alcanzar  $60[km]$  o más. Esta tecnología tolera un máximo de 65000 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos y dispone de una tasa de transferencia de  $250[kbps]$ . Esta tecnología cuenta con soporte para múltiples topologías de red como punto a punto, punto a multipunto y redes de malla.

### 2.1.2. Comparación del desempeño de distintas tecnologías de comunicación

En [23] se realiza un estudio comparativo entre tecnologías LPWAN, en términos de costo. Se plantearon 8 escenarios de simulación para realizar un análisis, evaluando *SigFox*, LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M y EC-GSM. Para cada escenario se consideraron tres aspectos, el primero era definir si el entorno era rural o urbano, en el segundo se consideró si el lugar era *brownfield* (terreno en el que existen construcciones) o *greenfield* (terreno sin construcciones previas), y por último, si la densidad de dispositivos era baja o alta.

En este artículo se concluyó que LoRaWAN es rentable en escenarios donde la densidad de dispositivos es baja. En caso contrario, en donde la densidad de dispositivos es alta, las tecnologías que más destacaron en zonas urbanas fueron NB-IoT y LTE-M, debido a su rentabilidad. Además, en lugares rurales con una densidad alta de dispositivos, EC-GSM destacó frente a las otras tecnologías.

En [24] se realizó un estudio comparativo de las tecnologías LoRaWAN, *Symphony Link*, MoT, *SigFox* e *Ingenu* RPMA, las cuales trabajan sobre la banda ISM. En esta investigación se concluyó que el alcance de LoRa, *SigFox* e *Ingenu* RPMA en entornos urbanos es similar. Sin embargo, se defiende la postura acerca de que LoRaWAN es la mejor opción para el despliegue en una ciudad inteligente o en áreas urbanas debido a su bajo costo de implementación. En entornos industriales, debido a que se debe tener un mayor control de la red, se recomienda tener una implementación de red privada. Para aplicaciones donde se gestionen volúmenes bajos de datos y adquisición de baja frecuencia, con LoRaWAN o *SigFox* es más que suficiente. Mientras que para aplicaciones de adquisición de datos en tiempo real, destacan *Symphony Link* e *Ingenu*.

En [25] se tratan de encontrar tecnologías de comunicación inalámbrica adecuadas para la agricultura de precisión a través del análisis de escenarios agrícolas y pruebas experimentales. En este caso de estudio se comparan las tecnologías NB-IoT, *ZigBee* y LoRaWAN. Los resultados de este artículo muestran que *ZigBee* cuenta con una cobertura limitada por lo que

es buena opción para implementarse en invernaderos, donde no se necesita de gran alcance para la transferencia de la información. Por otro lado, si se necesita una cobertura superior a  $5[km]$ , tanto NB-IoT, como LoRaWAN, son buenas opciones, ya que ofrecen un rango de cobertura de más de  $15[km]$  y cuentan con un bajo consumo energético. Sin embargo, el principal problema con la tecnología NB-IoT es su costo, ya que se debe de contar con una suscripción mensual, mientras que el principal problema con LoRaWAN son los costos de mantenimiento de los equipos involucrados en el proceso.

## 2.2. Acuicultura

La acuicultura implica un conjunto de actividades, conocimientos y técnicas para la crianza de plantas o animales acuáticos de agua dulce o salada [26]. Existen diferentes sistemas de cultivo y estos se clasifican según el tipo de producción, el grado de manejo y la tecnología utilizada. Los sistemas extensivos son de bajo costo operacional, de bajas densidades de siembra y los organismos se alimentan del entorno. Estos sistemas son cultivos no controlados, por lo que dependen de las variaciones climáticas y no se regula la calidad del agua. En un sistema semi-extensivo se utiliza una densidad de siembra moderada, se ocupan fertilizantes y se puede emplear alimento de forma complementaria al existente en el cuerpo de agua. En este sistema existe un mayor control sobre la población de organismos y la calidad del agua, en comparación con los cultivos extensivos. Los cultivos intensivos necesitan mayor control y cuidado, por lo que su implementación requiere mayor uso de tecnologías. Se siembra una alta densidad de organismos con el fin de alcanzar una alta producción. Se emplean alimentos especializados para cada especie, la calidad del agua se monitorea constantemente, además de que al tanque se le añaden actuadores como sistemas de aireación artificial y se renueva constantemente el agua del cultivo.

En esta actividad se pueden implementar policultivos, los cuales consisten en tener un cultivo de distintas especies en un mismo tanque. Para esto se requiere seleccionar detenidamente las especies, a fin de que cada una ocupe un nicho ecológico diferente y evitar que compitan entre ellas. Con esta acción se aprovecha todo el volumen de agua disponible y el cultivo puede ser altamente productivo y rentable [11].

### 2.2.1. Modalidades de acuicultura

#### 2.2.1.1. Acuicultura continental

De acuerdo con la FAO, la acuicultura continental es aquella que se realiza en tierra firme utilizando estanques de tierra, canales, tanques sobre el suelo, corrales y jaulas, si las condiciones locales lo permiten. Esta modalidad tiene una gran producción de animales de cultivo, en especial de agua dulce, por esta razón también se le denomina como acuicultura de agua dulce. Sin embargo, en algunos países también se realizan cosechas con aguas salinas y alcalinas, dependiendo de la especie que se cultive.

#### 2.2.1.2. Acuicultura costera y maricultura

La acuicultura costera, se lleva a cabo en estructuras artificiales en zonas cercanas al mar, por ejemplo, en estanques costeros y lagunas cerradas. En esta actividad destacan el cultivo de especies como crustáceos, peces de aleta, moluscos y algas marinas. Los acuicultores que utilizan la zona costera, deben tener especial cuidado con la salinidad del agua, porque esta es menos estable que en la maricultura, debido a las precipitaciones y la evaporación. El término acuicultura marina hace referencia a la crianza de especies acuáticas dentro del mar a través de instalaciones como bateas, estanques, tanques o viveros marinos. De acuerdo con la FAO, los países suelen combinar la producción de la acuicultura costera y la maricultura cuando presentan datos estadísticos.

### 2.2.2. Calidad del agua

La calidad del agua incorpora todas las variables físicas, químicas y biológicas que tienen impacto en la producción de especies acuáticas. Un entorno acuático es un sistema complejo que consta de varias variables de la calidad del agua. Sin embargo, son los parámetros de temperatura, sólidos en suspensión, el pH, el oxígeno disuelto, el amoníaco, el nitrito, el  $CO_2$  y la alcalinidad, los que desempeñan un papel fundamental. Esto debido a que cada parámetro individualmente es importante, pero es su interacción la que influye en la salud y tasa de crecimiento de los organismos. Un ejemplo de lo anterior, sería cuando se presenta un problema de aireación y desgasificación, ya que el nivel de  $CO_2$  incrementa, mientras el de oxígeno disuelto disminuye. Esto provoca que los organismos tengan menos oxígeno disponible, además de decrementar su capacidad de aprovechar el oxígeno, ya que las altas concentraciones de dióxido de carbono en el agua afectan la capacidad de la sangre de los organismos para transportar oxígeno.

Es difícil poder estandarizar los parámetros de la calidad del agua puesto que la amplia variedad de especies, los regímenes de temperatura y las técnicas de producción hacen que cualquier estándar se tome como una lista de recomendaciones. El éxito de las operaciones acuícolas depende de disponer de un entorno óptimo para un rápido desarrollo de las especies a un bajo costo. Al igual que mantener la calidad del agua dentro de los límites de tolerancia de la especie que se cultive. La información de esta subsección se puede consultar a profundidad en [11] y [27].

### 2.2.3. Parámetros de la calidad del agua

En esta sección se profundizará en la descripción de los parámetros de la calidad del agua en específico se consideran el oxígeno disuelto, la temperatura, el pH y los TDS.

#### 2.2.3.1. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es la variable más importante y crítica de la calidad del agua, debido a que requiere una supervisión continua en los sistemas de producción intensiva. Es importante mencionar que este parámetro es de muchas formas el mejor indicador del estado en general del cultivo. La concentración de oxígeno disuelto en el agua aumenta cuando la temperatura del líquido es baja. No obstante, si la temperatura aumenta, la capacidad de retención del líquido disminuye. Es por esta razón, que es común tener problemas con la concentración de oxígeno disuelto durante las épocas más calurosas del año.

Un problema que se presenta con la solubilidad del oxígeno disuelto, es que el metabolismo de los organismos tiene mejor rendimiento en temperaturas cálidas. Lo que ocasiona que a temperaturas bajas los organismos gasten mayor energía tratando de asimilar el oxígeno de su entorno.

Los factores que influyen directamente en la concentración de oxígeno disuelto son la temperatura, la salinidad, la presión barométrica y la altitud. La solubilidad del oxígeno disuelto disminuye cuando baja la presión atmosférica y esto ocurre en alturas mayores al nivel del mar. El oxígeno se mantiene disuelto en el agua debido a la presión que ejerce la atmósfera y el mismo aire, pero en mayor altitud, hay menor presión atmosférica, por lo que existe una menor fuerza que mantenga el gas en el agua. En el caso de la salinidad, la alta concentración de este parámetro implica la existencia de moléculas de sal en el agua, ocupando sitios que bien podrían ser ocupados por moléculas de oxígeno. Es por esto que el agua de mar cuenta con menor capacidad para mantener el oxígeno disuelto, a comparación del agua dulce.

Es difícil establecer una concentración adecuada de oxígeno disuelto para el éxito del cultivo. Sin embargo, se ha notado que los peces de aguas cálidas tienen mejor salud, en general, cuando la concentración de oxígeno en el agua está por encima de los  $5[mg/L]$ . Cabe destacar, que saturar el agua con oxígeno no implica algún beneficio extra para la especie que se cultive.

### 2.2.3.2. Temperatura

La temperatura es la medición de la cantidad de energía con la que cuentan las partículas de cualquier sustancia. Se podría posicionar a este parámetro en el segundo lugar de importancia después del oxígeno disuelto. Este parámetro se ve involucrado en los procesos fisiológicos de los organismos como la tasa de respiración, la alimentación, el crecimiento, el comportamiento y la reproducción.

Los peces se pueden clasificar según su preferencia hacia la temperatura como: de agua fría, agua templada y agua cálida. Las especies de agua fría optan por temperaturas menores a  $15^{\circ}\text{C}$ , las de agua templada entre  $15^{\circ}\text{C}$  y  $20^{\circ}\text{C}$ , y por último, las de aguas cálidas prefieren temperaturas por encima de los  $20^{\circ}\text{C}$ . Los peces son organismos de sangre fría, por lo que su temperatura se ve regulada por el entorno que los rodea. Por lo tanto, cada especie cuenta con un rango de temperatura que es adecuado para su desarrollo y supervivencia. Un ejemplo de esto es la lobina rayada, cuyo rango óptimo de temperatura es de entre  $13^{\circ}\text{C}$  y  $24^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.3.3. pH

El *Potential of Hydrogen (pH)* es la representación de la concentración de iones de hidrógeno en el agua. La escala de pH va de 0 a 14, donde el valor de 7 es considerado como neutro. Los valores menores al pH neutro indican una concentración elevada de protones o que se trata de una sustancia ácida. Mientras que los valores por encima del pH neutro señalan una baja concentración de protones o que se trata de una sustancia básica.

El pH óptimo para el correcto desarrollo de los organismos acuáticos de agua dulce se encuentra en el rango de 6.5 a 9. Esta variable en entornos acuáticos se ve mayormente afectado por el dióxido de carbono, ya que este gas acidifica el agua. La exposición a valores de pH fuera del rango óptimo puede ser muy estresante o mortal para los organismos.

### 2.2.3.4. Sólidos: sedimentales, suspendidos y disueltos

Los sólidos que se juntan en un sistema acuícola, por lo general son causados por alimentos sin consumirse, desechos orgánicos de los peces, algas y bacterias vivas o muertas. Los sólidos se pueden clasificar con base en su tamaño. Los sólidos disueltos son aquellos que miden menos de  $0.001[\mu\text{m}]$ , los sólidos coloidales se encuentran en un rango de  $0.001[\mu\text{m}]$  a  $1[\mu\text{m}]$ , los sólidos supra-coloidales o partículas finas miden entre  $1[\mu\text{m}]$  a  $100[\mu\text{m}]$ , y por último, el tamaño de los sólidos sedimentales es mayor a  $100[\mu\text{m}]$ .

Los sólidos sedimentales son aquellos sólidos que tardan en sedimentarse en el fondo del tanque en menos de una hora. Los sólidos suspendidos no se sedimentan por lo que permanecen flotando. Los sólidos disueltos o finos son aquellos que no se alcanzan a percibir a simple vista.

Es importante retirar este tipo de sólidos de los sistemas acuícolas ya que influyen en la eficiencia de todos los demás procesos unitarios. Además, son una fuente importante de consumo de oxígeno y pueden afectar la salud de los peces al dañar sus branquias, además de que pueden albergar patógenos. Se recomienda contar con una concentración de TDS menor a los  $400[\text{ppm}]$  en los sistemas acuícolas, sin embargo, este parámetro depende de la especie que se cultive.

## 2.3. Estado del arte

Los sistemas de monitoreo y valoración son herramientas de administración encargadas de proporcionar información sobre el desempeño de algún proceso para mejorar la toma de decisiones. En actividades relacionadas con el ambiente marino se han desarrollado diferentes sistemas de monitoreo como los que se presentan en los dos siguientes artículos publicados en 2019. Donde se plantean soluciones tecnológicas a problemas identificados en zonas dentro del mar relacionados con el despliegue y observación de boyas.

En [14] se desarrolló un sistema encargado de cuidar los dispositivos de observación desplegados frente a la costa Irlandesa, los cuales incluyen boyas de datos meteorológicos y de

olas, mareógrafos, entre otros. En dicho trabajo, se presenta un sistema de monitoreo de energía fotovoltaica de bajo costo adecuado para su despliegue en una boya o plataforma remota. El propósito de este dispositivo es solucionar inconvenientes remotamente, identificar posibles problemas potenciales y determinar si algún equipo requiere servicio o ser recuperado. Análogamente, en [28] se presenta el diseño y la realización de una boya marina que tiene un bajo consumo de energía, adquisición de alta precisión, alta capacidad de almacenamiento y rápida transmisión de datos. La cual puede aplicarse a la tomografía acústica oceánica, el monitoreo marino y otros campos.

En actividades que involucran granjas marinas en altamar, en países Europeos se ha utilizado ampliamente la tecnología LoRaWAN debido a su bajo costo y bajo consumo energético, además de su largo alcance. En [29] se construyó un sistema de monitoreo en tiempo real en el cual se diseñaron nodos fijos instalados en boyas marinas para supervisar los parámetros de la calidad del agua y nodos móviles adaptados a equipos ROUV cuya misión era evaluar el estado de las jaulas marinas. En tierra se tenían dos *gateways* sobre un montículo de tierra de 6 metros de altura. Cada puerta de enlace contaba con una antena helicoidal direccional con ganancia de  $14[dBi]$  y cada antena estaba sobre un poste de una altura de  $7.2[m]$ . En este trabajo se realizaron 4 pruebas de conectividad en las que se utilizó el SF7 el cual, teóricamente, presenta los peores rendimientos en enlaces de larga distancia en el protocolo LoRaWAN.

Para cada prueba se transmitieron 50 paquetes y se varió la altura de las antenas de los *gateways*. En la primera prueba se posicionaron a  $13.20[m]$  sobre el nivel del mar, en la segunda a  $9.95[m]$  y en las últimas dos a  $8.30[m]$ , sin embargo, en el cuarto experimento se giró la antena  $180^\circ$ . Con las primeras tres configuraciones se obtuvo más del 85 % de paquetes recibidos correctamente y en la cuarta configuración se recibieron el 50 % de los paquetes exitosamente. Es importante mencionar que en el peor escenario se logró un alcance de  $8.33[km]$ .

De forma similar, en [30] se diseñó un dispositivo denominado *LoRA Additional Module (LAM)*, el cual ofrece soporte de radio LoRa a receptores acústicos submarinos. Este dispositivo se probó en una piscifactoría comercial de peces marinos en Noruega con el objetivo de estudiar la viabilidad de utilizar LoRa para el monitoreo de peces en tiempo real en sitios de acuicultura marina. El escenario montado para el experimento consistió en instalar tres nodos en dos jaulas para peces a una distancia de  $423.3[m]$ ,  $444.5[m]$  y  $143.9[m]$ , respectivamente. Los nodos contaban con una antena de  $0.8[m]$  de altura. Se configuró un cuarto nodo a una distancia de  $2470[m]$  con una antena de  $2[m]$  de altura.

Cada nodo transmitía un paquete por minuto. El *gateway* contaba con una antena de  $10[m]$  para asegurar la línea de vista directa. En los resultados se encontró que durante 14 días, los primeros 3 nodos obtuvieron una recepción exitosa de más del 98 % de los paquetes y en el caso del cuarto nodo, que era el que más alejado se encontraba del *gateway*, registró un total de 92.8 % de transmisiones con éxito. Este experimento demostró que la tecnología LoRa es viable en actividades de acuicultura marina.

En el área de la acuicultura continental, también se han desarrollado trabajos relacionados con el monitoreo de la calidad del agua. Por ejemplo, en el trabajo de tesis realizado en [31] en 2019 se muestra el desarrollo y diseño de un prototipo de dispositivo IoT que recolecta parámetros del agua y, dependiendo del análisis de los datos, realiza la activación de un dispersor de alimento para mejorar su distribución. El dispositivo se desarrolló en Ecuador y se puso a prueba en un granja de camarones, en la cual se mejoró el aprovechamiento del alimento y el crecimiento de los cultivos. En la tesis realizada en [32] en la universidad politecnica salesiana en Ecuador en 2015, se diseñó un prototipo con el propósito de mejorar el proceso de muestreo de la calidad del agua de las estaciones acuícolas. En el prototipo, la recolección de datos se realizó cada cinco minutos y a partir de las variables monitoreadas se controló la activación una bomba de oxigenación y un servomotor para la alimentación de los peces. En este caso el prototipo se probó en una pecera, que simulaba un acuario, durante 30 días, en los cuales la recolección de datos fue exitosa. Por último, en [12] se presenta un proyecto realizado por las organizaciones *Cooke Aquaculture* e *InnovaSea* en 2019, en el cual se realizó la implementación de cientos de sensores acústicos en varias piscifactorías de Canadá. En dicho trabajo, se tomaron 100000 mediciones diariamente y con los datos recopilados se realizó un análisis a través de modelos mecánicos y de aprendizaje

automático. Lo anterior para poder predecir la salud, la biomasa y la mortalidad de los peces en función de la información sobre la alimentación y los factores ambientales estresantes. También se utilizó para informar sobre brotes de infecciones parasitarias, para pronosticar las condiciones oceanográficas con varios días de anticipación y para el crecimiento de peces individuales basado en el régimen de alimentación y las condiciones ambientales.

En la mayoría de los trabajos presentados, los parámetros seleccionados para evaluar la calidad del agua fueron la temperatura, el oxígeno disuelto y el pH. Sin embargo, en [29] también se consideró la salinidad del agua y la turbidez. Asimismo, en [12] se monitorearon la inclinación, la salinidad, las algas verdeazuladas, la clorofila y la turbidez, con el fin de obtener más indicadores que les permitieran comprender cualquier anomalía que se presente en sus experimentos.

Con respecto a la recolección de datos y el control de los sensores, [31] y [32] coinciden en el uso de Arduino Mega debido a su facilidad de programación y una considerable documentación. Por otra parte, en [28], [30] y [29] se optó por diseñar su sistema de recolección basado en los chips *STM32F103RET6*, *EFM32GG842 ARM Cortex M3* y *B-L072Z-LRWAN1*, respectivamente. Esto debido a que su diseño considera todos los componentes que necesitan y pueden adaptarlo según sus necesidades. Cabe mencionar que el chip utilizado en [29] también es el encargado de la transmisión de los datos, debido a que tiene soporte para la tecnología LoRaWAN.

Considerando la tecnología de comunicación para la transmisión de datos, en [30] se utilizó la modulación LoRa a través del módulo *RFM95W*. En el caso de [31], la transmisión de datos se realizó mediante el módulo *Wifi NodeMCU*, el cual era efectivo ya que transmitía a grandes velocidades, pero requería de tener conexión a Internet. En [32] se optó por conectar un *shield* GSM a la placa Arduino, sin embargo era necesario implementar el dispositivo en una zona donde hubiera conectividad celular. Caso contrario a [28] que utilizó dos tecnologías de comunicación (Narrow Band Internet of Things (NB-IoT), en ambientes donde existiera señal celular móvil y de lo contrario se utilizó un módulo *ZigBee*).

En los trabajos [32], [29] y [30] se construyó una interfaz de usuario utilizando herramientas como PHP y *MATLAB*. Para poder diseñar y configurar todo lo necesario que llegase a requerir el usuario final al interactuar con el sistema. Por el contrario, en [31] y [12] se hizo uso de plataformas ya creadas y orientadas a actividades como IoT. Las plataformas utilizadas fueron *Thingier.io* y *Physical Analytics Integrated Repository and Services (PAIRS)*, respectivamente. Una desventaja con dichas plataformas es que el sistema se tiene que adaptar a las capacidades que puedan brindar.

Por último, la forma de alimentación más popular entre los trabajos fue por medio de baterías, lo cual a largo plazo es ineficiente, ya que se tienen que remplazar cada que se les termine la energía. Un ejemplo de esto se da en [30], ya que su dispositivo LAM con una batería de 35[Ah] funciona durante aproximadamente dos meses. En [32], la alimentación del equipo se realizó por medio de una toma de corriente, lo cual garantizaba que el equipo no se quedara sin energía para poder seguir trabajando, pero reducía su capacidad para ser implementado en lugares donde no se tuviera acceso a una toma de corriente.

# Capítulo 3

## Marco teórico

### 3.1. LoRa

Long Range (LoRa) es una tecnología de modulación de radiofrecuencia para redes LPWAN, su nombre hace referencia a los enlaces de datos de largo alcance que ofrece dicha tecnología. Debido a su naturaleza, no se puede transmitir audio o vídeo a través de ella, únicamente pequeños paquetes de información, como datos recabados por sensores [33]. LoRa se basa en la modulación *Chirp Spread Spectrum (CSS)*, la cual cuenta con la ventaja de baja potencia, al igual que la modulación *Frequency Shifting Keying (FSK)*, sin embargo, mejora el rango de comunicación.

Las propiedades que hacen que destaque LoRa, sobre otras tecnologías de comunicación son su largo alcance y su bajo consumo energético al transmitir. En la tabla 3.1 se muestran las distancias de transmisión de datos que soporta la tecnología en diferentes entornos. Teóricamente, el alcance en exteriores de esta tecnología depende del ambiente en el que operen los equipos de transmisión y recepción. Su cobertura en interiores depende del material del edificio en donde se utilice.

Ambiente	Rango de alcance [km]
Áreas urbanas	2 - 5
Áreas rurales	5 - 15
Línea de vista directa	>15

Tabla 3.1: Alcance de la tecnología LoRa en distintos entornos.

#### 3.1.1. Regulaciones

LoRa opera en la banda de radio sin licencia *Industrial Scientific and Medical (ISM)*, disponible en todo el mundo. En la tabla 3.2, se muestran las bandas de frecuencia asignadas a la banda ISM en las regiones del planeta. En México se utiliza la banda asignada para los Estados Unidos. Las ventajas de utilizar la banda ISM es que es de uso libre, ya que no requiere de alguna licencia, por otro lado, las desventajas son las bajas tasas de transmisión y la interferencia que se puede generar entre dispositivos. El uso de la banda ISM está sujeto a limitaciones como que la potencia de salida (EIRP) del transmisor no debe de ser mayor a los  $14[dBm]$  o  $25[mW]$  entre otras impuestas por las regiones.

Región	Frecuencia (MHz)
Asia	433
Europa, Rusia, India, África	863 - 870
Estados Unidos	902 - 928
Australia	915 - 928
Canadá	779 - 787
China	779 - 787, 470 - 510

Tabla 3.2: Frecuencias destinadas a la banda ISM en las distintas regiones del mundo.

### 3.1.2. Tasas de datos

Adaptive Data Rate (ADR) es un mecanismo utilizado por LoRa para la optimización de la tasa de datos, el tiempo en aire y el consumo energético de la red. Dicho mecanismo controla parámetros de transmisión como el *Spreading Factor*, el ancho de banda y la potencia de transmisión.

La elección correcta de la tasa de transferencia es un tema que se debe realizar tomando en cuenta el rango de comunicación y la duración del mensaje. Las transmisiones que usan distintas velocidades de datos no interfieren entre sí. LoRa permite velocidades de datos desde los 300[*bps*] hasta los 5[*kbps*] para un ancho de banda de 125 [*kHz*] [34].

El ADR garantiza que los mensajes mandados por los *end devices* sean recibidos por el *gateway*, mientras se optimiza el consumo de energía del dispositivo. Si el ADR se encuentra activado, el *network server* le indicará al nodo final que disminuya su potencia de transmisión o que aumenta la velocidad de datos. Mientras más cercano se encuentre un dispositivo de una puerta de enlace, debe de utilizar un *Spreading Factor* menor y una velocidad de datos más alta. Caso contrario a los dispositivos más alejados, ya que deben de usar un *Spreading Factor* alto porque necesitan un presupuesto de enlace mayor.

Se tiene que considerar que el ADR debe de habilitarse en los *end devices* que tengan condiciones de radiofrecuencia estables, es decir, que se mantengan estáticos. La tabla 3.3 ilustra la velocidad de datos en función de la distancia y el *Spreading Factor (SF)*.

Spreading Factor	Bit Rate [bps]	Range [km]	Time on Air [ms]
SF 7	5470	2	56
SF 8	3125	4	100
SF 9	1760	6	200
SF 10	980	8	370
SF 11	440	11	740
SF 12	290	14	1400

Tabla 3.3: Spreading Factor contra la tasa de datos y el tiempo en aire.

## 3.2. LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de red de área amplia y baja potencia (LPWAN), desarrollado para enlazar de forma inalámbrica dispositivos que utilicen baterías a Internet en redes regionales, nacionales o globales [21].

### 3.2.1. Topología

LoRaWAN implementa una arquitectura de red en una topología de estrella de estrellas, la cual se puede apreciar en la figura 3.1. En la red mencionada, los *gateways* son los encar-

gados de transmitir los mensajes entre los *end-devices* y el *network server*. La comunicación es bidireccional, ya que el *end-device* puede mandar información al *gateway*, que a su vez es transmitida al *network server*, y por último, recibida por el *application server*, pero también es posible seguir el mismo proceso de forma inversa. Esto quiere decir que se pueden enviar datos desde el *application server* al *end device*.

En una red LoRaWAN, ningún dispositivo final está asociado a algún *gateway* en particular. Al contrario, la información transmitida por los nodos es usualmente recibida por más de una puerta de enlace. Cada *gateway* se encarga de mandar la información que recibe al *network server* a través de un *backhaul* (que puede ser celular, Ethernet, satélite o Wi-Fi). El *network server* es el encargado de administrar la red y realiza actividades de control de seguridad, además de filtrar los paquetes que sean redundantes. Después se envían los datos al *application server*, donde el usuario final puede procesar la información.

En caso de que el *application server* tenga que enviar un mensaje a un *end-device*, el *network server* se encarga de seleccionar el mejor *gateway*, para mandar el mensaje al *end-node*. Es importante mencionar, que LoRaWAN no soporta la comunicación entre *end-devices*.

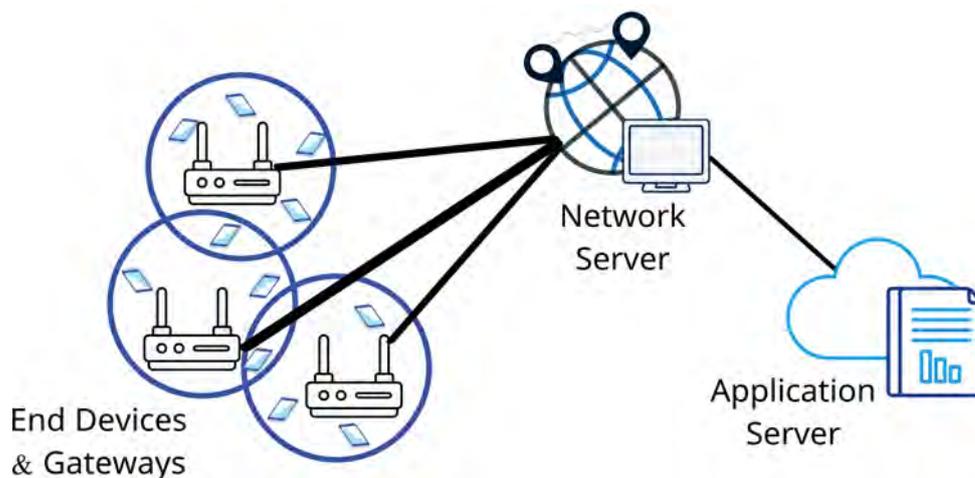


Figura 3.1: Arquitectura de red LoRaWAN.

La arquitectura de red en malla es utilizada por muchas tecnologías existentes, ya que en esta los *end-devices* pueden reenviar información entre ellos para aumentar el rango de comunicación. Si bien esto aumenta el alcance, cuenta con desventajas como el aumento de la complejidad, se reduce la capacidad de la red y se disminuye la vida útil de la batería, debido a que los nodos reciben y transmiten información que es irrelevante para ellos. Es por esto que la arquitectura en estrella es mejor para preservar la vida útil de las baterías cuando se puede obtener una conectividad de largo alcance [35]. En el *stack* del protocolo LoRa (3.2), se puede ver la diferencia entre LoRa y LoRaWAN, la primera permite el enlace de comunicación de largo alcance, mientras que la segunda define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red.

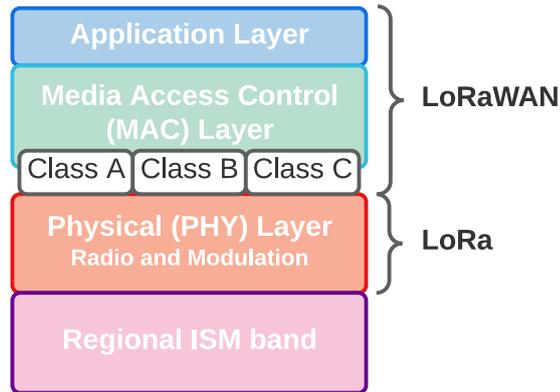


Figura 3.2: Stack del protocolo LoRa.

Los nodos en una red LoRaWAN son asíncronos y transmiten cuando tienen datos listos para mandar. Este protocolo de comunicación es denominado como ALOHA. En una arquitectura de estrella de largo alcance el *gateway* tiene que tener una capacidad muy grande para poder recibir una gran cantidad de mensajes por parte de los nodos. La alta capacidad de una red LoRaWAN se logra a través del uso de una velocidad de datos adaptativa y mediante el uso de un transceptor multimódem multicanal en el *gateway* para poder recibir mensajes simultáneos en múltiples canales.

### 3.2.2. Clase de dispositivos

Existen 3 tipos de dispositivos diferentes en LoRa. Cada clase está diseñada para atender distintas necesidades de aplicación. La diferencia principal entre las clases A, B y C es el equilibrio entre latencia y consumo de energía.

#### 3.2.2.1. Clase A

La clase predeterminada que debe ser compatible con todos los dispositivos finales de LoRaWAN. La comunicación de clase A es iniciada por un *end-device*, el cual puede mandar un mensaje de enlace ascendente (*uplink*), de un momento a otro. Una vez enviado el mensaje, el dispositivo espera una respuesta por parte del *gateway*, por lo que abre dos *slots* de recepción, sin embargo, el *gateway* solo puede responder dentro de uno, nunca en ambos.

En la figura 3.3 se muestran las 3 casos que podrían ocurrir en una comunicación de clase A, en el primero el dispositivo abre los dos *slots* de recepción, sin embargo no recibe respuesta. En el segundo caso el *end-device* recibe la respuesta durante el primer *slot* de recepción, por lo que no es necesario abrir el segundo. En el último caso, el dispositivo no recibe respuesta durante el primer *slot*, por lo que abre el segundo y es en este donde recibe la respuesta. Los dispositivos de clase A, frecuentemente utilizan baterías, ya que tienen un menor consumo de energía, porque la mayor parte del tiempo lo pasan en modo de suspensión.

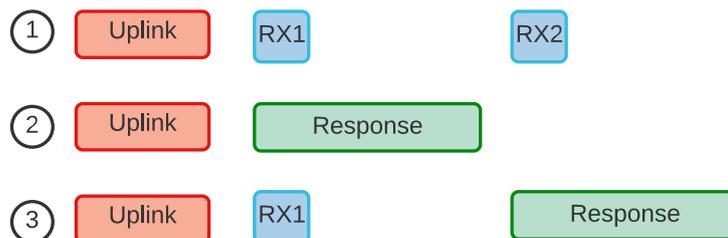


Figura 3.3: Comportamiento de las ventanas de recepción de la clase A.

### 3.2.2.2. Clase B

El dispositivo de clase B repite el mismo proceso que el de clase A, pero este tipo de dispositivos abren *slots* de recepción programados para poder recibir la respuesta a su mensaje. Estos dispositivos reciben tramas *beacon* por parte del *gateway*, permitiendo que este sepa cuando el dispositivo está escuchando. El *end-device* abre *slots* de *ping* de enlace descendente a horas programadas para recibir mensajes de enlace descendente desde el servidor de red. Los dispositivos de clase B también abren ventanas de recepción después de enviar un enlace ascendente, como puede verse en la figura 3.4. Los dispositivos de clase B tienen un mayor consumo energético que los dispositivos de clase A, porque el dispositivo pasa más tiempo en modo activo, durante los *beacon* y los *slots* de *ping*.



Figura 3.4: Ventana de recepción clase B.

### 3.2.2.3. Clase C

Este tipo de dispositivos, amplían la clase A, ya que mantienen abierta la ventana de recepción a menos de que transmitan información, como se muestra en la figura 3.5. Esto permite una comunicación de baja latencia, pero el consumo energético es mucho mayor al de la clase A.



Figura 3.5: Ventana de recepción clase C.

## 3.2.3. Seguridad y autenticación

LoRaWAN ocupa dos capas de seguridad, una para su *network server* y la otra para el *application server*. La seguridad en la red garantiza la veracidad del *end device* en la red. El procedimiento de unión establece la autenticación mutua entre un dispositivo final y la red LoRaWAN a la que está conectado. Solo los dispositivos autorizados pueden unirse a la red.

Por otro lado, la seguridad en la aplicación mantiene protegidos los datos de la aplicación del usuario final, mediante los mensajes de aplicaciones y MAC de LoRaWAN, los cuales tienen autenticación de origen, protección de integridad y cifrado de extremo a extremo. Estas características de seguridad brindan certeza de que el tráfico en la red no se ha alterado, solo dispositivos permitidos están conectados en la red, el tráfico no se puede escuchar, no puede ser capturado y reproducido.

Antes de que un *end-device* comience a mandar y a recibir mensajes, este debe pasar por el proceso de activación, el cual le permite registrarse en la red. Existen dos métodos de activación los cuales son *Over-The-Air-Activation (OTAA)* y *Activation By Personalization (ABP)*.

OTAA es el método más seguro de activación. En este, los dispositivos realizan un procedimiento de unión con la red, en el cual al dispositivo se le asigna una dirección dinámica y se intercambian las claves de seguridad entre el dispositivo y la red. En el método ABP se requiere que la dirección y las claves de seguridad se codifiquen en el dispositivo, para así poderse conectar a una red determinada.

## 3.3. ChirpStack

*ChirpStack* es un *stack* de servidores de red LoRaWAN de código abierto, el cual se puede utilizar para implementar una red LoRaWAN. Además cuenta con una interfaz web para la administración de *gateways* y dispositivos. Cuenta con licencia del MIT, por lo cual se puede utilizar para cualquier aplicación, ya sea con fines educativos o comerciales [36].

Los componentes proporcionados por *ChirpStack* son:

1. *ChirpStack Gateway Bridge*, el cual se encarga de la comunicación con los *gateways*.
2. *ChirpStack Network Server*, es una implementación del servidor de red de LoRaWAN.
3. *ChirpStack Application Server*, es una implementación del servidor de aplicaciones LoRaWAN.
4. *ChirpStack Gateway OS*, es un sistema operativo basado en Linux para ejecutar *ChirpStack* en un *gateway* conectado a una *Raspberry Pi*.

En la figura 3.6 se puede apreciar la arquitectura de la pila de servidores de *ChirpStack*. El funcionamiento básico de dicha arquitectura se basa en la transmisión de datos enviados por los nodos finales, a través del protocolo LoRaWAN, a los *gateways* LoRa. Los *gateways*, normalmente pueden escuchar ocho o más canales simultáneamente y todos los datos recibidos los transmiten al *ChirpStack Network Server* a través del protocolo UDP. El servidor de red de *ChirpStack* es el responsable de administrar el estado de la red, es el encargado de manejar las solicitudes de unión de los *end devices* y posee el conocimiento de las activaciones de los dispositivos en la red. Adicionalmente, cumple con la funcionalidad de eliminar los datos redundantes que recibe por parte de las puertas de enlace y almacena la información en la base de datos de la que depende el servidor. El *ChirpStack application server* leerá la base de datos del servidor y proporcionará interfaces de datos como HTTP, MQTT, etc., lo que facilita que la aplicación final pueda procesar los datos y los pueda utilizar para realizar un análisis, activar una alerta, presentárselos al usuario final, etc.

Es importante mencionar que el *network server* es el responsable de almacenar los mensajes que quiera transmitir el *application server* a un dispositivo, hasta que pueda enviarlos a través de un *gateway*. El *ChirpStack application server* proporciona una interfaz web y una API para la gestión de usuarios, organizaciones, aplicaciones, puertas de enlace y dispositivos. *ChirpStack* se puede instalar en distintas plataformas, como en *Docker*, en una *Raspberry Pi*, Debian, Ubuntu, etc.

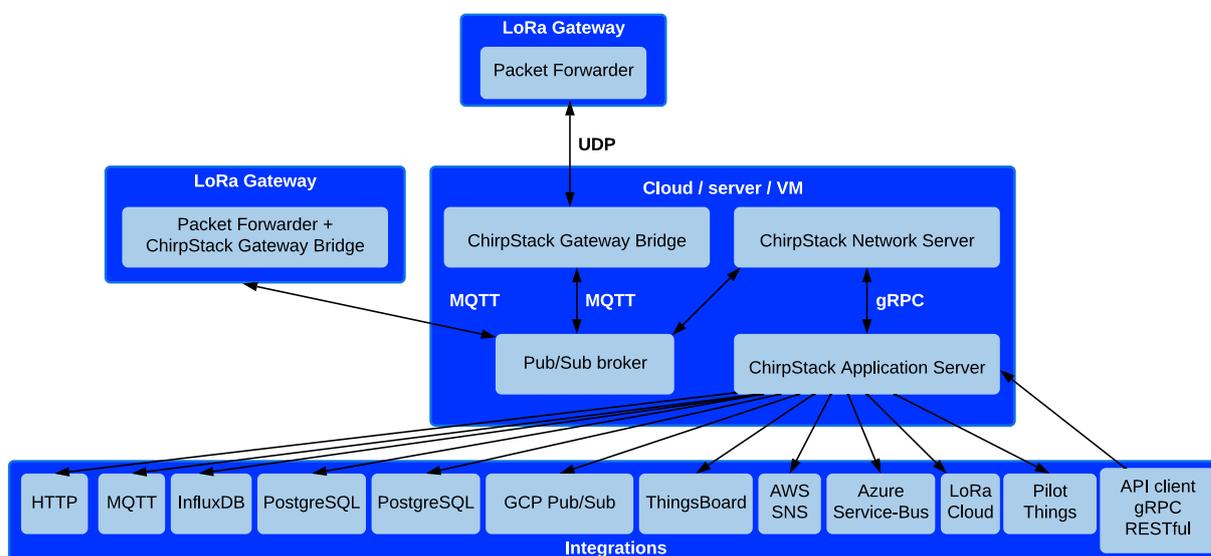


Figura 3.6: Conexión de los componentes del servidor de red ChirpStack LoRaWAN.

## 3.4. Sistema de comunicación (elementos)

### 3.4.1. Raspberry Pi 3B+

La *Raspberry Pi* es un micro ordenador de bajo costo al cual se le pueden conectar periféricos como un monitor, un teclado y un *mouse* para poderse utilizar. Su capacidad computacio-

nal le permite realizar la mayoría de las tareas típicas de una computadora de escritorio como navegar en Internet, reproducir audio o video, gestionar documentos de ofimática y correr videojuegos. Una de sus grandes ventajas de este tipo de placas, es que pueden ser utilizadas en una amplia variedad de proyectos digitales relacionados con la innovación tecnológica en áreas como el IoT.

La tarjeta *Raspberry Pi 3B+* es la versión final de la gama *Raspberry Pi 3*. Esta placa necesita de una tarjeta micro SD para poder almacenar su sistema operativo en ella. Dicho sistema puede ser *Raspbian*, *RetroPie*, *Ubuntu Core*, *ChirpStack Gateway OS*, entre otros, dependiendo de la necesidad que se tenga.

Esta placa cuenta con un procesador *quad-core* de 64 bits a 1.4[GHz], LAN inalámbrica de doble banda, *Bluetooth 4.2/BLE*, Ethernet más rápido y compatibilidad con *Power over Ethernet* (con PoE HAT independiente). Utiliza una fuente de alimentación *micro USB* de 2.5[A] de alta calidad [37]. Además dispone de un GPIO de 40 pines, el cual permite conectar a la placa equipo como sensores o actuadores, posee puertos de comunicación I<sup>2</sup>C, SPI y UART. También cuenta con conexiones de puertos USB, un Jack de 3.5mm y un puerto HDMI. Cabe mencionar que cuenta con puertos especiales para una cámara y una pantalla LCD.



Figura 3.7: Placa Raspberry Pi modelo 3B+.

### 3.4.2. HT-M01

El dispositivo *HT-M01* es un mini LoRa *gateway* diseñado por la compañía *Heltec*. Está basado en el chip de banda base *SX1308* producido por la corporación *Semtech*. Es un *gateway* de grado industrial con un alto desempeño y tamaño compacto. Esta puerta de enlace está diseñada para trabajar en las bandas de frecuencia de 433[MHz], 470 – 510[MHz], 868[MHz] y 915[MHz], las cuales son la banda ISM de las distintas regiones [1].

Este equipo se puede utilizar para acompletar rápidamente el desarrollo de redes LoRa-WAN para aplicaciones como redes de sensores inalámbricos, Internet de las cosas, entre otras. El *HT-M01* se puede controlar por medio de SPI o USB, el primero solo es compatible con sistemas *Linux* y el segundo se puede usar en *Linux* y *Windows*. Para aplicar el modo SPI se necesita una *Raspberry Pi ZERO W* y la placa adaptadora, esta placa se encarga principalmente de exportar el bus SPI de la *Raspberry Pi*, la configuración se puede observar en la figura 3.8.



Figura 3.8: Gateway HT-M01 controlado a través de SPI por una Raspberry Pi ZERO W [Obtenido de [1]].

El gateway cuenta con la interfaz CH340G USB a chip serial, la cual permite controlar al HT-M01 por medio de una conexión USB desde una Raspberry Pi convencional, como se muestra en la figura 3.9. Esta puerta de enlace cuenta con 10 rutas de demodulación paralelas programables, factor de dispersión adaptativo automático, opcional para cada canal SF7 a SF12, potencia máxima de salida de  $25[dBm]$ , sensibilidad del receptor de  $-142.5[dBm]@300[bps]$ , fuente de alimentación de  $5[V]$  y admite el protocolo LoRaWAN Clase A, Clase B y Clase C.



Figura 3.9: Gateway HT-M01 controlado a través de USB por una Raspberry Pi modelo 3B+.

### 3.4.3. Wireless Stick Lite

La placa de desarrollo *Wireless Stick Lite* está basada en el ESP32. El término ESP32 se le atribuye a una familia de chips SoC de bajo costo y bajo consumo de energía con tecnología Wi-Fi y Bluetooth de modo dual integrada. La placa cuenta con comunicación LoRa. Esta tarjeta es fabricada por la compañía Heltec Automation [2]. La placa cuenta con dos procesadores de 32-bits, un coprocesador de ultra bajo consumo, 4MiB de memoria de programa, un chip regulador de voltaje, el cual suministra al ESP32 los  $3.3[V]$  que necesita para funcionar, posee un sistema protector contra corto-circuitos y consumos elevados, entre otras características.

En la parte superior, la *wireless stick lite* tiene un puerto micro USB, el cual se utiliza para alimentarla o programarla. Cuenta con dos botones, uno para reiniciar el estado de la placa y el otro para programar la tarjeta con hardware externo. Tiene una antena 3D metálica para Wi-Fi y Bluetooth, un conector U.FL, el cual permite conectar una antena externa para utilizar

el módulo LoRa. Posee dos LED's, el primero indica la correcta alimentación de la placa y el LED integrado está conectado al pin digital 25 de la tarjeta, por lo tanto, puede ser controlado desde el código. En la parte inferior dispone del *chip CP2102* que permite la comunicación entre el *ESP32* y la computadora. Además, tiene un conector del tipo *SH1.25-2* para baterías *Li-Po*, la cual puede dar energía al sistema sin necesidad de usar otra fuente de alimentación externa. Lo anteriormente descrito se puede apreciar en la figura 3.10.

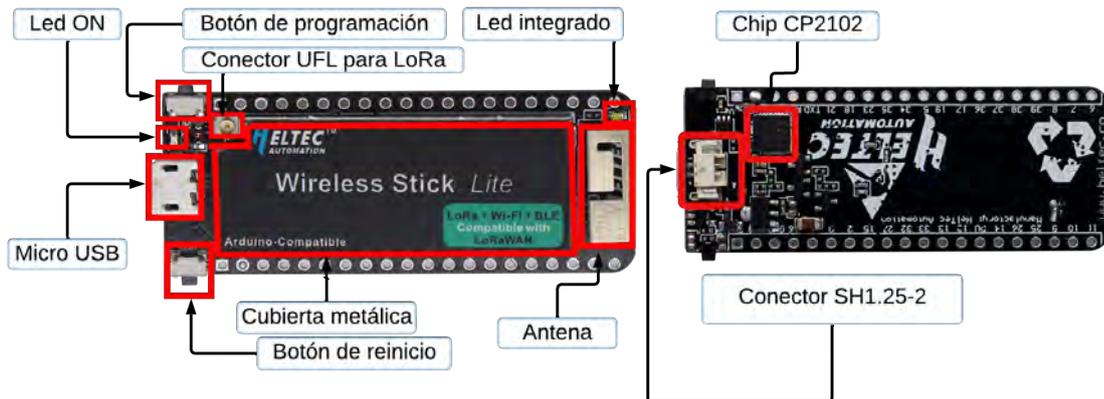


Figura 3.10: Arquitectura de la placa *Wireless Stick Lite* [Obtenido de [2]].

La *Wireless Stick Lite* dispone de dos filas de 20 pines cada una, ubicados a los costados de la placa, en la figura 3.11 se puede ver la funcionalidad de cada uno de los pines que la componen.

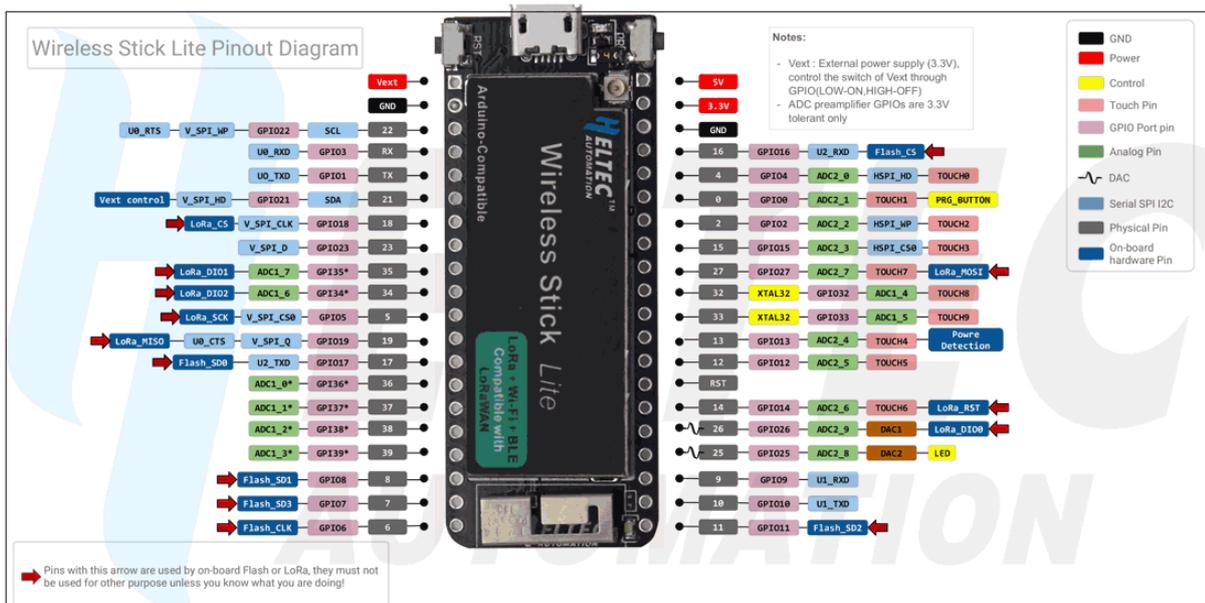


Figura 3.11: Distribución de pines de la placa *Wireless Stick Lite*. [Obtenido de [2]]

Al analizar el *pinout* se puede notar que la tarjeta de desarrollo cuenta con tres pines destinados a la alimentación, tiene dos pines de tierra (*GND*) y un pin de reinicio. Por lo que quedan un total de 34 pines digitales para utilizar, de los cuales 18 pueden ser utilizados como entradas analógicas, por lo cual, es posible controlar una basta cantidad de sensores analógicos. Es importante mencionar, que cuando se utiliza el módulo de comunicación LoRa, los pines señalados con flechas rojas son utilizados para la memoria de programa y el *chip* LoRa. Existen pines que no deben de ser utilizados a menos que sea absolutamente necesario, estos son los pines relacionados con la memoria *flash* (17, 8, 7, 6, 11 y 16) y los relacionados con el *chip* LoRa (18, 35, 34, 5, 19, 26, 14, 27).

Otra características técnicas de está tarjeta son que los pines 34, 35, 36, 37, 38 y 39 son solo pines de entrada. La placa tiene una sensibilidad de receptor de  $-139dBm$  (SF12, 125[kHz]). Puede trabajar en las bandas ISM de *EU\_433*, *CN\_470.510*, *EU\_863-870* y *US\_902-928*. Cuenta con una potencia LoRa de salida de  $18[dB] \pm 2[dB]$  y en condiciones de sueño profundo puede consumir hasta  $800[\mu A]$ . Por último, la *Wireless Stick Lite* es compatible con *Arduino*, así que se puede programar desde su IDE.

## 3.5. Sensores

En [38] el *National Institute of Standards and Technology (NIST)* define a los sensores como transductores capaces de convertir un parámetro físico, biológico o químico en una señal eléctrica. Tal señal se puede devolver como datos digitales que representen a dicho parámetro. En [39] se menciona que las ventajas de un sensor, frente a otros métodos de medición, son la visualización y transmisión de datos en tiempo real, la detección de valores atípicos, debido a las mediciones continuas y la disponibilidad de una gran cantidad de sensores certificados y validados.

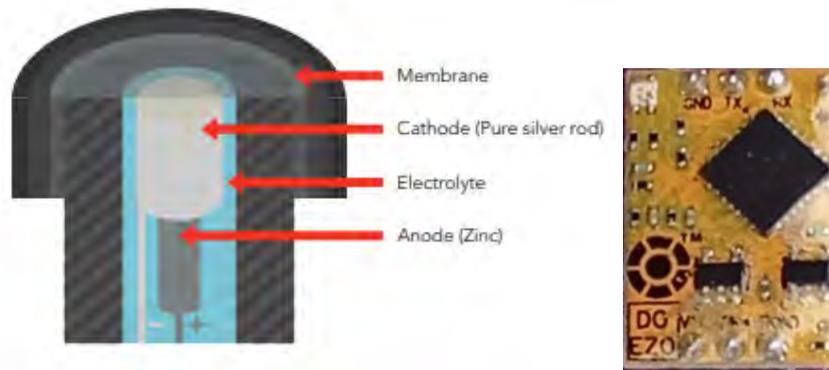
### 3.5.1. Atlas Scientific

*Atlas Scientific* [3], es una empresa estadounidense especializada en el desarrollo de equipos de medición para monitorear la calidad del agua. Los sensores diseñados por esta compañía comparten características como el requerimiento de  $3.3[V]$  a  $5[V]$  para funcionar. La transferencia de información la pueden realizar a través del protocolo de comunicación UART o por medio de  $I^2C$ . Los sensores son compatibles con tecnologías como *Arduino* o *Raspberry Pi*.

Los sensores son sensibles a pequeñas diferencias en el potencial eléctrico (microvoltajes), producidos por fuentes no naturales como válvulas selenoides, bombas u otros sensores/sondas. Los microvoltajes ocasionan que las lecturas oscilen abruptamente. Es por esto, que se recomienda el uso de un circuito aislador de voltaje para evitar que los datos registrados por los equipos se vean afectados.

#### 3.5.1.1. Sensor de oxígeno disuelto

El circuito embebido de oxígeno disuelto (*EZO-DO*) de la marca *Atlas Scientific* cuenta con un principio de funcionamiento en el que las moléculas de oxígeno disuelto atraviesan la membrana de la sonda a una velocidad constante, hasta llegar al al cátodo donde se reducen, produciendo un pequeño voltaje. El voltaje generado es equivalente a la cantidad de oxígeno, por lo tanto, si no hay moléculas de oxígeno presentes, la sonda registrará un voltaje de  $0[mV]$ . El valor de salida de la sonda aumentará conforme aumente el oxígeno. La sonda galvánica del *EZO-DO* está conformada de una membrana de *Polytetrafluoroethylene (PTFE)*, un ánodo bañado en un electrolito y un cátodo como se ilustra en la figura 3.12(a).



(a) Estructura interna de la sonda de oxígeno disuelto (Obtenido de [3]).

(b) EZO-DO.

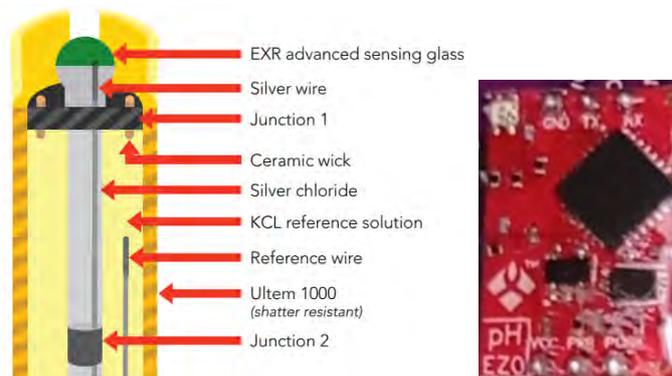


(c) Sonda de oxígeno disuelto.

Figura 3.12: Componentes utilizados para medir el oxígeno disuelto.

### 3.5.1.2. Sensor de pH

El circuito embebido de pH (*EZO-pH*) de *Atlas Scientific* cuenta con una sonda que detecta la actividad de los iones de hidrógeno en un líquido. La sonda cuenta con una membrana de vidrio, que permite que los iones de hidrógeno del líquido que se está midiendo se desvanezcan en la capa exterior del vidrio, mientras que los iones más grandes permanecen en la solución. La diferencia entre la concentración de iones en el líquido y en la capa externa de la membrana de cristal, generan una corriente muy pequeña, la cual es proporcional a la concentración de iones de hidrógeno en el líquido. La estructura interna de la sonda para medir el pH se ilustra en la figura 3.13(a).



(a) Estructura interna de la sonda de pH (Obtenido de [3]).

(b) EZO-PH.

Figura 3.13: Componentes utilizados para medir el pH.

### 3.5.1.3. Sensor de temperatura

El circuito embebido de temperatura (*EZO-RTD*) de *Atlas Scientific* interpreta la resistencia del platino a un valor real de temperatura. Este circuito puede ser compatible con sondas *PT-100* o *PT-1000*, las cuales pueden ser de 2, 3 o 4 hilos, tiene un rango de detección de  $-126^{\circ}\text{C}$  a  $1254^{\circ}\text{C}$ .



Figura 3.14: Sensor de temperatura *EZO-RTD*.

### 3.5.1.4. Sonda industrial ENV-50-pH

La *ENV-50-pH* es una sonda de nivel industrial, que cumple con el principio de funcionamiento antes explicado para la medición del pH. Sin embargo, cuenta con un vidrio de detección avanzado, el cual permite conseguir reacciones más rápidas y lecturas más precisas.

La *ENV-50-pH* puede obtener lecturas de pH y de temperatura, además, es compatible con los sensores *EZO-RTD* y *EZO-PH*, en la figura 3.15, se puede observar la conexión entre estos dispositivos. Tiene un rango de lectura para pH de 0 a 14 unidades y de temperatura de  $1^{\circ}\text{C}$  a  $99^{\circ}\text{C}$ . Puede ser sumergida completamente en agua salada o dulce hasta una profundidad de 70[m].

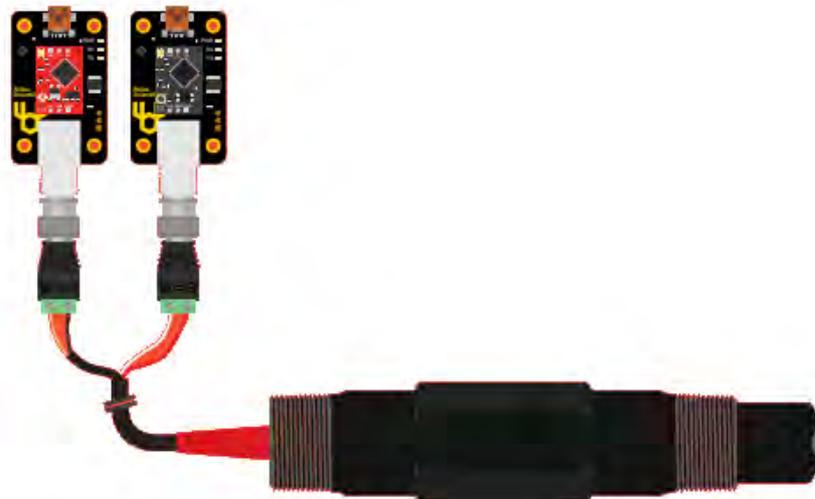


Figura 3.15: Conexión entre la sonda industrial *ENV-50-pH* y los circuitos *EZO-PH* y *EZO-RTD*. [Obtenido de [3]].

### 3.5.1.5. Placa portadora EZO eléctricamente aislada

Esta placa le proporciona a los circuitos de *Atlas Scientific* aislamiento eléctrico de los demás componentes que conformen un proyecto. Es compatible con todos los circuitos *EZO*, a excepción del *EZO Embedded Flow Meter Totalizer*. A través de este circuito se puede controlar el estado de las placas *EZO*, ya que través de una señal eléctrica se pueden habilitar o deshabilitar.

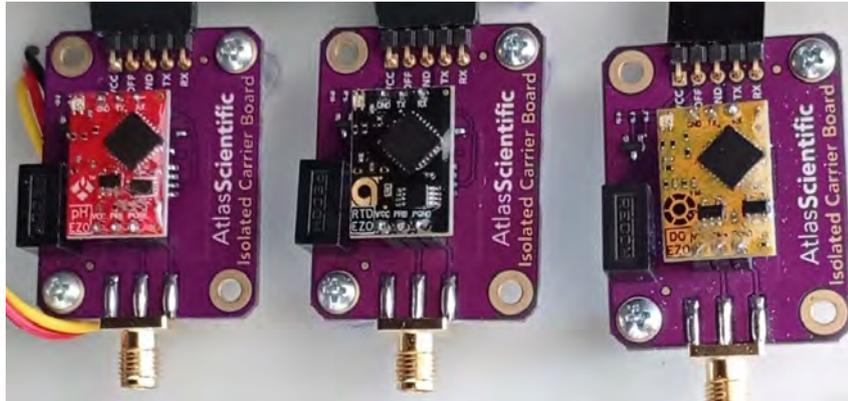
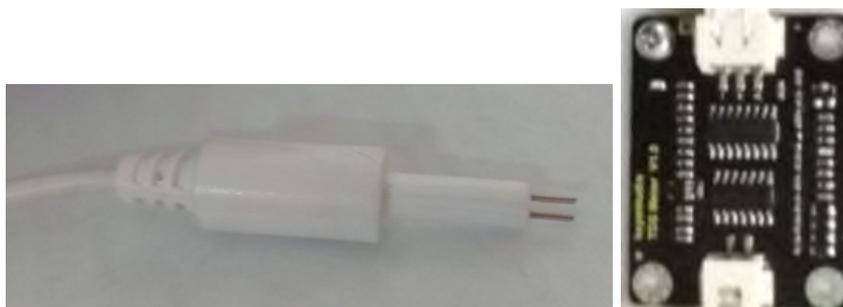


Figura 3.16: Circuitos EZO-PH, EZO-RTD y EZO-DO montados sobre la placa de aislamiento eléctrico.

### 3.5.2. KS0429 keyestudio TDS Meter V1.0

EL *KS0429* [40], puede ser alimentado con una entrada de 3.3[V] a 5[V]. Sus lecturas indican cuantos miligramos de sólidos disueltos están presentes en el agua. Su electrodo mide materiales conductores como sólidos en suspensión, metales pesados e iones conductivos en el agua. La sonda es impermeable y puede permanecer sumergida durante un periodo de tiempo prolongado. Este sensor se puede controlar a través de plataformas como *Arduino*.



(a) Sonda para medir TDS.

(b) Circuito KS0429.

Figura 3.17: Componentes utilizados para medir los TDS.

### 3.5.3. Características técnicas de los sensores

A continuación, en la tabla 3.4 se muestran las características técnicas más importantes de cada uno de los sensores anteriormente descritos.

Especificaciones	EZO-DO	EZO-PH	EZO-RTD	KS0429 TDS Meter	Sonda de oxígeno disuelto	Sonda de pH
Rango	0 – 100[ <i>mg/L</i> ]	0 – 14	–126 – 1254[ <i>°C</i> ]	0 – 1000[ <i>ppm</i> ]	0 – 100[ <i>mg/L</i> ]	0 – 14
Precisión	±0.05[ <i>mg/L</i> ]	±0.002	±0.1 + 0.0017 <i>x</i> [ <i>°C</i> ]	±10 % F.S.	±0.05[ <i>mg/L</i> ]	±0.002
Resolución	-	0.001	0.001	-	-	±0.001
Tiempo de respuesta	1[ <i>lectura/seg</i> ]	1[ <i>lectura/seg</i> ]	1[ <i>lectura/seg</i> ]	-	0.3 [ $\frac{mg/L}{s}$ ]	95 % en 1[s]
Presión máxima	-	-	-	-	500[ <i>PSI</i> ]	100[ <i>PSI</i> ]
Temperatura de funcionamiento	-	-	-	-	1 – 60[ <i>°C</i> ]	1 – 99[ <i>°C</i> ]
Tiempo antes de la recalibración	-	-	-	-	~ 1 año	~ 1 año
Expectativa de duración	-	-	-	-	~ 4 años	~ 4 años

Tabla 3.4: Características y especificaciones de los sensores utilizados para el desarrollo del prototipo de medición de la calidad del agua.

## 3.6. Sistema de alimentación

### 3.6.1. Módulo de gestión de energía solar

El módulo de gestión de energía de la marca WAVESHARE [4], es una placa diseñada para proporcionar una salida regulada de 5[V] a 1[A] a través de un puerto USB o por medio de pines. Puede ser alimentada por medio de paneles solares de 6[V] – 24[V], debido a que cuenta con un regulador MPPT, el cual permite obtener la máxima potencia de los paneles solares, ya que consigue un balance entre el voltaje y la corriente. También puede ser energizada por medio de una batería de Litio de 3.7[V] o por conexión micro USB de 5[V], como se muestra en la figura 3.18. Si el módulo es alimentado por medio de paneles solares o por conexión micro USB, se le puede conectar una batería para que la cargue y en caso de perder la fuente de energía principal, utiliza la energía de la batería para continuar funcionando.

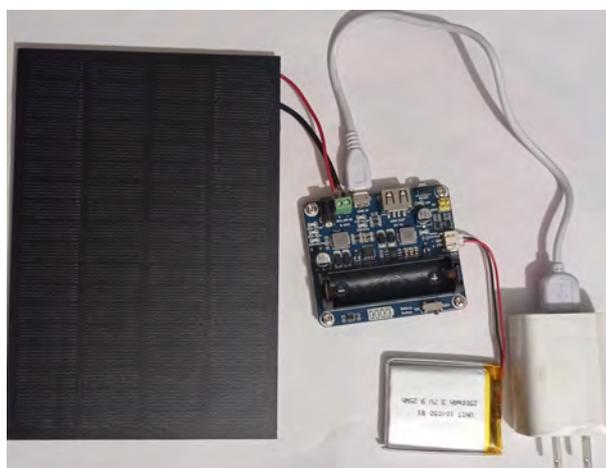


Figura 3.18: Distintas formas de alimentar al módulo de gestión de energía.

El módulo cuenta con circuitos de protección múltiple para sobrecarga, sobredescarga, conexión inversa, sobrecalentamiento y sobrecorriente. Los componentes del módulo se pueden observar en la figura 3.19 y se describen a continuación.

1. Entrada de carga del panel solar: conector *DC-002* o terminal de tornillo.
2. Puerto de carga micro USB.
3. Salida regulada de 5[V] a 1[A] a través de puerto USB o *pinheader* de 2.54[*mm*].

4. Interfaces para batería: para conectar una batería de Litio de 3.7[V] con un conector *PH2.0* o un soporte de batería 14500.
5. *Chip* de administración de energía USB (5. *CS8501*).
6. *Chip* de gestión de energía solar (6. *CN3791*).
7. *Chip* para la protección de la batería de Litio (sobrecarga/descarga).
8. Interruptor para habilitar/deshabilitar la batería.
9. Interruptor *MPPT SET* (lado inferior), voltajes admitidos 6[V], 9[V], 12[V], 18[V] y 24[V].
10. Botón de reinicio.
11. Indicadores de la carga de la batería.
12. Indicadores de carga USB:
  - USB charge, se enciende cuando la placa se alimenta por medio del conector micro USB.
  - USB done, se enciende cuando la batería está completamente cargada por USB.
13. Indicadores de carga del panel solar:
  - Solar charge, se enciende cuando la placa se alimenta por medio de paneles solares.
  - Solar done, se enciende cuando la batería está completamente cargada por el panel solar.
  - Solar warning, se enciende cuando el panel solar se conecta al revés.
14. Indicador LED que se enciende cuando la batería se conecta al revés.
15. Indicador LED que se enciende cuando la el módulo proporciona una salida 5[V]/1[A].

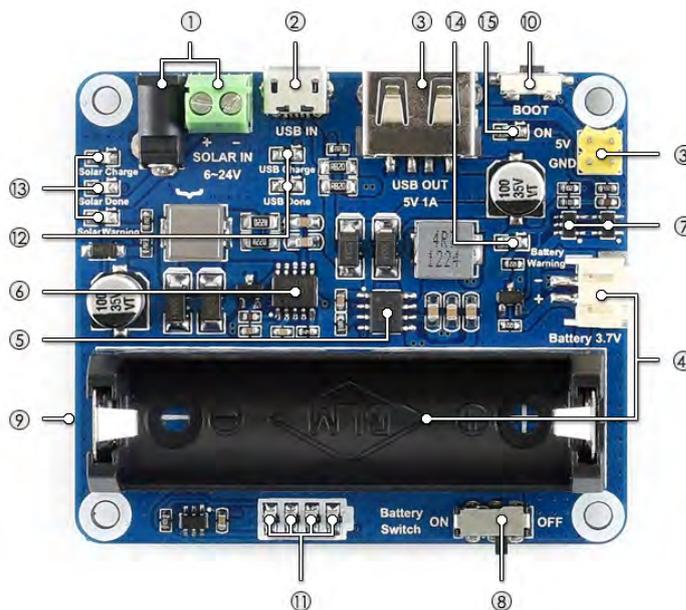


Figura 3. 19: Arquitectura del módulo de gestión de energía. [Obtenido de [4]].

## 3.7. Sistema de alertas

### 3.7.1. Pushbullet

Pushbullet [41], es una aplicación que permite conectar diferentes dispositivos como celulares, tabletas y computadoras, para poder enviar notas, enlaces, imágenes y archivos desde el ordenador al móvil y viceversa. Está disponible de forma gratuita para los sistemas *iOS*, *Android*, *Windows*, *Chrome*, *Firefox* y *Opera*. También cuenta con una versión *pro*, por la que se tiene que pagar una mensualidad.

*Pushbullet* tiene una API que permite a los desarrolladores interactuar con la red de esta aplicación. Gracias a esta interfaz, desde diferentes lenguajes de programación, como *python*, se pueden enviar notificaciones automáticas a dispositivos *Android* e *iOS*. Esta característica es muy importante en el desarrollo de aplicaciones IoT, ya que si se cuenta con un sistema de sensores que supervisan cierta variable, a través de *Pushbullet* se puede implementar un sistema de alertas por medio de notificaciones *push*.

### 3.7.2. Simple Mail Transfer Protocol (SMTP)

SMTP [42], es un protocolo de red empleado para el intercambio de correos electrónicos entre computadoras u otros dispositivos. Este protocolo está orientado específicamente al envío de correos electrónicos. El funcionamiento de SMTP se describe de manera general a continuación.

- Se establece una conexión entre el cliente de correos (por ejemplo, *Gmail* u *Outlook*), y el servidor SMTP.
- El cliente le comparte al servidor la dirección del correo origen, para que este pueda validarla.
- El cliente le envía al servidor los correos de destino y el mensaje a enviar.
- El servidor SMTP válida a los destinatarios.
- El mensaje se envía a la bandeja de entrada de los correos de destino.
- Si el cliente no tiene más mensajes que mandar, cierra la conexión con el servidor SMTP.

El protocolo SMTP se puede configurar en un servidor, a través del cual se pueden enviar notificaciones por correo electrónico de algún evento o problema.

## 3.8. Tecnologías utilizadas para la implementación de la aplicación final

### 3.8.1. MQTT

Message Queue Telemetry Transport (MQTT) [43], es un protocolo de comunicación abierto M2M, basado en un modelo de suscripción y publicación de tópicos. Esta tecnología presenta grandes ventajas en áreas como el IoT, por ser ligera y eficiente con el ancho de banda. Cuenta con una implementación sencilla, genera un consumo mínimo de energía, permite comunicaciones bidireccionales y cuenta con una gran escalabilidad.

MQTT se ejecuta sobre TCP/IP utilizando un modelo *pub/sub*, el cual permite la comunicación asíncrona entre el *broker* y los clientes. Un cliente MQTT es cualquier dispositivo que se conecta al *broker* con el fin de enviar o recibir información. El *broker* es la entidad que se encarga de filtrar todos los mensajes entrantes y distribuirlos correctamente a los suscriptores. En el modelo publicación/suscripción, los clientes no se comunican directamente entre sí, la comunicación se da siempre a través del *broker*. Un cliente MQTT puede tomar el rol de suscriptor, editor o ambos.

Este protocolo es controlado por eventos, ya que un cliente realiza una publicación cuando cuenta con información para enviar y el *broker* comparte la información con los suscriptores cuando tiene nuevos datos. Para que el *broker* conozca que información enviar a cada suscriptor, existen los tópicos o temas. Cada cliente editor publica información bajo un tema y todos los clientes interesados en recibir información de ese editor se deben de suscribir al tema en el que publica los datos. Una representación de este proceso se muestra en la figura 3.20.

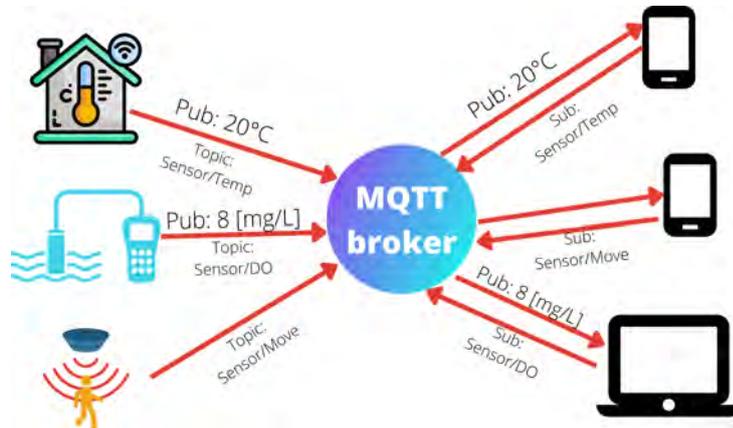


Figura 3.20: Arquitectura de publicación/suscripción de MQTT.

MQTT cuenta con tres niveles de calidad de servicio (QoS), los cuales garantizan la entrega de mensajes entre el *broker* y los clientes. Con un QoS 0, se le indica al *broker* que el mensaje solo se debe de enviar una vez al suscriptor y no debe de esperar confirmación, por lo que el servidor desconoce si la transmisión fue exitosa. Con un QoS 1, el *broker* entrega la información al suscriptor y espera un determinado tiempo a que le confirme de recibido, si el servidor no recibe la confirmación reenvía el mensaje, esto provoca que el mensaje pueda ser recibido en más de una ocasión por el suscriptor. Y por último, un QoS 2 no solo garantiza la transmisión del mensaje por parte del *broker* al cliente suscriptor, sino que también garantiza que lo reciba una única vez.

Este protocolo es compatible con muchas plataformas como Arduino, ESP8266 o Raspberry Pi. Además, existen bibliotecas que permiten su implementación en lenguajes de programación como python o PHP.

### 3.8.2. Servidor LAMP

LAMP [44], es un acrónimo que hace referencia a 4 tecnologías de código abierto (Linux, Apache, MySQL y PHP). Dichas tecnologías son utilizadas para implementar un servidor que sea capaz de alojar aplicaciones y sitios web dinámicos. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de ellas.

- Linux es el sistema operativo en el que se ejecutarán el resto de los componentes del servidor, este puede ser cualquier tipo de distribución GNU/Linux.
- Apache es un servidor que permite alojar y desplegar páginas web estáticas y dinámicas, que cuenten con un *backend* realizado en PHP.
- MySQL es un sistema de gestión de base de datos relacionales, que permite el almacenamiento y rápido acceso a la información.
- PHP es el lenguaje de programación destinado al desarrollo de aplicaciones para la web. Además de que favorece la conexión entre servidores y la interfaz de usuario final.

El servidor LAMP, también cuenta con sus versiones para otros sistemas operativos como Windows y macOS, los cuales son WAMP y MAMP, respectivamente.

## Capítulo 4

# Implementación y construcción del sistema de monitoreo IoT

A lo largo de este trabajo se ha resaltado lo importante que es la calidad del agua para el éxito de las operaciones acuícolas. Sin embargo, un reto al que se enfrentan los acuicultores tradicionales es monitorear y aumentar la calidad del agua de manera rápida y eficiente. Es por ello que en este capítulo se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real para acuicultura.

El diagrama de bloques del proyecto se puede observar en la figura 4.1, las líneas punteadas representan una conexión inalámbrica y las líneas continuas representan una conexión física. En el diagrama se puede apreciar que el bloque de sensado es alimentado por medio de paneles solares o por baterías recargables. En dicho bloque, la placa *Wireless Stick Lite* es la encargada de controlar y de recolectar la información de los sensores a través del protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C y por medio de un canal analógico. Una vez recopilada la información, esta se transmite desde la placa de control al *gateway* utilizando el protocolo LoRaWAN.

Como *gateway* se utilizó el módulo *HT-M01* controlado a través de una *Raspberry Pi 3B+*. En el ordenador también se instaló la pila de servidores de red *ChirpStack* para llevar a cabo la implementación de la red LoRaWAN. El *stack* de *ChirpStack* es el encargado de compartir la información que se recibe del bloque de sensado al *host* para que este la pueda procesar. *Chirpstack* utiliza el protocolo MQTT para comunicar los datos.

El *host* es el encargado de procesar la información a través de un *script* realizado en *Python*. En caso de encontrar alguna irregularidad en los datos recibidos, se activa una alerta digital la cual se envía por medio de correo electrónico a través del protocolo SMTP o también se puede enviar por medio de una notificación *push* utilizando la aplicación *Pushbullet*. Adicionalmente, el *host* se encarga de almacenar la información en una base de datos y hospeda una página *web* a través de la cual se pueden consultar los datos en tiempo real.

La página *web* se construyó utilizando como base la plantilla *adminLTE*, junto con las tecnologías HTML, CSS, PHP nativo, JavaScript, MariaDB y como gestor de base de datos se utilizó *phpMyAdmin*.

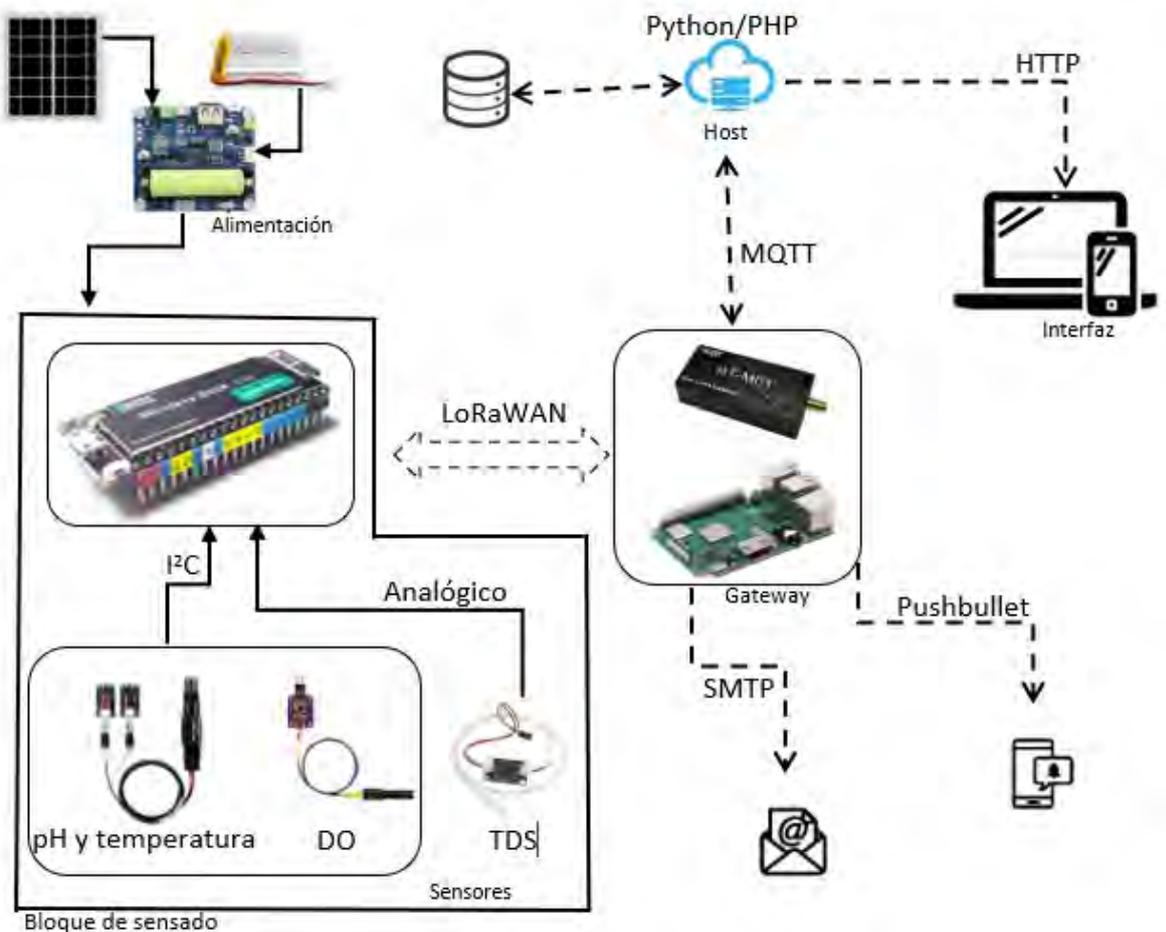


Figura 4.1: Diagrama del sistema propuesto

#### 4.1. Instalación y configuración de los componentes del servidor ChirpStack

El trabajo descrito en esta tesis se desarrolló utilizando, mayormente, componentes *open source*. Haciendo uso de *ChirpStack*, el cual se compone de cuatro elementos centrales, los cuales son el *Packet Forwarder*, el *ChirpStack Gateway Bridge*, el *ChirpStack Network Server* y el *ChirpStack Application Server*.

En este proyecto se utilizó el LoRa *gateway HT-M01*, el cual se controló mediante una *Raspberry Pi 3B+*, la cual contaba con el sistema operativo *Raspberry Pi OS*. Debido a las características del *gateway*, la configuración presentada a continuación se realizó para la banda de frecuencia *ISM EU 433 MHz*.

La configuración que se realiza en este trabajo de cada uno de los componentes del *stack* de *ChirpStack* es básica y en caso de que se necesite realizar un diseño más robusto, se recomienda leer la documentación provista en [36]. La elaboración de este proyecto tiene su fundamento en instalar todos los componentes de la pila de *ChirpStack* y sus dependencias en un solo servidor. En la figura 4.2 se puede observar la arquitectura que se utilizó para la implementación de los componentes de *ChirpStack* en el ordenador *Raspberry Pi* que fingiría como servidor.

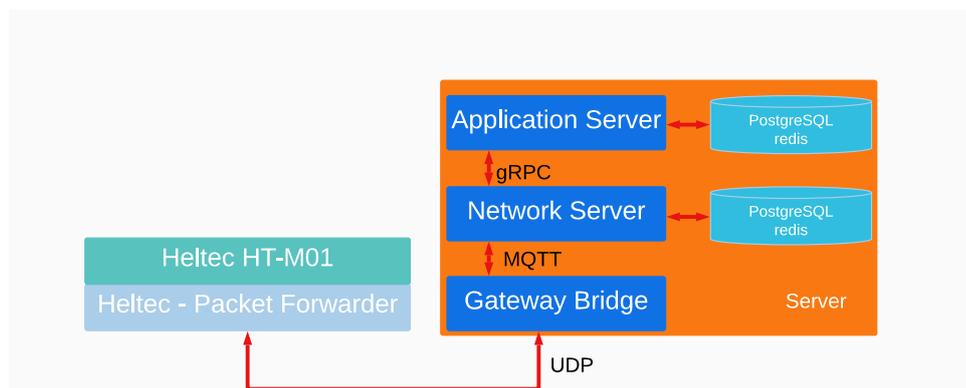


Figura 4.2: Arquitectura utilizada para el diseño del servidor *ChirpStack*.

#### 4.1.1. Packet Forwarder

Para poder analizar los datos recibidos del *gateway* en la *Raspberry Pi*, se instaló en el ordenador la aplicación *Packet Forwarder*. Esta aplicación es la intermediaria que reenvía los paquetes que recibe el *gateway* a la *Raspberry Pi*, a través de un puerto USB y después el ordenador comparte la información utilizando el protocolo UDP.

Para realizar la instalación del *Packet Forwarder*, se debe de conectar el *gateway* al ordenador, como se muestra en la figura 3.9. Después se deben de introducir, en un *prompt* de la *Raspberry Pi*, los comandos mostrados en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *ChirpStack* → *packet\_forwarder* → *Install\_packet\_forwarder.sh* del repositorio [45]. Posteriormente, se debe de ejecutar el comando,

```
./install.sh
```

En el *prompt* aparecerá una cadena de caracteres con la cual se podrá identificar al *gateway*. Una muestra de esto se puede ver en la figura 4.3. El *Gateway\_id* se utiliza para registrar al *HT-M01* en el servidor de red y de aplicaciones de *ChirpStack*.

```
pi@raspberrypi:~/lora $ cd picolorasdk
pi@raspberrypi:~/lora/picolorasdk $ chmod +x install.sh
pi@raspberrypi:~/lora/picolorasdk $ ./install.sh
Gateway_ID set to 3537323928004500 in file local_conf.json
Created symlink /etc/systemd/system/multi-user.target.wants/lrgateway.service →
/etc/systemd/system/lrgateway.service.
pi@raspberrypi:~/lora/picolorasdk $
```

Figura 4.3: Ejemplo de *Gateway\_id* [Obtenido de [1]].

Si la instalación de la aplicación *Packet Forwarder* fue exitosa, al ejecutar el siguiente comando en el *prompt*, se debe de tener la salida que se muestra en la figura 4.4, en la cual se puede observar que el servicio está activo y corriendo.

```
sudo systemctl status lrgateway
```

```
● lrgateway.service - packet forwarder
   Loaded: loaded (/etc/systemd/system/lrgateway.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Sun 2022-10-23 19:50:45 PDT; 5min ago
     Process: 522 ExecStartPre=/home/pi/lora/picoGW_packet_forwarder/reset.sh start (code=exited, status=0/SUCCESS)
    Main PID: 686 (lora_pkt_fwd)
       Tasks: 5 (limit: 2059)
    CGroup: /system.slice/lrgateway.service
            └─686 /home/pi/lora/picoGW_packet_forwarder/lora_pkt_fwd/lora_pkt_fwd
```

Figura 4.4: Estado activo y corriendo del servicio *lrgateway*.

Es importante mencionar, que el *Gateway\_id* también se puede consultar desde la *Raspberry Pi*, en los archivos *global\_conf.json* y *local\_conf.json*. Dichos archivos se ubican en la ruta *home* → *pi* → *lora* → *picoGW\_packet\_forwarder* → *lora\_pkt\_fwd*. En el archivo *global\_conf.json*, se configura el puerto de comunicación y la dirección IP del *ChirpStack Gateway Bridge*, un ejemplo de esto se puede observar en la figura 4.5. Este archivo cuenta con toda la información necesaria para que el *Packet Forwarder* envíe los paquetes al *Gateway Bridge*.

```
"gateway_conf": {
  "gateway_ID": "3133303729005f00",
  /* change with default server address/ports, or overwrite in local_conf.json */
  "server_address": "localhost",
  "serv_port_up": 1700,
  "serv_port_down": 1700,
```

Figura 4.5: Información del *ChirpStack Gateway Bridge* en el archivo *global\_conf.json*.

#### 4.1.2. ChirpStack Gateway Bridge

El *ChirpStack Gateway Bridge* es el encargado de procesar la información que se recibe por parte de la aplicación *Packet Forwarder* por medio del protocolo UDP. Los datos los convierte en formato JSON y los publica por medio de un *broker* MQTT. El *ChirpStack Network Server* está suscrito al *topic* donde el *Gateway Bridge* publica la información, por lo tanto, de esta forma el servidor de red recibe los datos. Este proceso se puede apreciar en la figura 4.6.

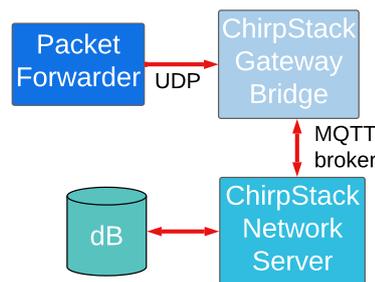


Figura 4.6: Proceso de comunicación entre el *Gateway Bridge* y el *Network Server*.

Este componente necesita de un servidor MQTT para poder publicar la información. Para la realización de este proyecto se utilizó el *broker Eclipse Mosquitto*, el cual se instaló en la misma *Raspberry Pi* que aloja los demás componentes del proyecto. La instalación del *Gateway Bridge*, y los demás recursos que necesita, se muestra en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *ChirpStack* → *chirpstack\_gateway\_bridge* → *Install\_gateway\_bridge.sh* del repositorio [45].

Una vez realizada la instalación del servicio *Gateway Bridge*, su configuración se realiza a través del archivo ubicado en la *Raspberry Pi* en la ruta de directorios *etc* → *chirpstack-gateway-bridge* → *chirpstack-gateway-bridge.toml*. Para editar el archivo *.toml* se utiliza el siguiente comando:

```
sudo nano /etc/chirpstack-gateway-bridge/chirpstack-gateway-bridge.toml
```

En el archivo se configura la dirección IP del servidor MQTT y su puerto de comunicación, además de otros parámetros de seguridad. La configuración realizada para este proyecto se puede consultar en el repositorio que se encuentra en [45] en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *ChirpStack* → *chirpstack\_gateway\_bridge* → *chirpstack-gateway-bridge.toml*.

Para comprobar que el *broker* MQTT se instaló correctamente, basta con ejecutar el siguiente comando y en la salida se debe de visualizar que el servicio está activo y corriendo, como se muestra en la figura 4.7.

```
sudo systemctl status Mosquitto
```

```

● mosquitto.service - Mosquitto MQTT v3.1/v3.1.1 Broker
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/mosquitto.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Mon 2022-10-24 17:11:04 PDT; 1h 10min ago
     Docs: man:mosquitto.conf(5)
           man:mosquitto(8)
  Main PID: 514 (mosquitto)
    Tasks: 1 (limit: 2059)
   CGroup: /system.slice/mosquitto.service
           └─514 /usr/sbin/mosquitto -c /etc/mosquitto/mosquitto.conf

```

Figura 4.7: Estado activo y corriendo del *broker* MQTT.

Si la instalación del *Gateway Bridge* fue exitosa, al ejecutar el siguiente comando en el *prompt*, el servicio debe de estar activo y corriendo como se muestra en la figura 4.8.

```
sudo systemctl status chirpstack-gateway-bridge
```

```

● chirpstack-gateway-bridge.service - ChirpStack Gateway Bridge
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/chirpstack-gateway-bridge.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Mon 2022-10-24 17:11:01 PDT; 18min ago
     Docs: https://www.chirpstack.io/
  Main PID: 511 (chirpstack-gate)
    Tasks: 9 (limit: 2059)
   CGroup: /system.slice/chirpstack-gateway-bridge.service
           └─511 /usr/bin/chirpstack-gateway-bridge

```

Figura 4.8: Estado activo y corriendo del servicio *Gateway Bridge*.

### 4.1.3. ChirpStack Network Server

El *ChirpStack Network Server* es el encargado de recibir los mensajes provenientes de todos los *gateways* asociados a él. Se encarga de procesar la información para suprimir los paquetes redundantes, de programar los mensajes que se envían desde el *ChirpStack Application Server* a los nodos finales y de administrar la capa MAC de LoRaWAN.

Este servicio requiere de una base de datos de *PostgreSQL* para almacenar la información de los *gateways* asociados a él. La instalación del *Network Server*, y los demás recursos que necesita, se muestra en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *ChirpStack* → *chirpstack-network-server* → *Install\_network\_server.sh* del repositorio [45].

Después de instalar el *Network Server*, su configuración se realiza a través del archivo ubicado en la *Raspberry Pi* en la ruta de directorios *etc* → *chirpstack-network-server* → *chirpstack-network-server.toml*. Para editar el archivo *.toml* se utiliza el siguiente comando:

```
sudo nano /etc/chirpstack-network-server/chirpstack-network-server.toml
```

En el archivo *.toml* se indica la información asociada a la base de datos, como el DSN y la contraseña. Además, se especifica la información de la banda de frecuencias en la que trabaja el sistema, los datos del MQTT *broker*, como su dirección IP y su puerto de comunicación, y se puede configurar la zona horaria. La configuración realizada para este proyecto se puede consultar en el repositorio de [45] en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *ChirpStack* → *chirpstack-network-server* → *chirpstack-network-server.toml*.

Si la instalación del *Network Server* fue exitosa, al ejecutar el siguiente comando en el *prompt*, el servicio debe de estar activo y corriendo como se muestra en la figura 4.9.

```
systemctl status chirpstack-network-server
```

```

● chirpstack-network-server.service - ChirpStack Network Server
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/chirpstack-network-server.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Mon 2022-10-24 17:11:01 PDT; 2h 29min ago
     Docs: https://www.chirpstack.io/
  Main PID: 513 (chirpstack-netw)
    Tasks: 10 (limit: 2059)
   CGroup: /system.slice/chirpstack-network-server.service
           └─513 /usr/bin/chirpstack-network-server

```

Figura 4.9: Estado activo y corriendo del servicio *Network Server*.

#### 4.1.4. ChirpStack Application Server

Este servidor es el encargado de administrar las solicitudes de unión de los *end devices*. Cuenta con una interfaz *web* para la administración de usuarios, organizaciones, aplicaciones y dispositivos. Desde la interfaz se pueden monitorear los datos que se reciben por parte de los nodos.

El servidor de aplicación se comunica con el servidor de red a través del puerto 8001 y puede recibir o enviar información a los nodos finales a través de MQTT, *gRPC API* o *RESTful JSON API*, como se muestra en la figura 4.10.

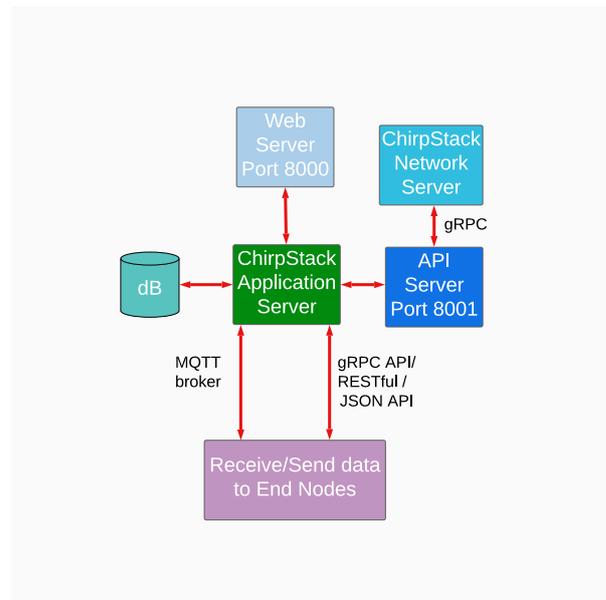


Figura 4.10: Comunicación del *Application Server* con los distintos del servidor *ChirpStack*.

Al igual que el *Network Server*, el *Application Server* hace uso de su propia base de datos de *PostgreSQL*, para almacenar la información de los *gateways*. La instalación del *Application Server*, y los demás recursos que necesita, se muestra en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *ChirpStack* → *chirpstack\_application\_server* → *Install\_application\_server.sh* del repositorio [45].

Luego de instalar el *Application Server*, su configuración se realiza a través del archivo ubicado en la *Raspberry Pi* en la ruta de directorios *etc* → *chirpstack-application-server* → *chirpstack-application-server.toml*. Para editar el archivo *.toml* se utiliza el siguiente comando:

```
sudo nano /etc/chirpstack-application-server/chirpstack-application-server.toml
```

En el archivo *.toml* se realiza la configuración de la base de datos asociada a este servidor. Se definen los datos del *MQTT broker*, como su dirección IP y su puerto de comunicación. Se coloca la dirección IP del *API Server* y su puerto de comunicación y se debe de llenar el campo *jwt\_secret* con una cadena de caracteres generada aleatoriamente. La configuración realizada

para este proyecto se puede consultar en el repositorio [45] en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *ChirpStack* → *chirpstack\_application\_server* → *chirpstack-application-server.toml*.

Si la instalación del *Application Server* es exitosa, al ejecutar el siguiente comando en el *prompt*, se debe de poder observar que el estado del servicio es activo y se encuentra corriendo, como se muestra en la figura 4.11.

```
systemctl status chirpstack-network-server
```

```
● chirpstack-application-server.service - ChirpStack Application Server
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/chirpstack-application-server.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Mon 2022-10-24 17:11:01 PDT; 3h 31min ago
     Docs: https://www.chirpstack.io/
  Main PID: 508 (chirpstack-appl)
    Tasks: 10 (limit: 2059)
   CGroup: /system.slice/chirpstack-application-server.service
           └─508 /usr/bin/chirpstack-application-server
```

Figura 4.11: Estado activo y corriendo del servicio *Application Server*.

#### 4.1.4.1. Añadir *gateways* y dispositivos

Si la configuración de los 4 componentes, anteriormente descrita, es correcta, se podrá acceder desde cualquier navegador instalado en la *Raspberry Pi* a la dirección *http://localhost:8080/* en donde se alojará la versión *web* de *Chirpstack* (figura 4.12). Es importante mencionar que la primera vez que se ingrese, tanto la contraseña como el usuario son *admin*.

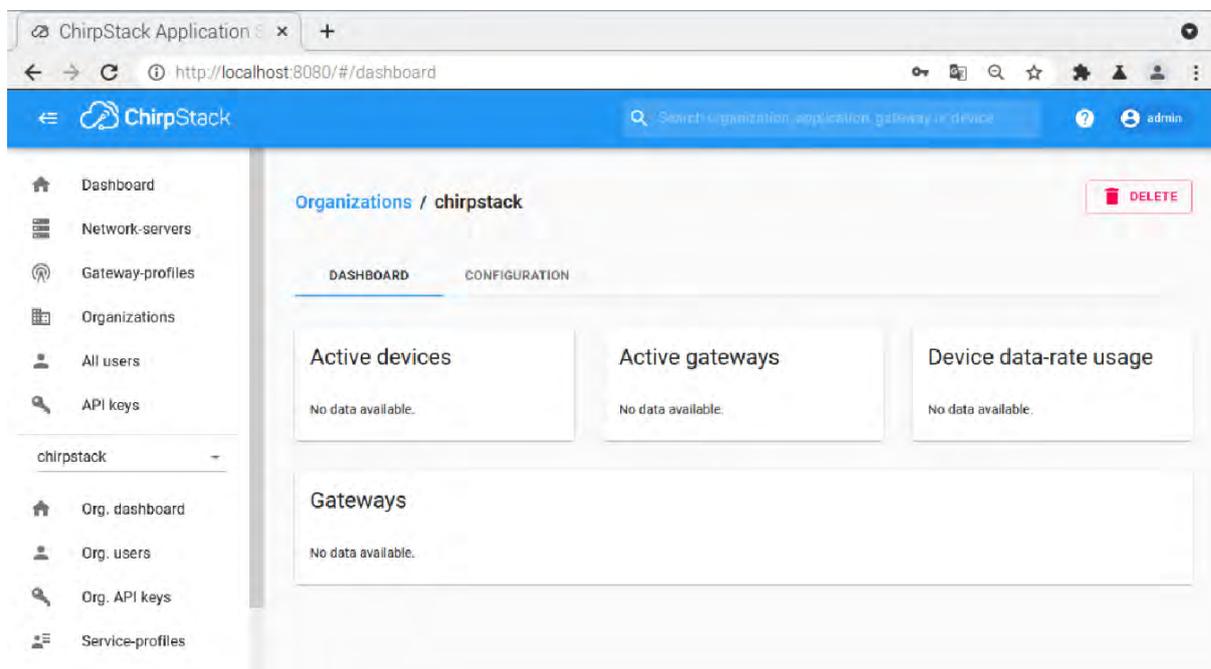


Figura 4.12: Interfaz *web* de *ChirpStack* para la administración de usuarios, organizaciones, aplicaciones y dispositivos.

En esta interfaz *web* se pueden añadir los *gateways* y dispositivos que se van a controlar. El proceso se detalla en el documento *Add devices and gateways to ChirpStack* ubicado en el repositorio [45] en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *ChirpStack* → *chirpstack\_application\_server*.

## 4.2. Configuración del *End Device*

Al concluir con el proceso para integrar el *gateway* y el *end device* a la plataforma *web* de *ChirpStack*, el siguiente paso es asegurar el intercambio de información entre los dos elementos antes mencionados. En este proyecto se utilizó la placa de desarrollo *Wireless Stick Lite* para la implementación del *end device*. La tarjeta se programó utilizando el IDE de *Arduino*. Para preparar el entorno de desarrollo *Arduino* y que se pudiera programar la placa de desarrollo, se consultó la guía publicada en [46].

Después de preparar el entorno *Arduino*, el primer programa que se utilizó es el *OTAA.h*, al cual se puede acceder a través de la ruta *File* → *Examples* → *ESP32\_LoRaWAN* desde el IDE. En este *script* se necesita contar con la licencia que otorga la compañía *HELTEC* a la placa *Wireless Stick Lite*, los parámetros *OTAA* y los parámetros *ABP*. En el programa también se pueden configurar otras opciones como la cantidad de canales que se van a utilizar para la comunicación, la clase de dispositivo *LoRaWAN*, el tiempo entre transmisiones, el número de retransmisiones, la región donde se va a implementar el proyecto, entre otras características.

El *script OTAA.h* es la base a partir de la cual se puede desarrollar cualquier programa orientado a IoT. En dicho *script* se plantea una rutina en la que el dispositivo se inicializa con los parámetros de la región y de *LoRaWAN* asignados, después verifica si está asociado a una red *LoRaWAN* y si no es el caso, intenta unirse a una. Si el dispositivo es aceptado en la red, este comienza con la actividad que se le haya programado, la cual puede ser sensor ciertas variables. Una vez recolectados los datos, el dispositivo los transmite a los *gateways* de su vecindad. Por último, el nodo programa su próxima transmisión de datos y entra en modo *sleep*. Y el proceso se repite cada vez que se vuelve a activar la placa. La rutina anteriormente descrita se ilustra en la figura 4.13.

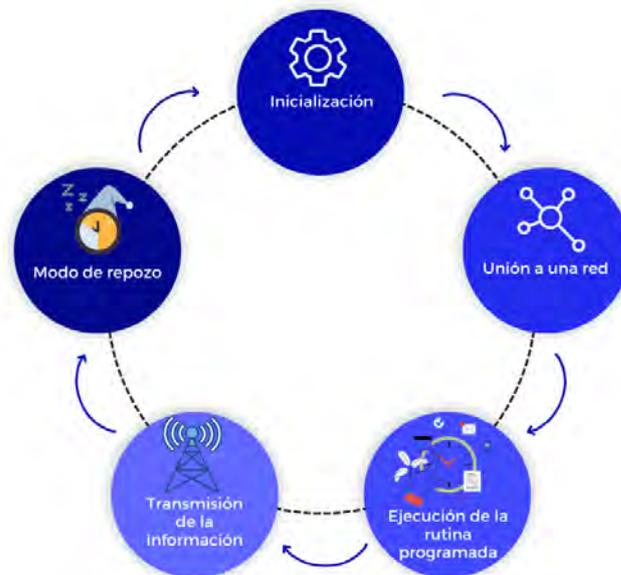


Figura 4.13: Rutina de funcionamiento del dispositivo IoT.

Para obtener la licencia de la tarjeta se debe de realizar el procedimiento mostrado en [47]. En el caso de los parámetros *OTAA* y *ABP*, estos se obtienen de la plataforma *web* de *ChirpStack*, para saber más al respecto, se puede consultar el documento *Add devices and gateways to ChirpStack* ubicado en el repositorio [45] en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *ChirpStack* → *chirpstack\_application\_server*. Si es la primera vez que se intenta comunicar al *end device* con el *gateway*, basta con configurar la licencia de la placa y los parámetros *OTAA*. Los parámetros *ABP* se desbloquearán en la plataforma después de que el dispositivo se intente comunicar con el *gateway*. Una vez que sean accesibles los parámetros *ABP* en la plataforma,

se deben de configurar en el *script*. Un ejemplo de configuración de los parámetros mencionados se puede observar en la figura 4.14, en el caso del campo *AppEui* de los parámetros OTAA, este no se modifica.

```

/*license for Heltec ESP32 LoRaWan, quarry your ChipID relevant license: http://resource.heltec.cn/search */
uint32_t license[4] = {0xD5397DF0, 0x8573F814, 0x7A38C73D, 0x48E68607};

/* OTAA para*/
uint8_t DevEui[] = { 0x22, 0x32, 0x33, 0x00, 0x00, 0x88, 0x88, 0x02 };
uint8_t AppEui[] = { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 };
uint8_t AppKey[] = { 0xf9, 0x4e, 0x3f, 0x87, 0xe4, 0xa6, 0x6d, 0xcb, 0x8e9, 0x1a, 0xba, 0x54, 0x22, 0x5c, 0x8b, 0x01 };

/* ABP para*/
uint8_t NwkSKey[] = { 0x15, 0xb1, 0xd0, 0xef, 0xa4, 0x63, 0xdf, 0xbe, 0x3d, 0x11, 0x18, 0x1e, 0x1e, 0xc7, 0xda, 0x85 };
uint8_t AppSKey[] = { 0xd7, 0x2c, 0x78, 0x75, 0x8c, 0xdc, 0xca, 0xbf, 0x55, 0xee, 0x4a, 0x77, 0x8d, 0x16, 0xef, 0x67 };
uint32_t DevAddr = ( uint32_t )0x007e6ae1;

```

Figura 4.14: Configuración de las claves necesarias para que el *end device* se pueda comunicar con el *gateway*.

Los parámetros establecidos para el funcionamiento del dispositivo de este proyecto fueron:

- Se permitió el método de activación OTAA.
- Se determinó que el dispositivo fuera de clase A.
- Se establecieron únicamente 3 canales para la comunicación.
- Se deshabilitó la funcionalidad ADR.
- Para los mensajes transmitidos se requiere de un *acknowledge*.
- Se estableció una cantidad máxima de 3 retransmisiones.
- Los parámetros regionales se establecieron para la banda de frecuencias ISM EU\_433.

Si se desea consultar los *scripts* utilizados para la configuración de lo descrito en esta sección, se puede revisar el repositorio [45] en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *EndDevice*.

## 4.3. Protocolo de comunicación

### 4.3.1. Transmisión

Dentro del archivo *OTAA.h*, se define la función *prepareTxFrame*, en la cual se debe determinar el proceso para recolectar la información que después se transmitirá por parte del *end device* al *gateway*. El tamaño máximo de la trama por cada mensaje es de 64 *bytes*.

Un *buffer* es una estructura de información que tiene un tamaño predefinido de  $x$  *bytes*. Si se tiene un *buffer* de tamaño dos, significa que en esta estructura se pueden almacenar dos valores entre 0 y 255, pero también un solo valor entre 0 y 65535 ( $256^2 - 1$ ).

Si se desean transmitir valores mayores a 255, existen diferentes técnicas para realizarlo, sin embargo, la más popular es utilizando *words*, las cuales se definen como estructuras de dos *bytes*. En *Arduino* existe el tipo de dato *int* para la representación de números enteros, el cual es una *word*. *Arduino* cuenta con las funciones *highByte()* y *lowByte()*, las cuales permiten extraer el *byte* izquierdo y el *byte* derecho de un dato de tipo *int*. Esto hace que cualquier valor dentro del rango de 0 y 65535, sea fácil de codificar. Un ejemplo de codificación en *Arduino* se muestra en 4.1.

4.1: Ejemplo de codificación de tramas en *Arduino*.

```
static void prepareTxFrame( uint8_t port )
```

```

{
  appDataSize = 2; //AppDataSize max value is 64
  int value = 50000;
  appData[0] = highByte(value);
  appData[1] = lowByte(value);
}

```

Para transmitir números con decimales en este proyecto, se multiplica el valor por una constante que lo convierta en entero, por lo general se utilizan potencias de 10. Para decodificar el mensaje que se recibe, se divide el valor por la misma constante que se multiplicó. Por ejemplo, el sensor de pH y de temperatura utilizados en este proyecto cuentan con una resolución de  $\pm 0.001$ , por lo que para considerar todos los decimales de las lecturas, estas se multiplicaron por 1000 para poder transmitir la información del *end device* al *gateway* y una vez recibidos los datos, se dividieron entre 1000 para obtener el valor original.

Tomando en cuenta lo descrito anteriormente, solo queda establecer la forma en que se identificaría cada sensor, para poder asociar la información que se reciba al parámetro correspondiente. Para simplificar este proceso se asoció un valor entero único e irrepetible como *ID* a cada uno de los sensores. A continuación se enlistan los valores relacionados a cada parámetro ennumerados con su respectivo *ID*.

1. Temperatura
2. pH
3. TDS
4. Oxígeno disuelto

Para la construcción de la trama para la transmisión de datos se necesitan 3 *bytes* por cada sensor, en la figura 4.15 se muestra la representación de cada uno de los campos que contiene la trama.

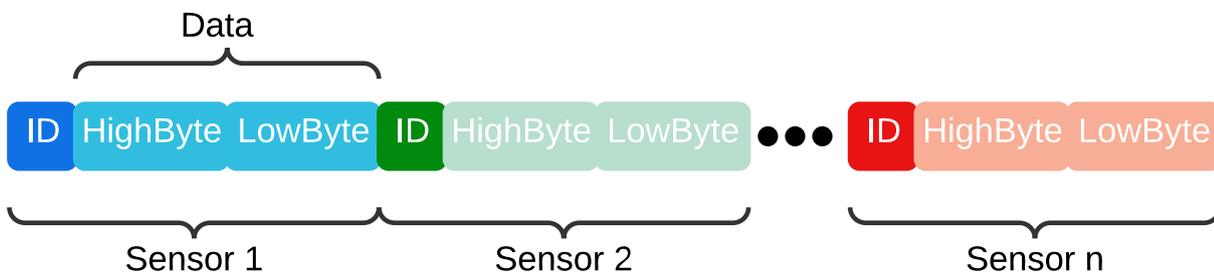


Figura 4.15: Estructura de la trama utilizada para la transmisión de datos.

En el caso de este proyecto, como el sistema se diseñó para la medición de 4 parámetros de la calidad del agua, el tamaño de la trama que se envía es de 12 *bytes*.

En este proyecto la placa *Wireless Stick Lite* se encarga del control de los sensores y de la ejecución de sus rutinas para la recolección de datos. Además, construye el arreglo de *bytes* para la transmisión de la información. Para conocer el funcionamiento y la forma de programar cada uno de los sensores, detalladamente, se recomienda visitar la página oficial de *Atlas Scientific* [3] y en el caso del sensor de TDS se recomienda la página citada en [40]. El *script* realizado en este proyecto se encuentra en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *EndDevice* → *aquaculture\_project.ino*, del repositorio [45].

### 4.3.2. Recepción

Para decodificar los datos, se sabe que la trama cuenta con un número de *bytes* que es múltiplo de 3, así que la trama recibida se divide en pequeñas subtramas de 3 *bytes*. De

cada subtrama se conoce que el primer *byte* corresponde al identificador del sensor y los dos últimos *bytes* corresponden a la lectura del sensor.

El proceso de decodificación de la información depende del lenguaje de programación que se utilice, pero simplemente se necesita realizar un desplazamiento de *bits* y la concatenación de los mismos. Un ejemplo de decodificación en *JavaScript* se muestra en 4.2.

4.2: Ejemplo de decodificación de tramas en JavaScript.

```
function Decode(fPort, bytes, variables) {
  var data = (bytes[0] << 8) |(bytes[1]);
}
```

Una vez que el *end device* transmite la información a través de LoRaWAN, la pila de *ChirpStack* es la encargada de procesar los datos y de convertirlos en formato JSON para publicarlos a través del *broker* MQTT.

Para poder realizar lo anterior, en la plataforma *web* de *ChirpStack* se puede definir un códec de carga útil, el cual utiliza el servidor de aplicaciones de *ChirpStack* para codificar y decodificar la carga útil que se recibe o se envíe a los dispositivos finales. Los pasos a seguir para poder acceder al códec se detallan en el documento *How to access the section to define the CODEC in ChirpStack*, ubicado en el repositorio [45] en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *ChirpStack* → *chirpstack\_application\_server*.

En esta sección se explicará la función *Decode* del códec de *ChirpStack*.

La función *Decode* recibe tres parámetros, los cuales son *fPort*, *bytes* y *variables*. El primer parámetro contiene el número de puerto de LoRaWAN que se utiliza para la comunicación, el segundo parámetro contiene la matriz de *bytes* con la información recopilada por el *end device* y el último parámetro contiene las variables del dispositivo.

La función *Encode* debe de retornar un objeto como el que se muestra en la figura 4.16.



```
objectJSON: {} 4 keys
1: 22.42
2: 7.522
3: 2.3
4: 4.32
```

Figura 4.16: Estructura del objeto que retorna la función *Encode*.

El servidor de aplicaciones de *ChirpStack* se encarga de convertir el objeto a JSON, para posteriormente publicarlo por medio de MQTT. El *script* de la función *Encode* desarrollada en este proyecto se encuentra en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *EndDevice* → *aquaculture\_project.ino*, del repositorio [45].

## 4.4. Procesamiento de los datos

A continuación se describirán cada una de las actividades implicadas en el procesamiento de la información, sin embargo, si se quiere ver la integración de todas las operaciones descritas en términos de programación se puede revisar el *script* *Integration\_mqtt\_db\_pb\_smtp.py* en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *Data\_processing*, del repositorio [45].

### 4.4.1. Depuración de la información

A través del *broker* MQTT, *ChirpStack* publica los datos que obtiene por parte de los *end devices* en formato JSON, además de otros tipos de eventos. Para poder acceder a la información que proporciona *ChirpStack* sobre MQTT es necesario suscribirse al tema de interés.



aplicación. Por otro lado, en la figura 4.18(b) se puede observar el registro del mismo evento a través de la plataforma *web* de *ChirpStack*.

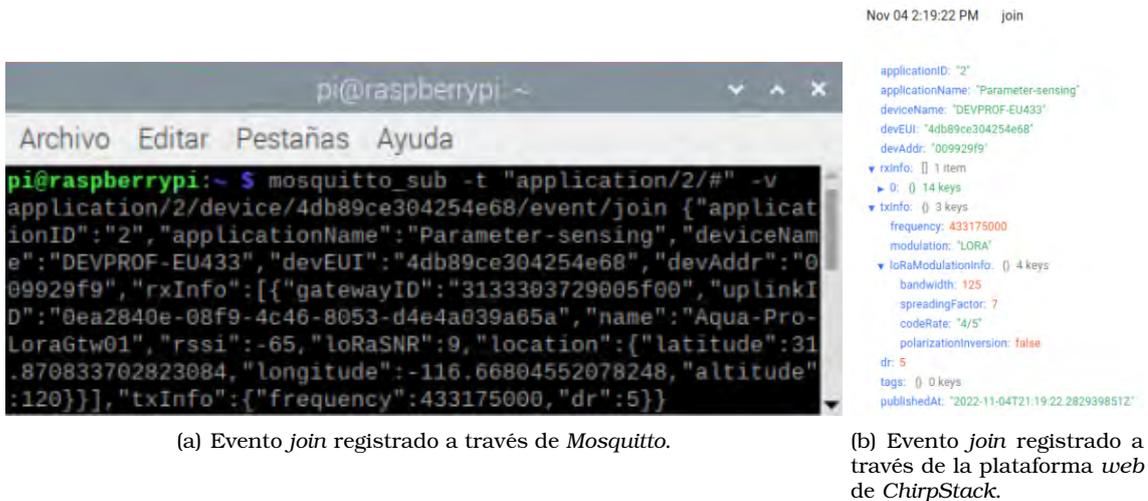


Figura 4.18: Ejemplo de evento *join* recopilado por medio de *Mosquitto* y *ChirpStack*.

*ChirpStack* a través del evento *up* publica la información que recibe por parte de los *end devices*, sin embargo en la estructura JSON no solo se incluyen las lecturas de los sensores, sino que también cuenta con datos que hacen referencia a la configuración del dispositivo y del *gateway* en la plataforma *web* de *ChirpStack*, además de datos de capa física como la frecuencia de transmisión o la localización geográfica. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 4.19. Para poder obtener la información de interés se necesita depurar la estructura JSON que se recibe.

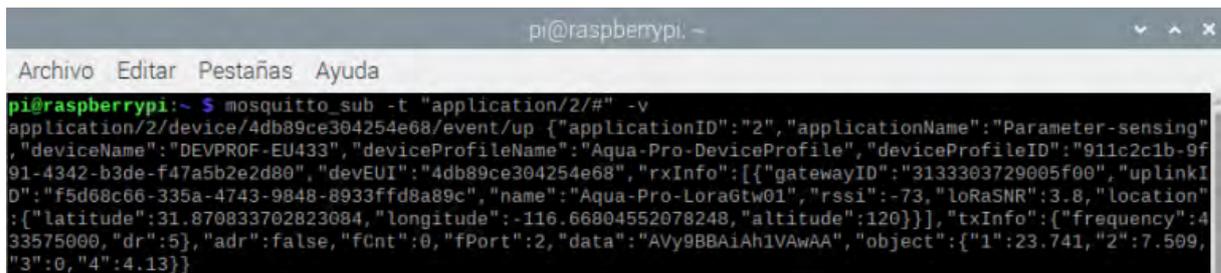


Figura 4.19: Evento *up* registrado a través de *Mosquitto*

El tratamiento de los datos se puede realizar a través de un *script* codificado en cualquier lenguaje de programación que cuente con soporte para el protocolo de comunicación MQTT. En este proyecto se utilizó *Python* para el tratamiento de la información, a través de la biblioteca *Paho*, la cual proporciona una clase de cliente compatible con MQTT.

Por medio de *Paho* en *Python* se crea un cliente MQTT el cual se suscribe a todos los eventos *up* que publique el servidor de *ChirpStack*. Realizado lo anterior, el cliente *mqtt* se mantiene constantemente activo hasta que un mensaje es publicado, cuando este evento sucede, la estructura JSON recibida se convierte en una estructura de tipo diccionario, definida en *Python*, para acceder fácilmente a datos como las lecturas de los sensores y el *Dev.EUI* del dispositivo transmisor.

#### 4.4.2. Almacenamiento de la información

Al contar con la información de interés obtenida de la estructura JSON que publica *ChirpStack*, lo siguiente es contar con un espacio para poder almacenar y acceder a los datos cuando sea necesario. Por lo que se procedió a realizar el diseño de una base de datos considerando las siguientes reglas de negocio:

- Una boya o dispositivo final puede contar con uno o más sensores para monitorear la calidad del agua.
- El dispositivo final o boya se va a identificar a través de su *Dev\_EUI* y su valor de aplicación especificado en la plataforma de *ChirpStack*. Se le puede añadir un nombre.
- Existen varios modelos de sensores que pueden monitorear el mismo parámetro de la calidad del agua.
- Los sensores pueden realizar una basta cantidad de mediciones al día.
- Las lecturas realizadas por un sensor deben de contar con la fecha y hora en que se realizaron, es opcional reportar el voltaje que se midió.
- Algunos sensores se pueden calibrar, por lo que se debe de especificar la fecha de calibración, el valor de la solución tampón que se utilizó y si el proceso fue exitoso.
- Al vigilar los parámetros de la calidad del agua para la actividad de acuicultura, se necesita saber el rango de valores en los que se consideran aceptables los valores registrados.
- En caso de que se detecte una lectura fuera del rango de valores aceptables, se debe de saber si ya se ha reportado este suceso.

Considerando las reglas de negocio, especificadas con anterioridad, se realizó el modelo entidad/relación tanto conceptual (figura 4.20), como lógico (figura 4.21), de la base de datos.

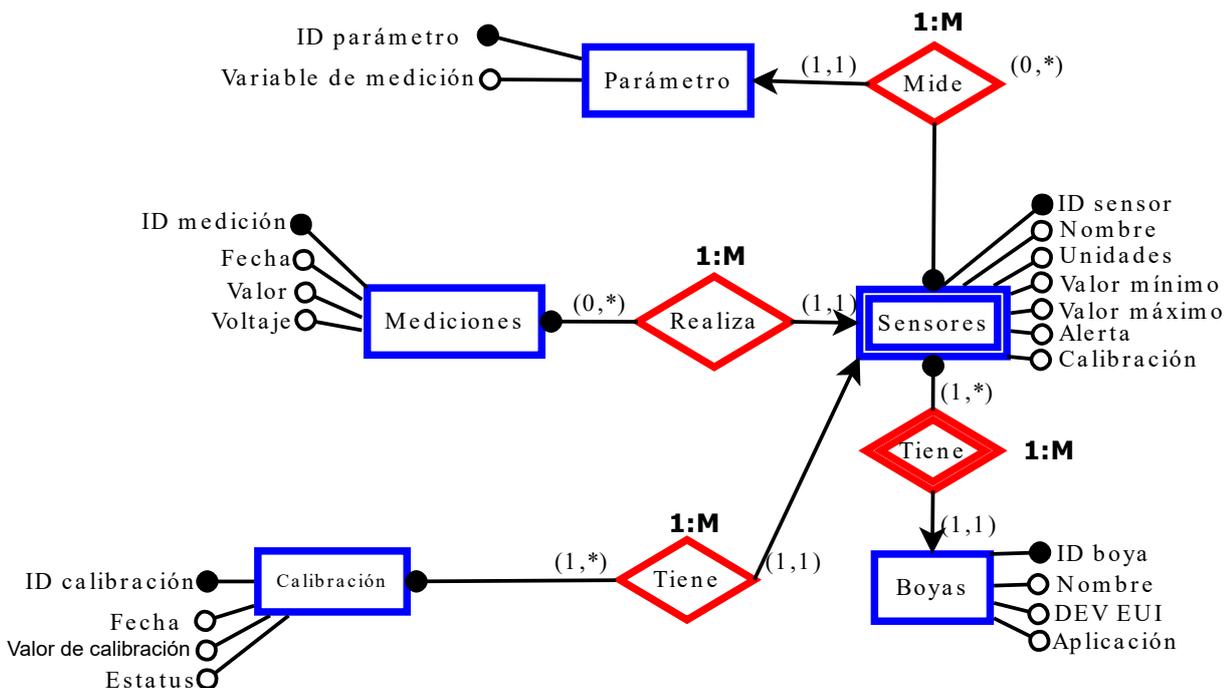


Figura 4.20: Modelo conceptual de la base de datos

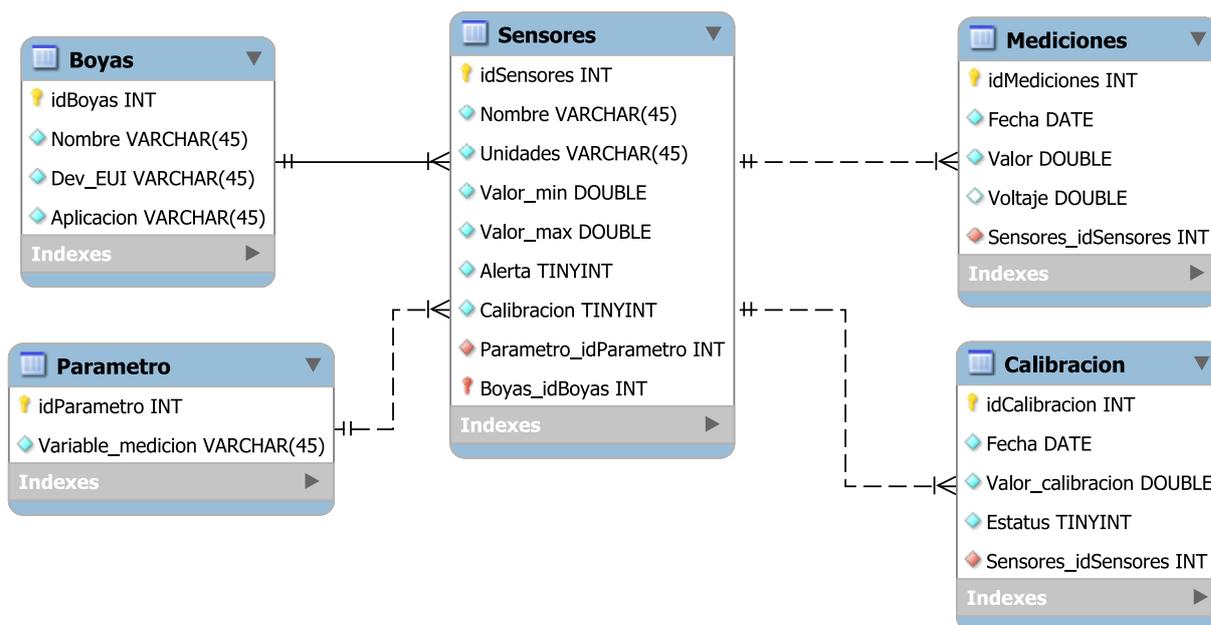


Figura 4.21: Modelo lógico de la base de datos

Más adelante se hablará de la implementación de la base de datos en la sección donde se mencione la instalación del servidor LAMP.

Al contar con la base de datos, se puede acceder a esta desde el lenguaje de programación *Python* utilizando la biblioteca *mysql*, con la cual se pueden ejecutar sentencias SQL para realizar consultas, modificaciones, inserciones y procesos de eliminación de los datos que se hayan guardado en la base.

#### 4.4.3. Sistema de alertas

Al contar con el almacenamiento de una base de datos y el proceso de depuración de la información que se recibe, se puede realizar la implementación de un sistema de alertas.

Para la realización de dicho sistema se consideró que fuese simple y fácil de ejecutar, que emitiera señales de alerta ante registros de lecturas inesperadas, que el sistema actuara en tiempo real y que se integrara a una aplicación móvil para poder alertar al usuario final en cualquier lugar donde se encontrase.

Dado que los procesos anteriores se han controlado a través de *Python*, se realizó una investigación para determinar que herramientas compatibles con dicho lenguaje de programación podrían utilizarse para efectuar una alerta. Además, se consideró que hoy en día el mayor porcentaje de la población cuenta con un celular inteligente al cual tiene asociada una cuenta de correo. Se descartaron aplicaciones de mensajería instantánea debido a que se tenía que contar con un número celular y en ocasiones se necesitaba tener activo un plan telefónico.

Es por lo anterior que se optó por utilizar la aplicación *Pushbullet*, a través de la cual se puede realizar la implementación de notificaciones *push*, solo basta contar con una cuenta de correo de *gmail* e ir agregando como contactos a todos aquellos a los que se les quiera realizar la notificación. Esta aplicación cuenta con un API compatible con *Python* a través de la cual se pueden automatizar los mensajes de alerta y enviar las notificaciones *push* cada vez que se detecte una irregularidad en los datos recolectados por el *end device*. Cabe destacar que es necesario instalar la aplicación en todos los dispositivos en los que se quiera recibir notificaciones. Se puede consultar el archivo *Use\_Pushbullet.pdf* en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *Data\_processing* del repositorio [45], para instalar y asociar *Pushbullet* con sus dispositivos.

Existe la biblioteca *pushbullet* para *Python* con la cual se pueden realizar acciones como enviar notificaciones *push*, listas, direcciones *links* y hasta documentos, además de que se

pueden añadir contactos y obtener una lista de estos. Para poder interactuar con esta biblioteca, se necesita el *token* de accesibilidad asociado al correo registrado en la aplicación. Dicho *token* se puede obtener desde la plataforma de *Pushbullet*, como se puede observar en la figura 4.22.

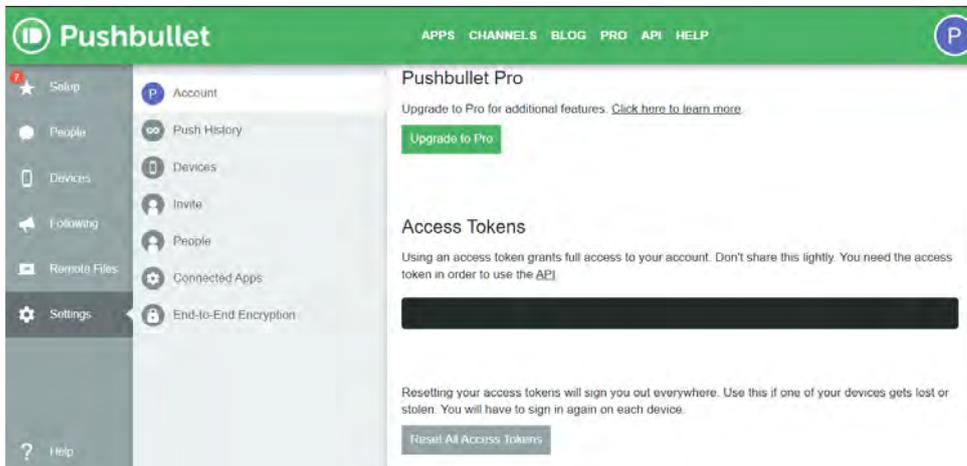


Figura 4.22: Ubicación del *token* de acceso en *Pushbullet*.

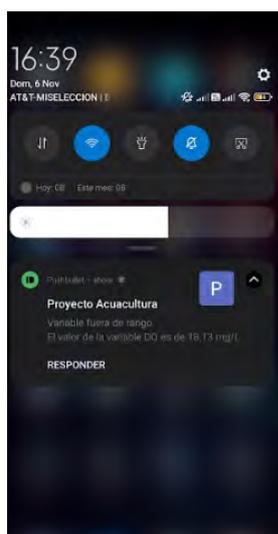
Pese a las ventajas que presentaba la aplicación de *Pushbullet*, también se consideró implementar el sistema de alertas a través del envío de un correo electrónico. Para contar con otra opción que fuera más cómoda para el usuario en caso de que no deseara realizar la instalación de la aplicación. Para este propósito se utilizó la biblioteca *smtplib* en *Python*.

El mensaje base para alertar al usuario en caso de lecturas irregulares se compone de los siguientes elementos:

- Título : Variable fuera de rango.
- Cuerpo del mensaje: El valor de la variable [parámetro] es de [lectura].

En el cuerpo del mensaje, el parámetro es la variable de la cual se detectó una lectura fuera de los rangos establecidos y también se notifica sobre el valor de la lectura para que el usuario final considere la gravedad del suceso.

La rutina que lleva a cabo el sistema de alertas consiste en analizar los datos que se reciben por parte de los dispositivos finales. Se revisa que las lecturas realizadas por parte de los sensores se encuentren dentro del rango almacenado en la base de datos. Al detectar algún valor que no esté dentro del rango especificado, se procede a enviar la alerta a través de *Pushbullet*, por *email* o por medio de ambas. En la figura 4.23(a) se puede observar una alerta enviada a través de *Pushbullet* y en la figura 4.23(b) se puede ver una alerta enviada a través de correo electrónico.



(a) Alerta recibida a través de la aplicación *Pushbullet*.



(b) Alerta recibida a través de correo electrónico.

Figura 4.23: Ejemplo de mensajes enviados a través del sistema de alertas.

## 4.5. Diseño y construcción del dispositivo IoT

En las siguientes subsecciones se presenta el diseño y la construcción de cada uno de los componentes que forman parte del de la sonda multiparamétrica o dispositivo final.

### 4.5.1. Sistema de registro de datos

El sistema para la recolección de datos está compuesto y controlado principalmente por la placa *Wireless Stick Lite*, cuya rutina se programó a través del IDE de Arduino. El objetivo principal de este sistema es recolectar información sobre la calidad del agua, a través de sensores, y compartir los datos al *gateway* por medio de LoRaWAN, en tiempo real. Posteriormente, el *gateway* se encarga del procesamiento de la información.

El sistema de recolección de datos cuenta con el modo suspensión, el cual permite al sistema reducir su consumo energético, en el período en el que no se encuentra recopilando información.

Para el desarrollo de este prototipo, se utilizaron cuatro sensores para medir indicadores físico-químicos que son utilizados para determinar la calidad del agua. Los parámetros medidos son la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y los TDS. A excepción del sensor de TDS, los demás sensores utilizados son de la marca *Atlas Scientific*, los cuales cuentan con una placa protectora que aísla a los circuitos eléctricamente, tienen una resolución menor a  $\pm 0.01$  unidades, pueden ser alimentados con 3.3V o 5V, además cuentan con los protocolos UART e I<sup>2</sup>C para la transmisión de datos, los cuales solo requieren de dos líneas para la comunicación con la placa de control.

El sensor de TDS es análogo y puede ser alimentado con 3.3V o 5V.

Se realizó una prueba preliminar de conexión de todos los componentes, para verificar la compatibilidad e integración en el sistema de recolección de datos, esto por medio de una *proto-board*. El esquema de conexión se puede ver en la figura 4.24. Como se ha especificado con anterioridad, los programas involucrados en este sistema se pueden consultar en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *EndDevice* → *aquaculture-project.ino* del repositorio [45].

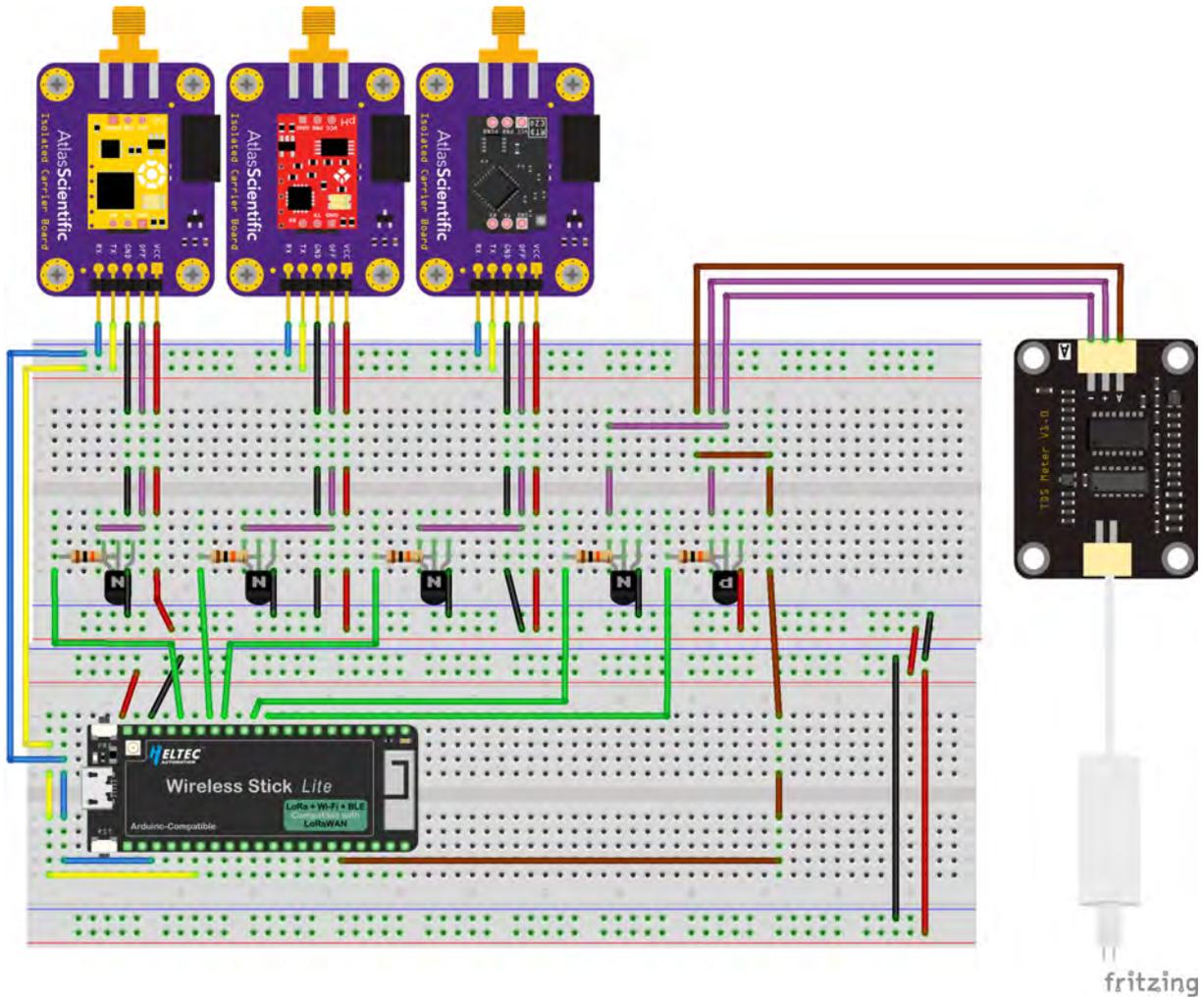


Figura 4.24: Diagrama de conexiones que muestra los sensores conectados al sistema de registro de datos.

En el diagrama de la figura 4.24, las conexiones amarillas (SCL) y azules (SDA) representan el bus de datos del protocolo I<sup>2</sup>C a través del cual se comunican la placa de control y los sensores. Las líneas de color rojo (VCC) y negro (GND) hacen referencia a la alimentación de los componentes. El color verde se utilizó para representar que por medio de esa conexión se envía la señal a través de la cual se activa cada uno de los sensores para que realice su rutina. El color morado representa, en el caso de los sensores de la marca *Atlas Scientific*, el pin de la placa a través del cual se controla su estado activo o inactivo. En el caso del sensor de TDS, representan el circuito que se utilizó para poder aislarlo eléctricamente y alimentarlo, solo cuando es necesario. Por último, el color café representa la conexión por medio de la cual, la placa *Wireless Stick Lite* recibe la señal analógica del sensor de TDS. Los transistores utilizados en el diseño cumplen con la funcionalidad de ser interruptores para activar o desactivar ciertos sensores cuando se requiera y disminuir el consumo energético del sistema.

Al comprobar que todo el sistema tenía un correcto funcionamiento en su versión de *proto-board*, se procedió a realizar el diseño de una placa de circuito impreso (PCB), con el fin de aportarle modularidad al proyecto, ya que en caso de que cualquier componente fallase, sería fácil retirarlo y reemplazarlo. Para este fin se utilizó el *software* libre *EasyEDA*, el cual cuenta con una gran cantidad de componentes para utilizar y su comunidad realiza constantemente aportes para mejorar el programa.

El diseño esquemático realizado en *EasyEDA* se puede observar en la figura 4.25, el cual

representa las conexiones mostradas en la figura 4.24.

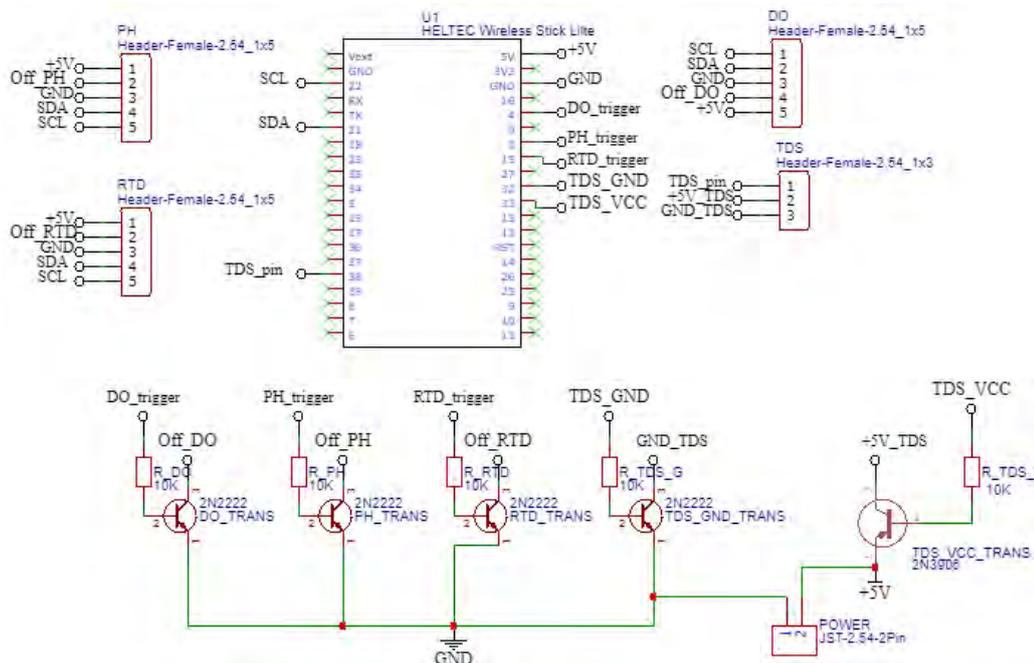


Figura 4.25: Esquema de conexiones realizado en el software EasyEDA.

Con EasyEDA a partir del diseño esquemático se puede crear el PCB y generar el archivo gerber, el cual es fundamental para poder construir la placa. En la figura 4.26 se puede observar la PCB creada para este proyecto.

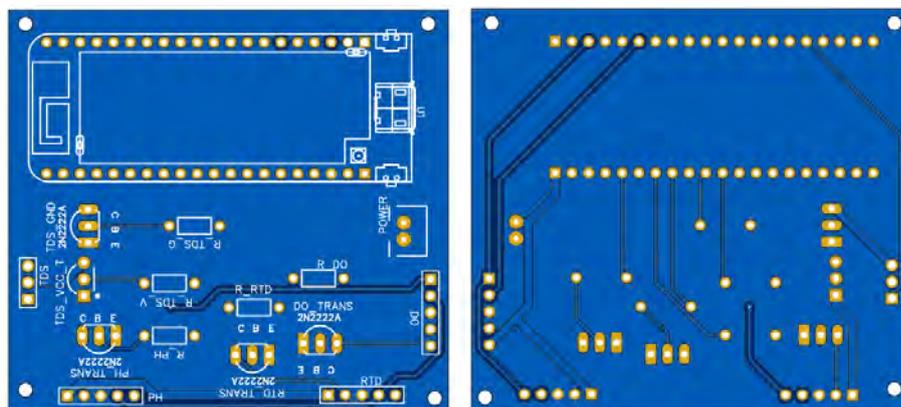


Figura 4.26: PCB generada a partir del diseño esquemático en EasyEDA.

### 4.5.2. Requerimiento energético

Para alimentar el sistema de recolección de datos, se planteó el objetivo de hacer que el dispositivo fuese autosustentable y que pudiera adaptarse a cualquier entorno donde se utilizara. Para cumplir con este objetivo se realizó una amplia investigación sobre sistemas híbridos de alimentación, los cuales en inglés son conocidos como Hybrid Energy Storage System (HESS). Estos sistemas combinan un arreglo de ultracondensadores con baterías alimentados por paneles solares. Dicha combinación aumenta la densidad de potencia del sistema en general. El ultracondensador funciona en condiciones de alta potencia, lo que reduce la tensión del consumo de corriente de la batería. Sin embargo, en artículos como [48] y [49], se explica

que este tipo de sistemas son utilizados en proyectos que demanden una gran cantidad de potencia y que cuenten con paneles solares de nivel industrial.

Al no ser viable la implementación de un HESS para este proyecto, se continuó buscando cómo cumplir con el objetivo antes planteado. Fue de esta forma que se halló el módulo de gestión de energía solar de la marca *WAVESHARE*, el cual proporciona una salida regulada de  $5V/1A$ . Este módulo cuenta con la ventaja de que puede ser alimentado por medio de paneles solares, por una batería de Litio de  $3.7V$  o por medio de conexión micro USB.

Al contar con el módulo *WAVESHARE*, el dispositivo IoT se podría implementar en cultivos de acuicultura en interiores, donde se podría energizar a través de una conexión eléctrica y en caso de que se presentara una falla en el servicio eléctrico, el sistema podría seguir funcionando por medio de baterías. De igual forma, se podría implementar en cultivos a la intemperie, donde a través de paneles solares se le brindara al sistema la energía para funcionar y recargar las baterías durante el día. Finalmente, en la noche, el dispositivo continuaría funcionando utilizando la energía de las baterías.

Se seleccionó la batería Li-Po *104050* recargable de  $3.7V$  con capacidad de  $2500\text{ mAh}$ , debido a su alta capacidad, reducido tamaño y bajo costo. Su temperatura de funcionamiento oscila entre los  $-20^{\circ}C$  y los  $60^{\circ}C$ , además cuenta con 800 ciclos de carga completa lo que proporcionaría cerca de tres años de vida útil, si se carga-descarga diariamente.

La rutina que ejecuta el sistema de recolección de datos se podría dividir en tres procesos. Estos procesos son: el modo de suspensión, la recolección de información y la transmisión de los datos. Durante el modo de suspensión, el sistema cuenta con un consumo de  $20\text{ mA}$  y el mínimo tiempo que se le puede programar al sistema para este modo es de 60 segundos. El proceso para recolectar los datos de los sensores tiene un consumo de  $96\text{ mA}$  y a cada sensor le toma cuatro segundos ejecutar su rutina, por lo que en conjunto el proceso dura 16 segundos. Por último, para la transmisión de la información, el sistema consume  $62\text{ mA}$  por un periodo de 41.21 milisegundos. El proceso anteriormente descrito se puede observar en la figura 4.27.

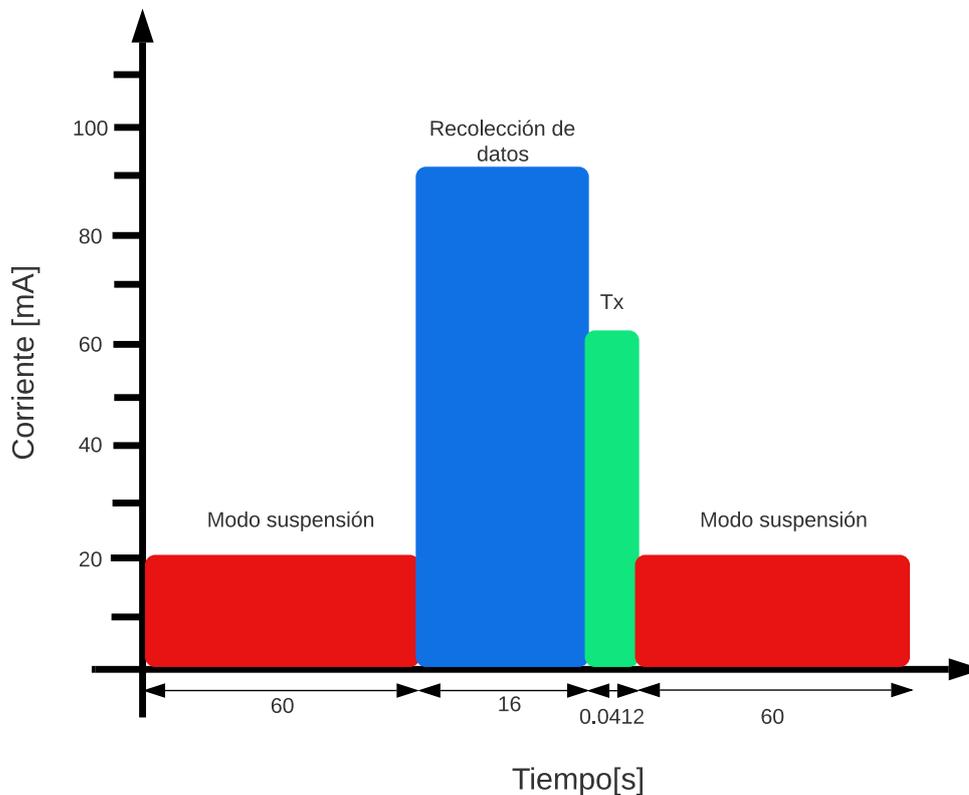


Figura 4.27: Rutina que ejecuta el sistema de recolección de datos.

El tiempo de transmisión también es conocido como Time on Air (ToA) y para calcularlo se realiza el siguiente proceso. Primero se obtiene la duración del símbolo en segundos, para el cual se considera un SF de siete y un ancho de banda de  $125\text{ kHz}$ . El proceso para realizar el cálculo se puede observar en 4.1.

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{2^{SF}}{BW} \\ T_s &= \frac{2^7}{125[\text{kHz}]} \\ T_s &= 1.024[\text{ms}] \end{aligned} \quad (4.1)$$

Después se calcula el tiempo que se tardaría en transmitir el preámbulo del paquete, para esto se requiere conocer la duración del símbolo y los símbolos que lo conforman, los cuales son ocho. El proceso para realizar el cálculo se puede observar en 4.2.

$$\begin{aligned} T_{pre} &= (n_{pre} + 4.25)T_s \\ T_{pre} &= (8 + 4.25)(1.024[\text{ms}]) \\ T_{pre} &= 12.544[\text{ms}] \end{aligned} \quad (4.2)$$

Para conocer el tiempo que se tomaría en transmitir la carga útil del paquete se necesita conocer la duración del símbolo, el tamaño de la carga útil (12 bytes), el valor del Spreading Factor, el valor de los campos CRC y del *header* ( que por *default* se establecen en uno y en cero, respectivamente), si la optimización de baja tasa de datos está habilitada (uno) o deshabilitada (cero), y por último, la tasa de codificación que es de uno. El proceso para realizar el cálculo se puede observar en 4.3.

$$\begin{aligned} T_{pay} &= T_s \left( 8 + \max \left( \text{ceil} \left( \frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)} \right) (CR + 4), 0 \right) \right) \\ T_{pay} &= (1.024[\text{ms}]) \left( 8 + \max \left( \text{ceil} \left( \frac{8(12) - 4(7) + 28 + 16(1) - 20(0)}{4(7 - 2(0))} \right) (1 + 4), 0 \right) \right) \\ T_{pay} &= (1.024[\text{ms}]) (8 + \max (20, 0)) \\ T_{pay} &= (1.024[\text{ms}]) (28) \\ T_{pay} &= (1.024[\text{ms}]) (28) \\ T_{pay} &= \end{aligned} \quad (4.3)$$

Por último, para conocer el ToA se suman los tiempos de transmisión de la carga útil y del preámbulo. El proceso para realizar el cálculo se puede observar en 4.4.

$$\begin{aligned} ToA &= T_{pre} + T_{pay} \\ ToA &= 12.544[\text{ms}] + 28.672[\text{ms}] \\ T_{pre} &= 41.21[\text{ms}] \end{aligned} \quad (4.4)$$

Sin embargo, al añadir al sistema de recolección de datos la placa WAVESHARE y realizar la caracterización de todo el sistema en conjunto, se encontró que se requieren  $135\text{ mA}$  para su correcto funcionamiento, sin importar el proceso que se esté llevando a cabo. Con la batería como única fuente de alimentación, el sistema puede contar con una autonomía de aproximadamente 18 horas antes de que se quede sin energía, por lo tanto, el proceso de cosecha de energía debe de realizarse a medida que se acerca el período de 18 horas.

En la figura 4.28 se puede ver el sistema diseñado para cumplir con el requerimiento energético del dispositivo IoT.

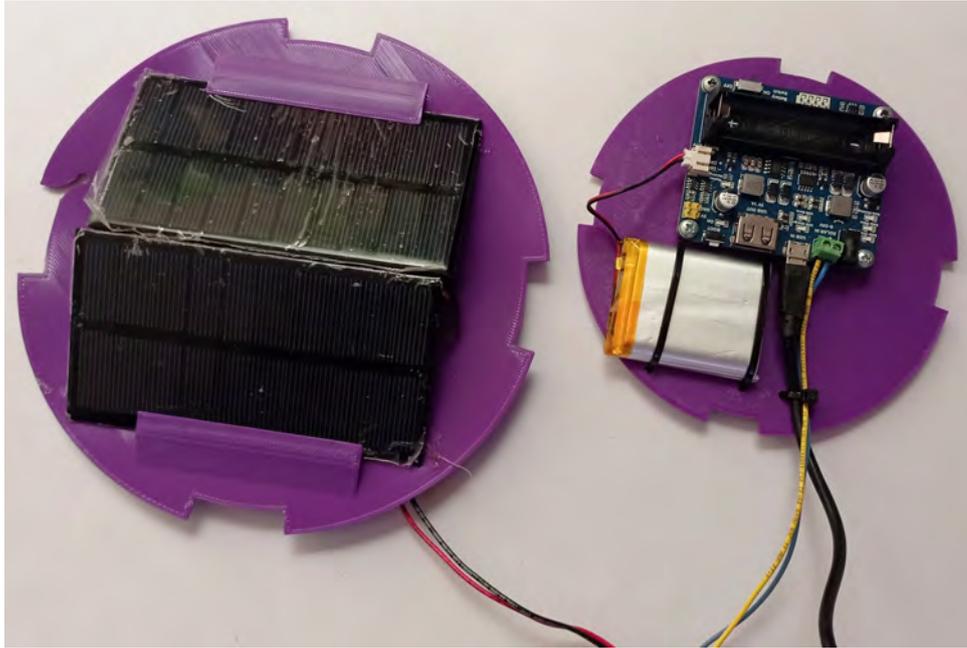


Figura 4.28: Sistema de alimentación para el dispositivo IoT.

Para realizar la cosecha de energía solar se construyó un arreglo de dos paneles solares conectados en paralelo, del cual se obtienen  $360\text{ mAh}$  a un voltaje de  $6\text{ V}$ . En [50] se menciona que en Ensenada, el día más corto con luz solar tuvo una duración aproximadamente de 10 horas, tomando en consideración este dato, durante 10 horas el sistema de paneles solares es capaz de proporcionar la energía suficiente para que funcione el circuito de recolección de datos y puede brindar una carga de  $225\text{ mAh}$  a la batería. Al final del periodo de cosecha de energía, la batería contaría con una capacidad de  $2250\text{ mAh}$ , lo cual le brindaría al sistema una autonomía mayor a 16 horas. Considerando que el día tiene 24 horas, la autonomía que necesita el sistema es de 14 horas antes de que se realice el proceso de cosecha de energía, por lo que el sistema de paneles solares es suficiente para hacer que el dispositivo IoT sea autosustentable.

#### 4.5.3. Diseño y construcción de la estructura de alojamiento del dispositivo IoT

El prototipo de dispositivo IoT se diseñó para medir y compartir la información de cuatro variables estrechamente relacionadas con la calidad del agua. No obstante, el sistema debe de poder desplegarse en sistemas de cultivo como los que se muestran en la figura 4.29.



(a) Granja de cultivo de atún en el mar

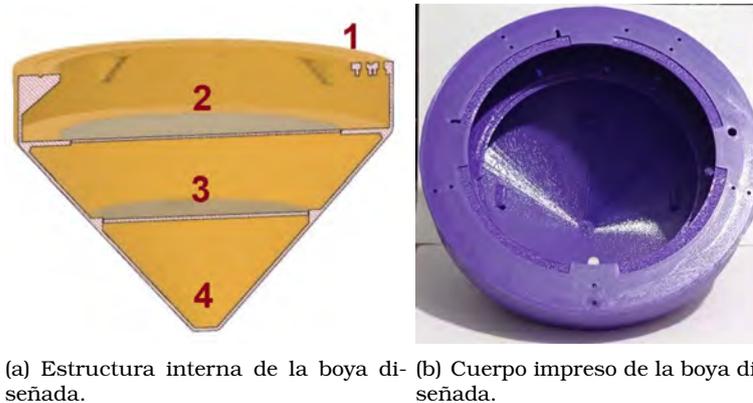
(b) Tanque de cultivo de trucha arcoiris

Figura 4.29: Ejemplos de granjas de cultivo acuícola

Es por lo anterior que la placa base del prototipo, los sensores y el sistema de alimentación deben de encapsularse herméticamente en una estructura impermeable para evitar fugas que puedan dañar los componentes electrónicos. Además, dicha estructura debe de contar con flotabilidad para que sea fácil de identificar y no se hunda por la fuerza del agua.

Para la fabricación de la estructura se planteó realizar su diseño en el *software Fusion 360* y utilizar la impresión 3D para generar el cuerpo. El material seleccionado para imprimir la estructura del dispositivo fue PETG, el cual cuenta con propiedades como flexibilidad, fuerza, resistencia a la temperatura y al impacto, además de ser impermeable. El diseño del cuerpo de la estructura se basó en una boya marina.

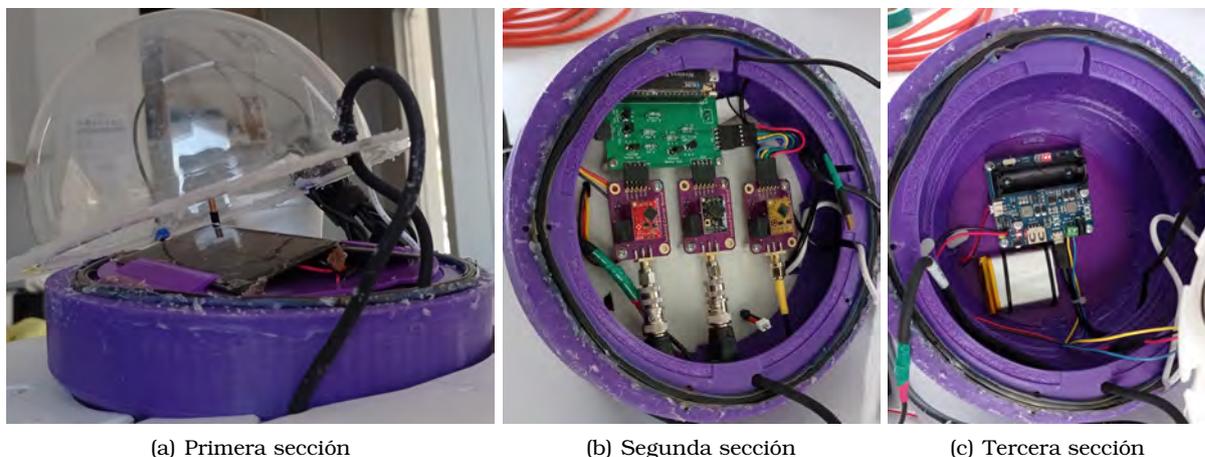
El diseño final de la carcasa del prototipo cuenta con cuatro secciones, como se puede observar en la figura 4.30(a). La primera sección está destinada a resguardar los paneles solares utilizados por el prototipo con el fin de cosechar la energía solar. La segunda sección contendrá a los circuitos que conforman al sistema de registro de datos. La tercera sección alberga al sistema de alimentación del equipo. Por último, la cuarta sección de la boya se llena de algún material pesado, en caso de que el peso de los componentes que conforman al prototipo no fuera el suficiente para mantener bajo el agua las sondas de los sensores. Además, dicho material también funcionaría como estabilizador de la boya, el cual evitaría que se volteara. En la figura 4.30(b) se puede apreciar el cuerpo impreso de la boya.



(a) Estructura interna de la boya diseñada. (b) Cuerpo impreso de la boya diseñada.

Figura 4.30: Perspectiva interna de la carcasa que alberga los componentes del dispositivo IoT.

En la figura 4.31 se puede apreciar las primeras tres secciones internas de la boya, mencionadas con anterioridad.



(a) Primera sección

(b) Segunda sección

(c) Tercera sección

Figura 4.31: Secciones internas de la boya

Cada una de las secciones de la boya esta dividida por una cubierta circular que se puede fijar por medio de seguros, los cuales mantienen cada nivel en su lugar pese al movimiento de la boya. Gracias a los seguros mencionados, el acceso a cada uno de los niveles es relativamente sencillo.

Debido a las propiedades físicas de la impresora 3D, el tamaño de la boya fue limitada a las dimensiones  $220 \times 220 \times 250 \text{ mm}$ , para que fuese posible imprimir el cuerpo en una sola pieza y de esta forma asegurar que fuese impermeable. La primera sección de la boya, como se puede apreciar en la figura 4.31(a), cuenta con una cúpula de acrílico que permite que la luz solar interactúe con los paneles solares. Para sellar esta parte entre el acrílico y el cuerpo impreso de la boya se utilizó un empaque y tornillos.

En la figura 4.32(a) se puede observar la forma en que se colocarían las sondas de los sensores en el cuerpo impreso de la boya para registrar los parámetros de la calidad del agua y en la figura 4.32(b) se puede notar una simulación del comportamiento que se esperaría del dispositivo IoT.

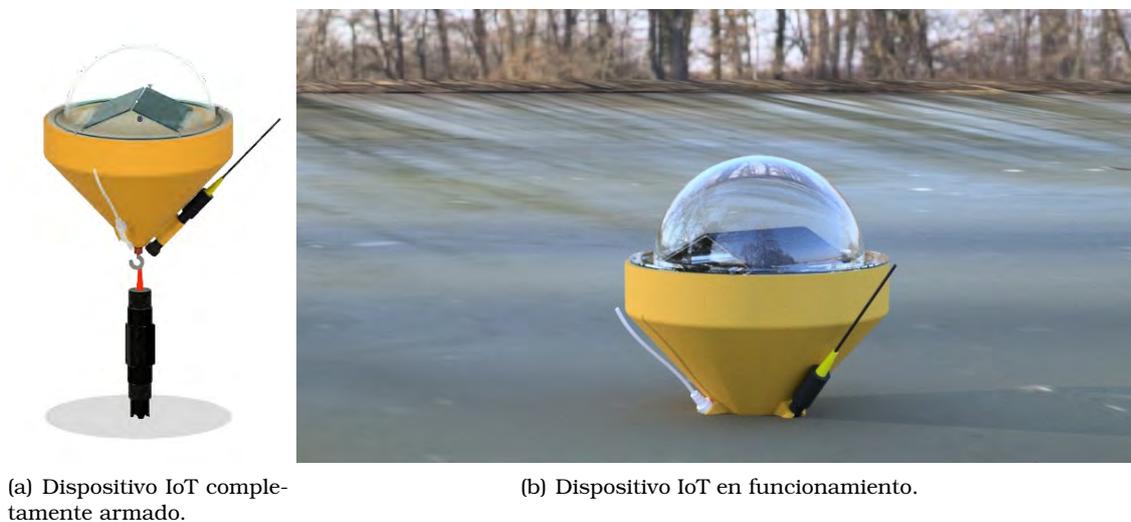


Figura 4.32: Dispositivo IoT en su versión de boya para la medición de los parámetros de la calidad del agua.

## 4.6. Interfaz gráfica de usuario

Contando con todos los elementos anteriormente descritos, se diseñó una interfaz *web*, con la cual el usuario final pudiera interactuar con el sistema de forma fácil y sencilla. Para esto se instalaron en la *Raspberry Pi* todos los componentes necesarios para construir un servidor LAMP y alojar en él la página *web* del proyecto.

Para conocer el proceso de instalación de cada uno de los componentes del servidor LAMP se recomienda revisar el archivo *LAMP.sh*, en la ruta *Aquaculture-IoT-device* → *LAMPServer*, del repositorio [45].

Este trabajo ha sido realizado con HTML, CSS, PHP nativo, JavaScript, MariaDB y como gestor de base de datos se utilizó *phpMyAdmin*. El patrón de diseño implementado en esta interfaz gráfica fue el Modelo-Vista-Controlador. El modelo hace referencia al manejo de datos y lógica de negocios, es decir, define que datos debe de tener la aplicación. La vista se encarga del diseño y la presentación, define como se deben de mostrar los datos de la aplicación. El controlador contiene la parte lógica que actualiza a los modelos y vistas, en respuesta a entradas de los usuarios finales.

A través de la interfaz gráfica de usuario diseñada en este proyecto, el usuario final puede visualizar los datos de la calidad del agua recopilados por el prototipo y puede realizar configuraciones en el dispositivo IoT de manera remota. La GUI cuenta con un *login* para la seguridad de los datos, el cual se puede observar en la figura 4.33.



Figura 4.33: Login de la interfaz gráfica de usuario

### 4.6.1. Reportes

En esta subsección se presentan los reportes a los cuales puede acceder el usuario final a través de la interfaz *web*.

#### 4.6.1.1. Gráficas y tablas

Por medio de la interfaz *web* se pueden consultar los datos recopilados por los dispositivos IoT. Para esto se necesita seleccionar el dispositivo del que se quiere saber la información, el parámetro que se desea evaluar y el rango de tiempo del que se desea que sean los datos.

El sistema está relacionado con la información que se almacena en la base de datos, por lo que cuenta con opciones despegables que contienen el nombre todos los dispositivos IoT que se han registrado en la base, y a su vez, tiene conocimiento de los parámetros que monitorea cada equipo.

Los datos se presentan en la página en formato de tabla y gráfica. La página brinda soporte para que los datos de la tabla se puedan descargar en formato CSV, PDF o en *Excel*. También se puede copiar o imprimir la tabla. En la gráfica se puede visualizar la evolución del parámetro seleccionado en el rango de tiempo especificado. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 4.34.

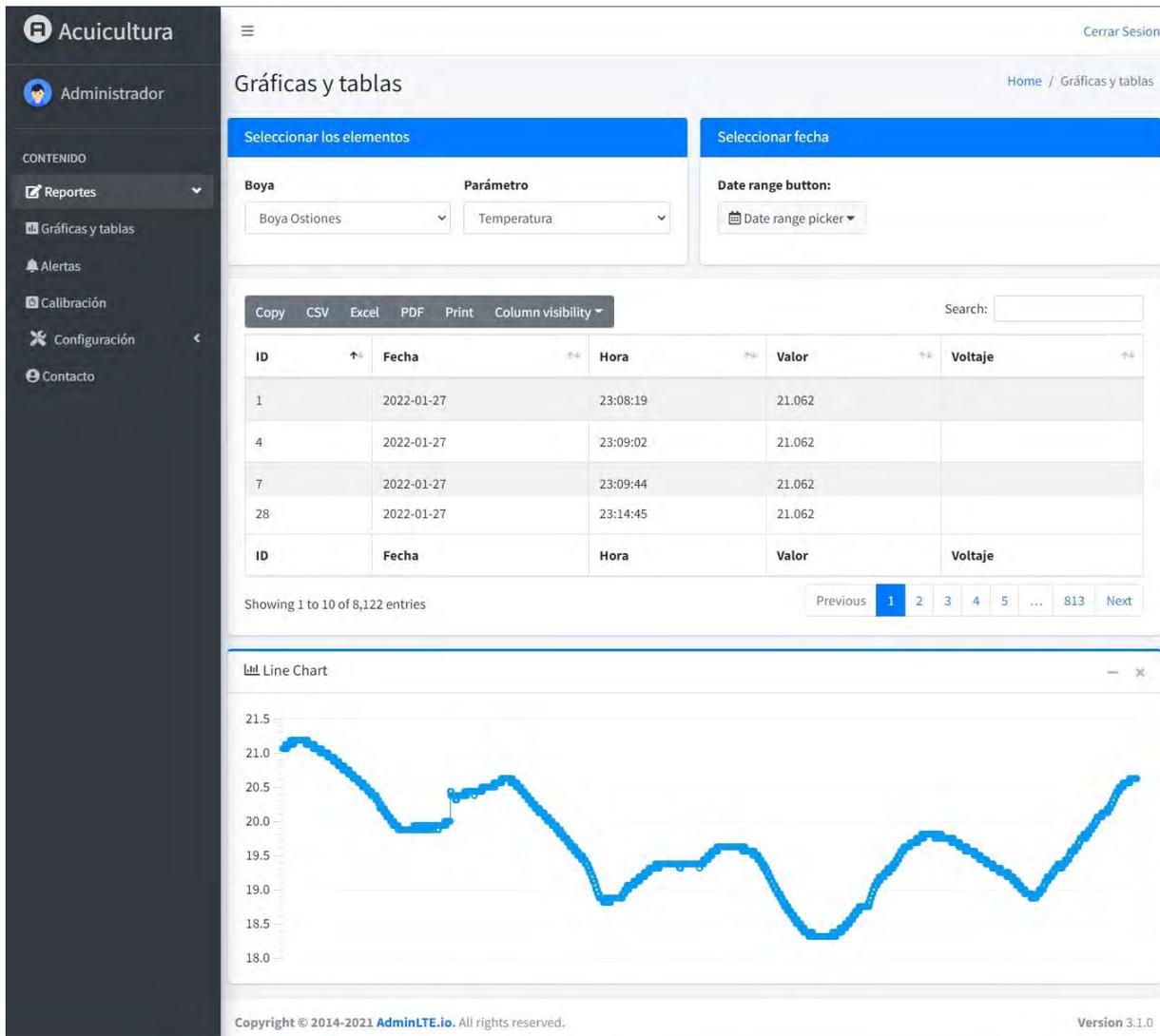


Figura 4.34: Pestaña de la interfaz *web* para consultar los datos recopilados por los dispositivos *IoT* en formato de tabla y gráfica.

#### 4.6.1.2. Calibración

En la sección de calibración se puede consultar el histórico de las calibraciones realizadas a los sensores. En esta pestaña se despliega una tabla que indica el sensor que se calibró y el equipo IoT al que pertenece. Se muestran datos como la fecha y hora en que se calibró por última vez, además de la disolución tampón que se utilizó para realizar el proceso. La columna *ack* indica si el proceso de calibración fue exitoso (1) o si se presentó algún problema por el que no se pudo concluir (0). Para obtener el histórico de calibración, únicamente se debe de seleccionar el dispositivo IoT del que se tiene interés. Un ejemplo se puede ver en la figura 4.35.

Reportes de calibración

Home / Reportes de calibración

Seleccionar los elementos

Boya

Boya Ostiones

Copy CSV Excel PDF Print Column visibility

Search:

ID	Boya	Sensor	Fecha	Hora	Valor de calibración	ACK
1	Boya Ostiones	DO	2022-11-08	20:49:43	0	1
2	Boya Ostiones	pH	2022-11-08	20:51:04	7	1
3	Boya Ostiones	pH	2022-11-08	20:50:04	4	0

Showing 1 to 3 of 3 entries

Previous 1 Next

Figura 4.35: Pestaña de la interfaz *web* para consultar el histórico de las calibraciones realizadas a los sensores.

#### 4.6.1.3. Alertas

En la pestaña de alertas, se pueden consultar mensajes de algún fallo que se haya presentado en el sistema, además de reportes que indiquen si se han detectado lecturas inusuales que se hayan presentado fuera del rango establecido de alguna variable. Para acceder a los avisos, únicamente se tiene que seleccionar el periodo. Un ejemplo de la funcionalidad de esta pestaña se puede ver en la figura 4.36.

Alertas

Home / Alertas

Seleccionar fecha

Date range button:

Date range picker

Copy CSV Excel PDF Print Column visibility

Search:

ID	Fecha	Hora	Tipo	Mensaje
1	2022-11-08	20:41:38	Error	No se pudo cerrar la conexión con la base de datos.
2	2022-11-08	20:41:38	Error	No se pudo mandar correo.
3	2022-11-08	20:45:07	Error	No se pudo realizar el procesamiento de los datos

Showing 1 to 3 of 3 entries

Previous 1 Next

Figura 4.36: Pestaña de la interfaz *web* para consultar las alertas.

#### 4.6.2. Configuración

A continuación se presentan las configuraciones que se pueden realizar remotamente al dispositivo IoT a través de la plataforma.

#### 4.6.2.1. Modificar los valores de alerta

En esta sección de la pestaña de configuraciones, se puede modificar el valor mínimo y máximo considerados como aceptables para una variable de la calidad del agua. Es necesario indicar el parámetro al cual se le quiere realizar la modificación y el dispositivo IoT al que pertenece esa variable. En la figura 4.37 se puede observar un ejemplo de esta funcionalidad.



Figura 4.37: Pestaña de la interfaz *web* para modificar el rango de los valores de alerta.

#### 4.6.2.2. Añadir sensores a una boya

En esta pestaña se especifican los datos relacionados a un nuevo sensor que se haya integrado a un dispositivo IoT, esto para añadir este nuevo registro a la base de datos. Se necesita especificar el dispositivo al que se le añade el sensor, la variable y unidades en las que mide, el modelo del sensor y el rango de valores considerados como aceptables. Un ejemplo de esta configuración se puede apreciar en la figura 4.38.

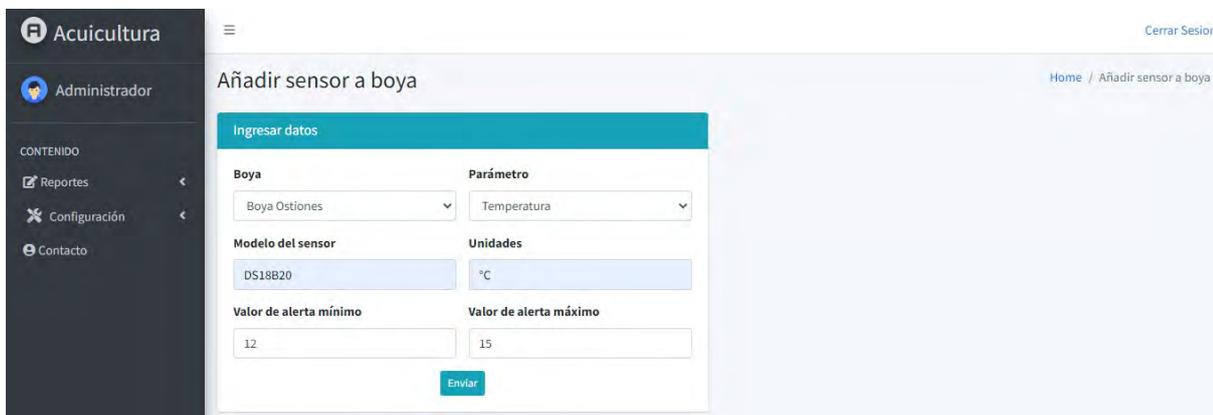
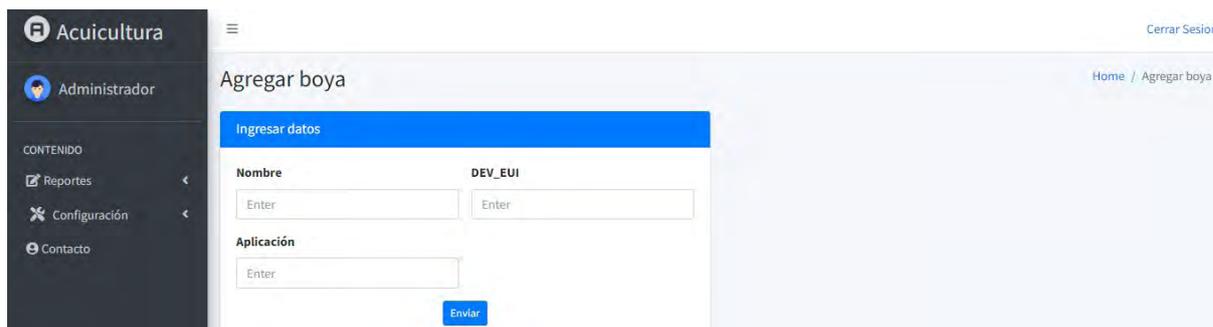


Figura 4.38: Pestaña de la interfaz *web* para añadir un nuevo sensor a un dispositivo IoT.

#### 4.6.2.3. Agregar un nuevo dispositivo IoT

Esta opción de las configuraciones, se especifican los datos que se necesitan para que el sistema pueda interactuar con un nuevo dispositivo IoT que se haya desarrollado con el proceso especificado en las secciones anteriores. En esta pestaña se pide que se le añada un nombre al dispositivo con el que se va a identificar y que se registren los datos *Dev.EUI* y el valor de la aplicación, para poder suscribirse a las publicaciones que realice el equipo a través de MQTT. En la figura 4.39 se muestran los campos requeridos para el registro.

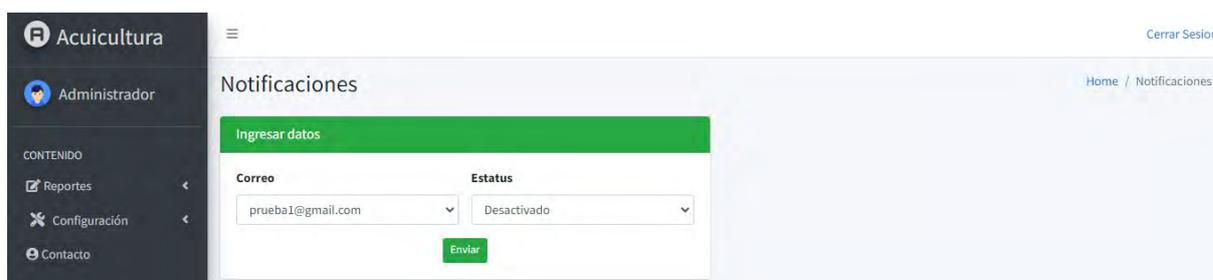


The screenshot shows the 'Agregar boya' page in the 'Acuicultura' web application. On the left is a dark sidebar with the user's name 'Administrador' and a menu with options: 'Reportes', 'Configuración', and 'Contacto'. The main content area has a blue header 'Agregar boya' and a breadcrumb 'Home / Agregar boya'. Below the header is a form titled 'Ingresar datos' with a blue background. The form contains three input fields: 'Nombre' (with 'Enter' placeholder), 'DEV\_EUI' (with 'Enter' placeholder), and 'Aplicación' (with 'Enter' placeholder). A blue 'Enviar' button is at the bottom right of the form.

Figura 4.39: Pestaña de la interfaz *web* para añadir dispositivo IoT.

#### 4.6.2.4. Configuraciones en las notificaciones de alerta

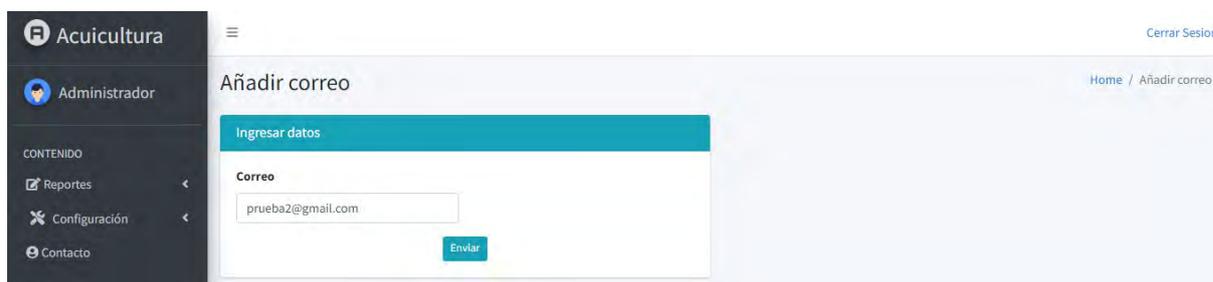
A través de la interfaz web se pueden activar o desactivar las notificaciones que recibe un usuario a través de *Pushbullet* o por medio de correo electrónico. Las cuentas se quedan registradas en la base de datos, por lo que no es necesario conocer el correo de la persona de memoria. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 4.40.



The screenshot shows the 'Notificaciones' page in the 'Acuicultura' web application. The sidebar is the same as in Figure 4.39. The main content area has a blue header 'Notificaciones' and a breadcrumb 'Home / Notificaciones'. Below the header is a form titled 'Ingresar datos' with a green background. The form contains two dropdown menus: 'Correo' (with 'prueba1@gmail.com' selected) and 'Estatus' (with 'Desactivado' selected). A green 'Enviar' button is at the bottom center of the form.

Figura 4.40: Pestaña de la interfaz *web* para modificar el estatus de las notificaciones.

Por otra parte, en la interfaz *web* también es posible añadir nuevos correos de usuarios, para que comiencen a recibir las notificaciones de alerta que manda el sistema. Un ejemplo de como añadir un nuevo correo se puede observar en la figura 4.41.



The screenshot shows the 'Añadir correo' page in the 'Acuicultura' web application. The sidebar is the same as in Figure 4.39. The main content area has a blue header 'Añadir correo' and a breadcrumb 'Home / Añadir correo'. Below the header is a form titled 'Ingresar datos' with a teal background. The form contains one input field for 'Correo' with the value 'prueba2@gmail.com'. A teal 'Enviar' button is at the bottom right of the form.

Figura 4.41: Pestaña de la interfaz *web* para añadir un nuevo correo al cual notificar en caso de que se presente una alerta.

#### 4.6.2.5. Modificar el tiempo de mediciones

Por medio de la interfaz de usuario, se puede seleccionar un dispositivo IoT y modificar el tiempo entre las mediciones que realiza, el valor mínimo aceptado es de 1 minuto por medición. En la figura 4.42 se puede ver un ejemplo de esta funcionalidad.

The screenshot shows a web application interface for 'Acuicultura'. On the left is a dark sidebar with a menu containing 'Administrador', 'Reportes', 'Configuración', and 'Contacto'. The main content area is titled 'Cambiar tiempo entre mediciones'. At the top right of the main area are links for 'Cerrar Sesión', 'Home', and 'Cambiar tiempo entre mediciones'. Below the title is a blue header 'Ingresar datos'. The form contains a 'Boya' dropdown menu with 'Boya Ostiones' selected, and a 'Tiempo (minutos)' text input field with '10' entered. A blue 'Enviar' button is positioned below the input fields.

Figura 4.42: Pestaña de la interfaz *web* para cambiar el periodo entre el registro de datos por parte de un dispositivo *IoT*.

#### 4.6.2.6. Calibración de los sensores

Por último, a través de la plataforma, se puede dar la instrucción a los sensores para que realicen su rutina de calibración internamente, para esto se debe de tener en cuenta que antes de utilizar la página, las sondas de los sensores deben de estar sumergidas en la solución calibradora. Los datos que necesita la plataforma son el parámetro a calibrar, el dispositivo *IoT* al que pertenece dicho sensor y el valor de la solución tampón que se utilizará para el proceso. De igual forma, en la página se instruye al usuario la manera correcta de ingresar los datos. En la figura 4.43 se observa la vista de la página.

The screenshot shows the 'Calibración' page of the 'Acuicultura' web application. The sidebar on the left is the same as in Figure 4.42, but 'Configuración' is expanded to show options like 'Modificar alertas', 'Añadir sensor a boya', 'Agregar boya', 'Notificaciones', 'Agregar correo', 'Cambiar tiempo entre mediciones', and 'Calibrar'. The main content area is titled 'Calibración' and includes a 'Cerrar Sesión' link and a breadcrumb 'Home / Calibración'. Under the heading 'Instrucciones:', there are three bullet points: 'Oxígeno disuelto' (with instructions to use 0 for air or 1 for Zero Dissolved Oxygen), 'pH' (with instructions on using 4, 7, and 10 solutions), and 'Temperatura' (with instructions to keep temperature constant). A warning note states: 'Cualquier otro valor que se ingrese, que no sea alguno de los especificados, no funcionará.' Below this is a green 'Ingresar datos' header. The form has a 'Boya' dropdown, a 'Parámetro' dropdown, and a 'Valor real' text input with 'Enter' written inside. A green 'Enviar' button is at the bottom.

Figura 4.43: Pestaña de la interfaz *web* para calibrar los sensores.

## Capítulo 5

# Resultados y análisis de datos

Los experimentos realizados para evaluar el funcionamiento del prototipo se efectuaron durante una estancia de investigación del 6 de abril al 1 de junio del 2022, en las instalaciones del laboratorio de moluscos del Departamento de Acuicultura en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Las actividades se realizaron bajo la supervisión de la Doctora Carmen Guadalupe Paniagua Chávez junto con el apoyo del Maestro Salvador Villasuso Palomares.

La etapa experimental se divide en dos fases. Durante la primera se evalúa el funcionamiento del prototipo en escenarios controlados de agua dulce y agua marina. En los experimentos realizados se efectúan modificaciones en la química del agua a través del control de parámetros como la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto y la concentración de dióxido de carbono en el sistema. En esta fase también se realizó una comparación cuantitativa entre el equipo de laboratorio con el que cuenta la institución y los sensores que conforman el dispositivo IoT.

En la segunda fase, se dejaron a un lado los experimentos en sistemas controlados, para poner a prueba al prototipo en cultivos experimentales de distintas especies, con el fin de valorar el rendimiento del sistema ante diferentes ambientes acuícolas y condiciones de cultivo, además de verificar la sustentabilidad del equipo.

### 5.1. Fase de evaluación en condiciones controladas

#### 5.1.1. Diseño experimental

A lo largo de esta fase, se sometió al prototipo a condiciones de estrés con la finalidad de evaluar la respuesta de los sensores que lo incorporan, esto a través de cambios drásticos en el entorno. Sin embargo, el escenario diseñado también se puede mantener estable con la menor variación posible de los parámetros, con el objetivo de examinar la resolución y precisión, para determinar si los sensores son aptos para la actividad. Para valorar el desempeño del prototipo se utilizó como referente el equipo de laboratorio que se ocupa en las instalaciones del centro de investigación.

Los investigadores de la institución disponen de cultivos de agua dulce y de agua marina, por lo tanto, fue necesario valorar el rendimiento del sistema en ambos casos.

Para cumplir con lo anteriormente mencionado, se plantearon experimentos con agua dulce y agua marina a temperaturas constantes de  $12^{\circ}C$  y  $24^{\circ}C$ . Se seleccionaron dichos valores para modificar la composición química del agua, ya que la solubilidad de un gas en el agua decrece a medida que aumenta la temperatura [27]. Cada uno de los experimentos consiste en tres pruebas, la primera es el control, el cual permite tener un punto de referencia del sistema, ya que en este no se realiza ninguna alteración y solo se miden los parámetros del agua, los cuales son el oxígeno disuelto, el pH, la temperatura y los TDS, con el agua fluyendo a través del Sistema de Recirculación Acuícola (SRA). En la segunda prueba se introduce al sistema de recirculación una piedra de aireación con el fin de generar una perturbación. Y

por último, en la tercera prueba, el aire suministrado por medio de la piedra, es remplazado por dióxido de carbono ( $CO_2$ ), alterando una vez más las propiedades del entorno.

En las últimas dos pruebas, se busca simular cambios drásticos en la composición química del agua para valorar la reacción de los sensores ante los cambios abruptos. La piedra de aireación, en los sistemas de producción acuícola, es el componente que proporciona aire, este elemento cuenta con una proporción de oxígeno, el cual es utilizado por los organismos para respirar. Adicionalmente, dicha piedra puede desgasificar el agua del tanque debido a que rompe la tensión superficial del agua y permite el intercambio de gases entre el sistema y el entorno. El  $CO_2$  altera drásticamente las propiedades químicas del agua como se muestra en [51].

Cada prueba del experimento tuvo una duración de una hora y media, dando un total de 4 horas y media por experimento, esto debido a que se consideró que con 1 hora y media de medición se contarían con la cantidad suficiente de datos para poder realizar un análisis estadístico. Se realizó una medición de los parámetros de la calidad del agua cada 5 minutos.

En la figura 5.1 se presenta un diagrama que resume el proceso de experimentación anteriormente descrito.

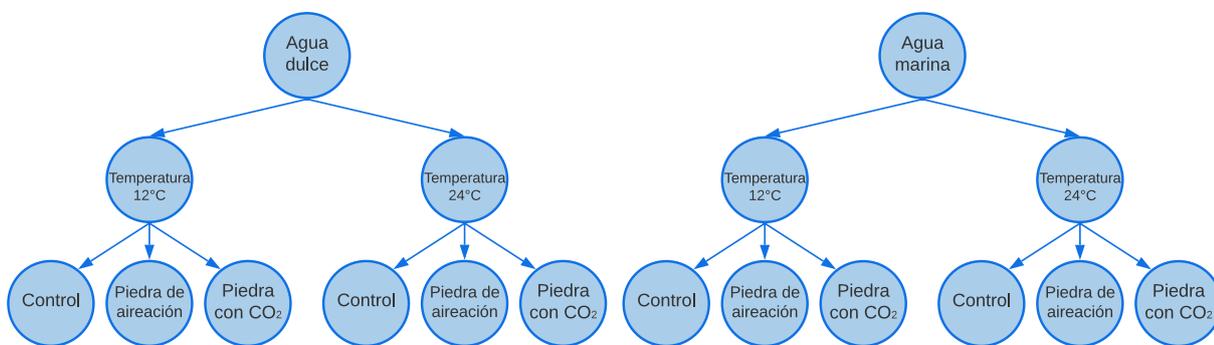


Figura 5.1: Diagrama de experimentos.

### 5.1.2. Construcción del escenario experimental

La configuración base del escenario para realizar la experimentación se muestra en la figura 5.2, el cual es un sistema cerrado conformado por un tanque de agua, un enfriador junto con su control y una bomba magnética.

El enfriador es un equipo de climatización capaz de enfriar agua, este equipo es un refrigerador de líquido que enfría mediante el intercambio térmico, el agua que se requiere enfriar circula a través de un intercambiador. Este flujo de agua transmitirá su calor al flujo del refrigerante, este al calentarse se evapora. El vapor producido es extraído por un compresor, el cual lo manda comprimido hacia un condensador, en donde el calor del vapor se transmite a un medio refrigerante, el cual puede ser agua o aire. Lo anterior provoca que el refrigerante se condense a alta presión. El refrigerante en estado líquido a alta presión se puede almacenar o enviar a una válvula de expansión para su inyección en el evaporador y así comenzar el ciclo nuevamente [52].

El funcionamiento del sistema cerrado radica en la operación de la bomba, ya que esta se encarga del movimiento del agua en el sistema. El líquido fluye del tanque al enfriador a través de la bomba, el enfriador se encarga de reducir la temperatura del agua que pasa por él, para regresarla al tanque, este proceso se repite hasta que la temperatura del agua sea la que se le haya programado al chiller mediante su control. Una vez que el enfriador haya reducido la temperatura de todo el líquido hasta la temperatura objetivo, el agua seguirá circulando a través de él, sin embargo, este se apagará y se volverá a encender una vez que la temperatura haya aumentado  $0.5^{\circ}C$ .

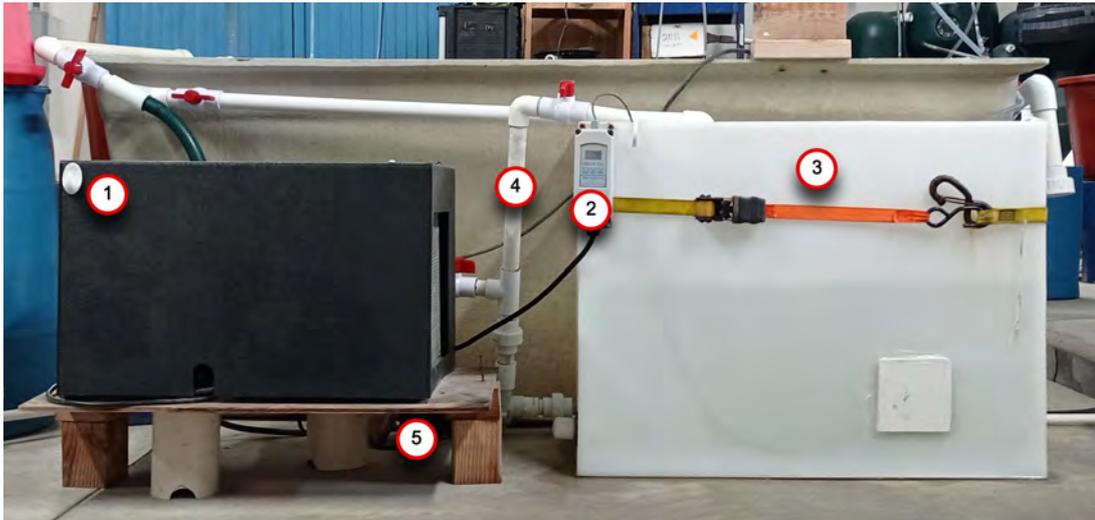


Figura 5.2: Configuración base del sistema cerrado. Enfriador (1), control del enfriador (2), tanque de agua (3), tubería para la conexión de la bomba (4) y bomba magnética (5).

Una vez que se estableció el escenario de experimentación, se le añadió el equipo de medición proporcionado por la institución para poder llevar a cabo los experimentos. Dicho equipo estaba conformado por un medidor de pH de la marca *Aqua Medic* (figura 5.3(a)) y una multiparamétrica ProDSS YSI (figura 5.3(b)), la cual estaba configurada para medir el pH, la temperatura, la presión atmosférica, el oxígeno disuelto y la conductividad del agua. De la misma manera, se integró el prototipo diseñado en este trabajo (figura 5.3(c)).

El prototipo se puso a prueba en su versión de *protoboard*, para evaluar su correcto funcionamiento y en caso de que se presentara algún error, fuese más fácil y rápido poder acceder al hardware o al software para solucionarlo.

Al final del proceso de experimentación, se va a realizar un análisis, equiparando los resultados obtenidos de las mediciones de oxígeno disuelto y temperatura entre la multiparamétrica ProDSS YSI y los sensores *EZO-DO* y *EZO-RTD* del prototipo, respectivamente. Por otro lado, se contrastarán los resultados de pH medidos por el equipo *Aqua Medic* y el sensor *EZO-PH* del prototipo. En el caso del parámetro de TDS, este no es considerado por los investigadores del centro de investigación, ya que sus diseños realizados cuentan con diferentes tipos de filtros para evitar la presencia de sólidos en sus sistemas, por lo tanto los valores registrados por el sensor del prototipo no podrán ser cotejados con algún otro equipo de medición.



(a) Ph Computer con electrodo Aqua Medic.

(b) ProDSS YSI.

(c) Prototipo en protoboard.

Figura 5.3: Equipo de medición utilizado durante la primera fase de experimentación.

El entorno de experimentación en conjunto se puede apreciar en la figura 5.1, el cual tiene todos los elementos para poder llevar a cabo la prueba de control a una temperatura de  $12^{\circ}\text{C}$ .

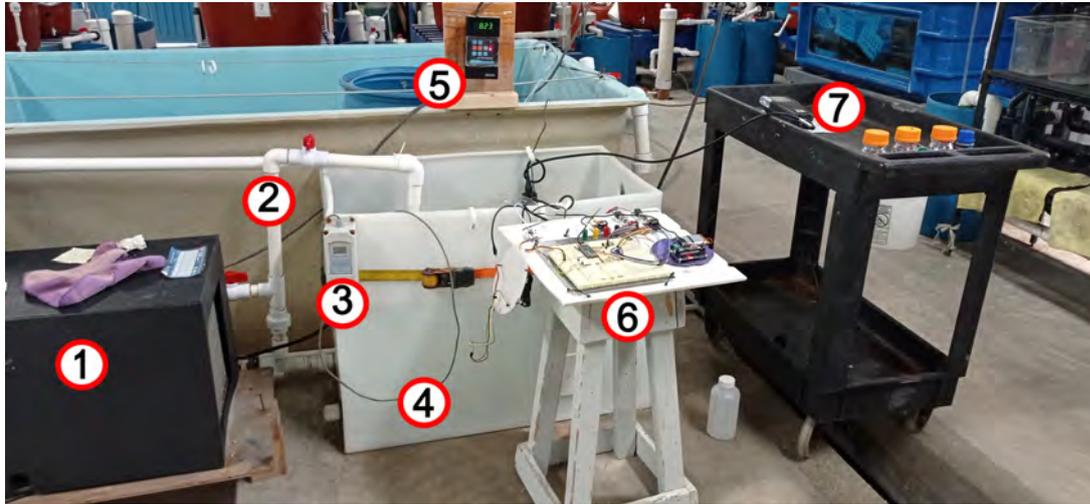
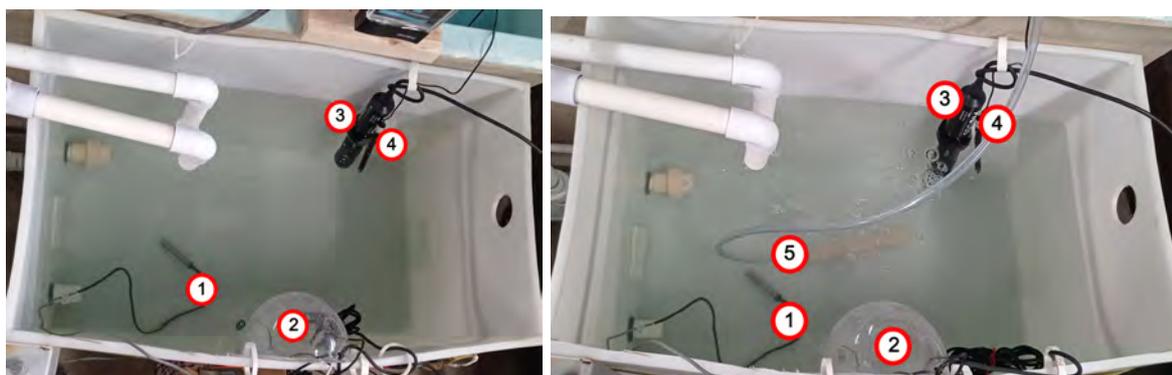


Figura 5.4: Configuración externa del sistema cerrado utilizado para la prueba de control. Enfriador (1), tubería para la conexión de la bomba (2), control del enfriador (3), tanque de agua (4), medidor de pH Aqua Medic (5), prototipo en *protoboard* y multiparamétrica ProDSS YSI (7).

En la figura 5.5(a), se muestra la composición que tiene el interior del tanque durante una prueba de control a una temperatura de  $12^{\circ}\text{C}$ . Se puede observar el cabezal de la multiparamétrica ProDSS YSI, la cual está conformada a su vez por cuatro sondas que corresponden a los parámetros de temperatura, conductividad, oxígeno disuelto y pH, también se puede ver la sonda del equipo Aqua Medic para la medición del pH, y por último, del mismo modo se encuentran las sondas correspondientes al prototipo que miden el oxígeno disuelto, el pH, la temperatura y los TDS. En cuanto a la configuración del interior del tanque de las pruebas que requieren de inyección de aire o de  $\text{CO}_2$ , en la figura 5.5(b) se muestra que es la misma de la prueba de control, pero con la incorporación de la piedra de aireación a través de la cual se le suministrará el gas al sistema.



(a) Interior del tanque de agua.

(b) Interior del tanque con piedra de aireación para suministrar aire o  $\text{CO}_2$

Figura 5.5: Componentes del interior del tanque de agua. Sonda del *chiller* para detectar la temperatura del agua (1), sondas que conforman al prototipo (2), cabezal de la multiparamétrica ProDSS YSI (3), sonda del medidor de pH Aqua Medic (4) y piedra de aireación (5).

Con respecto a la prueba en la que se inyecta aire al sistema, en la figura 5.6(a) se puede observar la organización del escenario de experimentación para cumplir con dicho objetivo.

Básicamente, es la misma configuración de la figura 5.4, no obstante, cuenta con la integración de la piedra de aireación, la cual a través de una manguera está conectada al sistema de tubería de aire. El aire que se utiliza se obtiene del exterior del laboratorio y la cantidad que se le provee al tanque se puede regular a través de una llave de paso.

Para el caso en el que se inyecta dióxido de carbono al sistema, se utiliza un tanque de  $CO_2$ , el cual se puede ver incorporado al escenario de experimentación en la figura 5.6. El dióxido de carbono se suministra a través de la piedra de aireación y se regula por medio de una válvula y un regulador con flujómetro. Durante la prueba se introducen 10 Cubic Feet Per Hour (CFH), cuyo equivalente es 4.72 litros por minuto, de dióxido de carbono al tanque de agua.

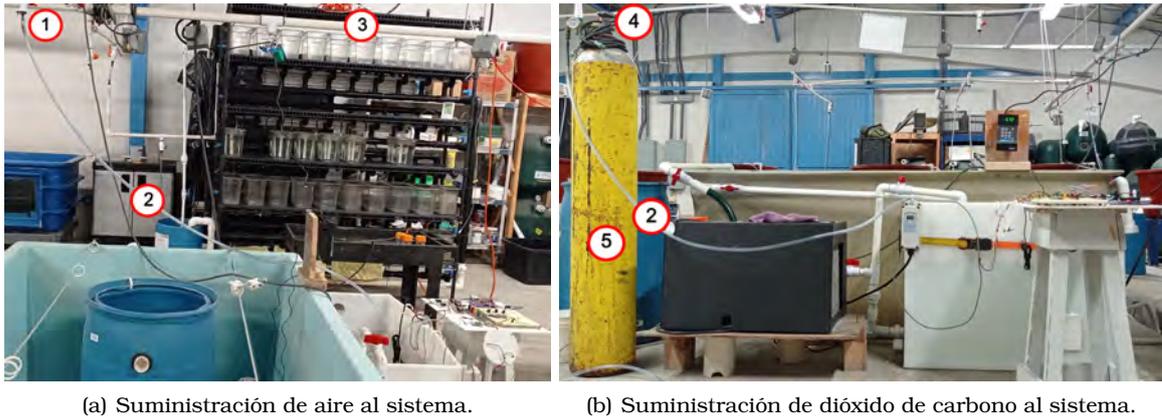


Figura 5.6: Configuraciones del escenario de pruebas para el suministro de aire y dióxido de carbono al sistema. Llave de paso de aire (1), manguera (2), sistema de tubería para la suministración de aire (3), válvula reguladora (4) y tanque de dióxido de carbono (5).

En cuanto a los experimentos con temperatura de  $24^{\circ}C$ , para efectuarlos se utilizó un calentador (figura 5.7(a)), para incrementar la temperatura del agua, adicionalmente, se programó el chiller para que este mantuviera la temperatura del líquido en  $24^{\circ}C$ . En este arreglo, el calentador puede elevar la temperatura hasta  $25^{\circ}C$ , ya que cuando llega a este valor, el chiller se activa y comienza a decrementar la temperatura hasta los  $23.5^{\circ}C$ , aproximadamente, para después desactivarse. En la figura 5.7(b) se puede observar la inclusión de la resistencia del calentador al interior del tanque de agua.



Figura 5.7: Integración del calentador al sistema de experimentación. Sonda del *chiller* para detectar la temperatura del agua (1), sondas que conforman al prototipo (2), cabezal de la multiparamétrica ProDSS YSI (3), sonda del medidor de pH *Aqua Medic* (4) y resistencia del calentador (5).

Por último, en la figura 5.8 se muestra la ubicación del sistema de transmisión de datos (punto A) y el sistema de recolección de datos (punto B), dentro del laboratorio. Entre el punto A y el punto B había una distancia de separación de aproximadamente 4 metros. Entre ambos sistemas existía línea de vista directa con muy poca interferencia por parte de otros estudiantes que también realizaban sus experimentos.



Figura 5.8: Posición del *end device* (punto A), con respecto al *gateway* (punto B).

Antes de comenzar con los experimentos, se realizó la calibración del equipo de medición, en el caso de la multiparamétrica, esta se puede calibrar sin utilizar ninguna disolución, ya que a partir de la presión barométrica puede realizar la calibración del oxígeno disuelto y el parámetro de temperatura no requiere de calibración [53]. Para calibrar el sensor de temperatura del prototipo se utilizó agua a temperatura ambiente y un termómetro. En el caso del sensor de oxígeno disuelto del prototipo, se utilizó la disolución *Zero Dissolved Oxygen* que se muestra en la figura 5.9(a).

Conforme al *Aqua Medic* y el sensor de pH del prototipo, ambos equipos se calibraron en dos puntos utilizando las soluciones de pH 4 y pH 7 que se muestran en la figura 5.9(b).



(a) Solución calibradora *Zero Dissolved Oxygen* (b) Soluciones calibradoras de pH 4 y pH 7.

Figura 5.9: Soluciones utilizadas para la calibración de los equipos de medición.

### 5.1.3. Prueba de control

#### 5.1.3.1. Temperatura

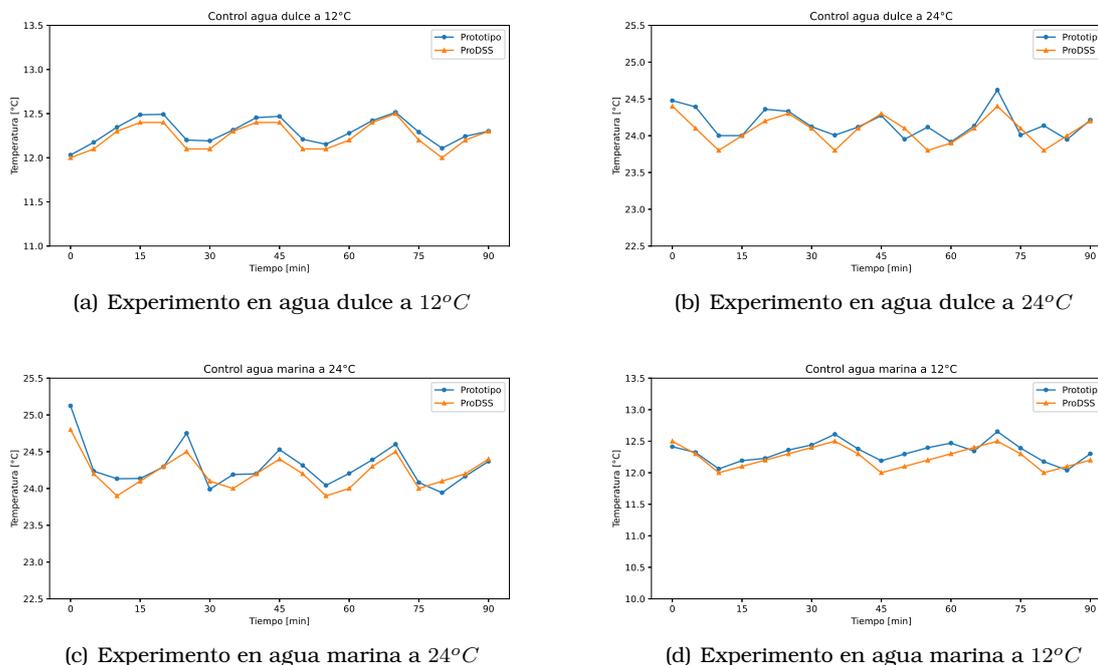


Figura 5.10: Representación gráfica de la temperatura medida por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de control en los experimentos realizados.

Analizando las gráficas de la figura 5.10, se puede observar que tanto el prototipo como la ProDSS registraron un comportamiento similar en las mediciones de la temperatura del agua, durante la prueba de control de los distintos experimentos. En la figura 5.10(a), se puede ver que durante el experimento en agua dulce a 12°C no se presentaron irregularidades en los valores recopilados por el prototipo, mientras que en los otros experimentos, principalmente en los de las figuras 5.10(b) y 5.10(c), se pueden notar mediciones inusuales comparadas con las registradas por la multiparamétrica. Este comportamiento puede deberse a la sensibilidad del sensor, ya que la variación máxima registrada entre los datos de los experimentos fue de  $\pm 0.34^\circ C$ , como se puede observar en la tabla 5.1.

Al comparar los valores promedios registrados por los equipos, se puede notar que es en el experimento en agua dulce a 24°C donde se presenta la mayor diferencia, la cual es de  $0.31^\circ C$ , sin embargo, dicho valor es cercano a la diferencia de los demás experimentos, a excepción del experimento en agua dulce a 12°C, donde se presenta una diferencia de  $0.15^\circ C$ . Esto fue provocado debido a que el sensor del prototipo se calibró nuevamente después del primer experimento. Platicando con los investigadores, se mencionó que el error de calibración que presentaba la sonda del prototipo era tolerable, por lo que se decidió continuar con las pruebas sin realizar ninguna modificación hasta que se terminara la fase de experimentación.

Es importante notar en las gráficas, que la temperatura no se mantiene constante debido al enfriador. En el caso de los experimentos realizados a 12°C, el funcionamiento del enfriador consistía en reducir la temperatura del agua hasta la temperatura objetivo y detenerse. Posteriormente, la temperatura aumentará debido al ambiente y cuando esta alcance los 12.5°C, el enfriador se encenderá y empezará a reducir la temperatura nuevamente hasta los 12°C.

En el caso de los experimentos a 24°C, se utilizó un calentador para elevar la temperatura del agua y se programó el enfriador para que al detectar una temperatura de 24.5°C la redujera a 24°C.

Equipo de medición	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]			
	Agua dulce a $12^{\circ}C$	Agua dulce a $24^{\circ}C$	Agua marina a $24^{\circ}C$	Agua marina a $12^{\circ}C$
Laboratorio	12.24 ( $\pm 0.15$ )	24.08 ( $\pm 0.20$ )	24.22 ( $\pm 0.23$ )	12.25 ( $\pm 0.17$ )
Prototipo	12.39 ( $\pm 0.13$ )	24.39 ( $\pm 0.31$ )	24.50 ( $\pm 0.34$ )	12.55 ( $\pm 0.30$ )

Tabla 5.1: Comparación del registro de la temperatura del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba de control.

### 5.1.3.2. pH

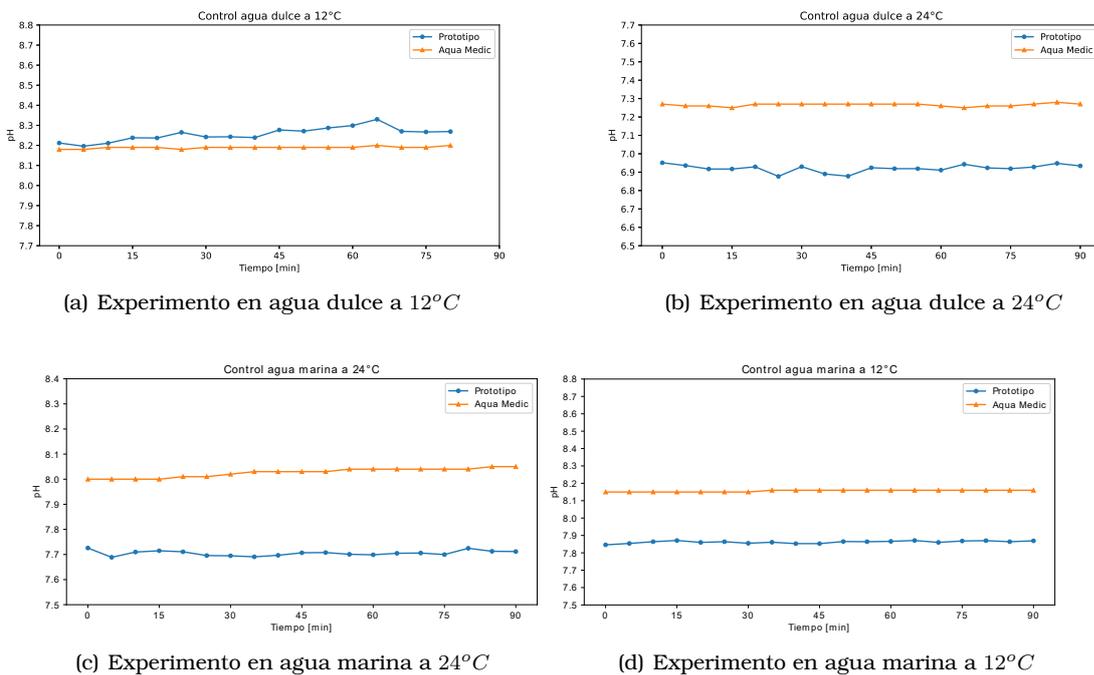


Figura 5.11: Representación gráfica del pH medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de control en los experimentos realizados.

Durante la prueba de control de los distintos experimentos, se puede apreciar en las gráficas de la figura 5.11 un comportamiento moderadamente constante y esto es debido a que durante esta prueba no se presentó en el sistema un evento que alterara el pH en el líquido.

Se puede notar en la figura 5.11(a), correspondiente al experimento en agua dulce a  $12^{\circ}C$ , que existe una mayor presencia de lecturas atípicas registradas por el prototipo a comparación del equipo *Aqua Medic*, lo cual se ve reflejado en la desviación estándar de los datos, ya que el valor fue de  $\pm 0.15$  unidades. Este comportamiento se asoció a un error de calibración, por lo que después de terminar el primer experimento se recalibró el sensor del prototipo. Dicha acción mejoró la desviación estándar entre las lecturas del prototipo en los experimentos posteriores, ya que el mayor valor de desviación estándar se presentó en el experimento en agua dulce a  $24^{\circ}C$  con un valor de  $\pm 0.02$  unidades.

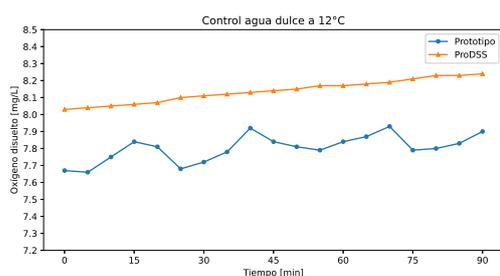
Sin embargo, la recalibración no fue del todo exitosa, ya que la diferencia entre los valores promedio medidos por los equipos en los tres últimos experimentos fue de aproximadamente  $\pm 0.35$  unidades, dicho valor aumentó más del doble a comparación del primer experimento donde se registró una diferencia de  $\pm 0.15$  unidades. Una vez que se observó este suceso, se optó por no realizar ningún arreglo al prototipo y continuar con el proceso de experimentación, mientras se investigaban las causas y una posible solución.

El agua dulce en Ensenada en ocasiones contiene muchos minerales, los cuales provocan que aumente el pH en esta. Este suceso se puede apreciar en el experimento en agua dulce a  $12^{\circ}\text{C}$ , donde la multiparamétrica registró un pH promedio de 8.19 unidades, muy similar al registrado en los experimentos de agua marina. Al analizar los datos en la tabla 5.2, se puede notar que en los experimentos a  $24^{\circ}\text{C}$ , el pH del agua es menor a comparación de los experimentos a  $12^{\circ}\text{C}$ . Cuando aumenta la temperatura, las moléculas tienden a separarse en hidrógeno y oxígeno, lo que hay mayor cantidad de iones de hidrógeno en el agua. Este suceso fue registrado tanto por la *ProDSS* como por el prototipo.

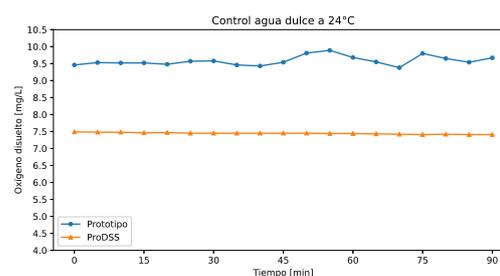
Equipo de medición	pH			
	Agua dulce a $12^{\circ}\text{C}$	Agua dulce a $24^{\circ}\text{C}$	Agua marina a $24^{\circ}\text{C}$	Agua marina a $12^{\circ}\text{C}$
Laboratorio	8.19 ( $\pm 0.006$ )	7.27 ( $\pm 0.007$ )	8.03 ( $\pm 0.02$ )	8.16 ( $\pm 0.005$ )
Prototipo	8.34 ( $\pm 0.15$ )	6.92 ( $\pm 0.02$ )	7.71 ( $\pm 0.009$ )	7.86 ( $\pm 0.009$ )

Tabla 5.2: Comparación del registro del pH del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba de control.

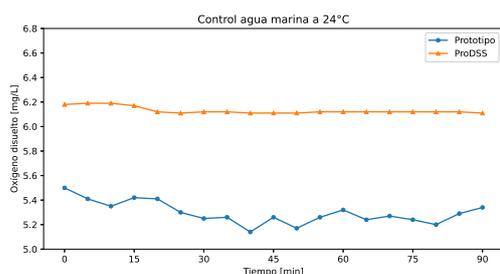
### 5.1.3.3. Oxígeno disuelto



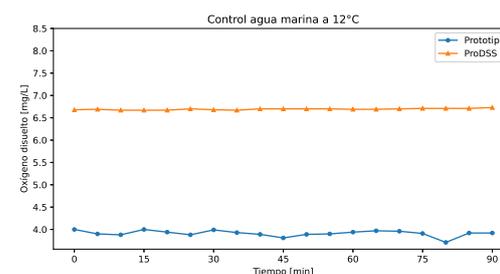
(a) Experimento en agua dulce a  $12^{\circ}\text{C}$



(b) Experimento en agua dulce a  $24^{\circ}\text{C}$



(c) Experimento en agua marina a  $24^{\circ}\text{C}$



(d) Experimento en agua marina a  $12^{\circ}\text{C}$

Figura 5.12: Representación gráfica del oxígeno disuelto medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de control en los experimentos realizados.

En la prueba de control, se esperaría que el oxígeno disuelto se mantuviera constante sin ninguna variación, ya que en esta prueba no existe un evento que pudiera alterar dicho parámetro. Sin embargo, se puede observar en la figura 5.12(a), que tanto el prototipo como la multiparamétrica detectaron un aumento de dicho parámetro a lo largo de la prueba. Este acontecimiento se presentó debido a que el agua utilizada para el experimento estaba a temperatura ambiente, la cual era de aproximadamente  $24^{\circ}\text{C}$ , por lo tanto, se tuvo que disminuir en un proceso que tardó dos horas, y una vez alcanzada la temperatura objetivo ( $12^{\circ}\text{C}$ ), se comenzó con el experimento.

Debido a que no se dejó reposar el agua, para que se estabilizará su química, los sistemas captaron el aumento de la solubilidad del oxígeno, ya que a menor temperatura es mayor la solubilidad de los gases en el agua. Al analizar específicamente los resultados del primer experimento, en la tabla 5.3 se puede ver que la diferencia entre el promedio de las mediciones obtenidas por los equipos es de  $0.35 \text{ mg/L}$ , lo cual podría considerarse como una medición aceptable para los investigadores, ya que la diferencia no sería significativa. Sin embargo, en la figura 5.12(a) se puede observar un comportamiento irregular en la información obtenida por el prototipo a comparación de los datos recabados por la sonda *ProDSS*, dicho comportamiento podría haber sido provocado por alguna falla a nivel de *hardware* del sensor o de la sonda, sin embargo, se optó por calibrar nuevamente el sensor y observar su desempeño a lo largo de los experimentos.

En las gráficas presentadas en las figuras 5.12(b), 5.12(c) y 5.12(d), se puede notar que la multiparamétrica registró un comportamiento prácticamente constante de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua a lo largo de las pruebas, la mayor desviación estándar presentada por dicho equipo fue en el experimento en agua marina a  $24^\circ\text{C}$  con un valor de  $\pm 0.03 \text{ mg/L}$ . En el caso del sensor del prototipo, este registró la misma tendencia que la multiparamétrica, sin embargo tuvo una mayor desviación estándar entre los datos que registro, presentando la más alta en el experimento en agua dulce a  $24^\circ\text{C}$  con un valor de  $\pm 0.13 \text{ mg/L}$ .

También se puede observar, en la tabla 5.3, que conforme se avanza en el proceso de experimentación, después del primer experimento, el valor promedio de los datos que obtiene el sensor del prototipo se va reduciendo sin que se presente un evento que lo provoque. Por lo tanto, se concluyó que este sensor no presentaba problemas de calibración, sino un defecto físico.

Por último, tomando en cuenta los resultados obtenidos por la *ProDSS*, se puede verificar que a bajas temperaturas, la concentración de oxígeno disuelto es mayor que a altas temperaturas, esto se puede comprobar al comparar los resultados obtenidos en agua marina, donde a una temperatura de  $12^\circ\text{C}$  se registró una concentración de  $6.69 \text{ mg/L}$ , mientras que en el experimento con temperatura a  $24^\circ\text{C}$  se registró una concentración de  $6.13 \text{ mg/L}$ . De igual forma, se comprobó que la salinidad del agua afecta en la concentración de oxígeno disuelto, ya que en el experimento en agua dulce a  $24^\circ\text{C}$  se obtuvo una concentración promedio de  $7.45 \text{ mg/L}$ , lo cual es 1.32 unidades mayor a la concentración obtenida en el experimento de agua marina a  $24^\circ\text{C}$ .

Equipo de medición	Oxígeno disuelto [mg/L]			
	Agua dulce a $12^\circ\text{C}$	Agua dulce a $24^\circ\text{C}$	Agua marina a $24^\circ\text{C}$	Agua marina a $12^\circ\text{C}$
Laboratorio	8.14	7.45 ( $\pm 0.02$ )	6.13 ( $\pm 0.03$ )	6.69 ( $\pm 0.02$ )
Prototipo	7.79	9.55 ( $\pm 0.13$ )	5.26 ( $\pm 0.10$ )	3.91 ( $\pm 0.06$ )

Tabla 5.3: Comparación del registro del oxígeno disuelto en el agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba de control.

#### 5.1.3.4. Total de sólidos disueltos

Equipo de medición	TDS[ppm]			
	Agua dulce a $12^\circ\text{C}$	Agua dulce a $24^\circ\text{C}$	Agua marina a $24^\circ\text{C}$	Agua marina a $12^\circ\text{C}$
Prototipo	858.18 ( $\pm 6.48$ )	715.26 ( $\pm 50.54$ )	1127.34 ( $\pm 13.50$ )	1973.38 ( $\pm 26.38$ )

Tabla 5.4: Registro de los TDS en el agua del prototipo durante los experimentos en la prueba de control.

En el caso de los TDS, solo se ilustran los datos obtenidos por el prototipo, ya que la institución no cuenta con equipos para medir este parámetro del agua. Los sistemas que utilizan para realizar sus experimentos cuentan con distintos filtros para remover la mayor cantidad de sólidos y evitar que estos se conviertan en un problema.

En la etapa de control, se esperaría poder observar un comportamiento prácticamente lineal de los TDS, sin embargo, al observar las gráficas de la figura 5.13, se puede notar que la variación entre las mediciones es alta. La menor desviación estándar se presentó en el experimento en agua dulce a  $12^{\circ}\text{C}$ , la cual fue de  $\pm 6.48 \text{ ppm}$ , la cual se podría considerar como aceptable. No obstante, al analizar los datos de la tabla 5.4, se puede observar que es en los experimentos con temperatura de  $24^{\circ}\text{C}$ , donde se presentan desviaciones estándar mayores, por ejemplo, el valor de  $\pm 50.54$  correspondiente al experimento en agua dulce a  $24^{\circ}\text{C}$ .

Además, al analizar la tendencia de las gráficas, se encontró que las mediciones registradas por el sensor de TDS replicaban el comportamiento de la temperatura. Considerando estos hechos, se puede concluir que el sensor presenta un error de compensación por la temperatura.

En los experimentos en agua dulce se observa que el valor promedio de los TDS es de más de  $700 \text{ ppm}$ , lo cual podría ser coherente debido a que se conoce que el agua proveniente de Ensenada es de muy mala calidad, sin embargo, se debe de tener en consideración que el agua utilizada para los experimentos paso por varios sistemas de filtración para retirar la mayor cantidad de sólidos que estuvieran en esta y al no tener un punto de comparación, se desconoce si los datos son correctos.

En las especificaciones de este sensor se menciona que su rango de medición es de 0 a 1000 partes por millón, por lo que no está diseñado para utilizarse en agua marina, sin embargo, al observar su desempeño en agua dulce, se optó por implementarlo en los experimentos de agua marina para evaluar el sistema de comunicaciones.

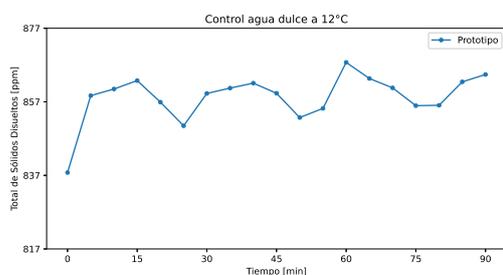
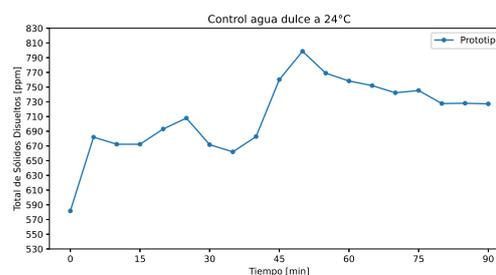
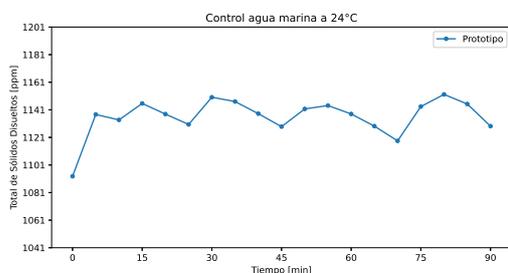
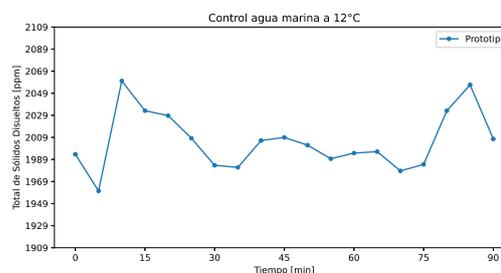
(a) Experimento en agua dulce a  $12^{\circ}\text{C}$ (b) Experimento en agua dulce a  $24^{\circ}\text{C}$ (c) Experimento en agua marina a  $24^{\circ}\text{C}$ (d) Experimento en agua marina a  $12^{\circ}\text{C}$ 

Figura 5.13: Representación gráfica del total de sólidos disueltos medido por el prototipo, durante la prueba de control en los experimentos realizados.

### 5.1.4. Prueba con piedra de aireación y suministro de aire

#### 5.1.4.1. Experimento en agua dulce a 12°C

Al introducir la piedra de aireación, en las gráficas de la figura 5.15, se puede observar que los parámetros de temperatura, oxígeno disuelto y de TDS medidos por el prototipo, se ven bruscamente afectados. Esto fue ocasionado porque la piedra de aireación se colocó cerca de las sondas, por lo que algunas de las burbujas que liberaba se quedaban atrapadas abajo de las pruebas, como se muestra en la figura 5.14.

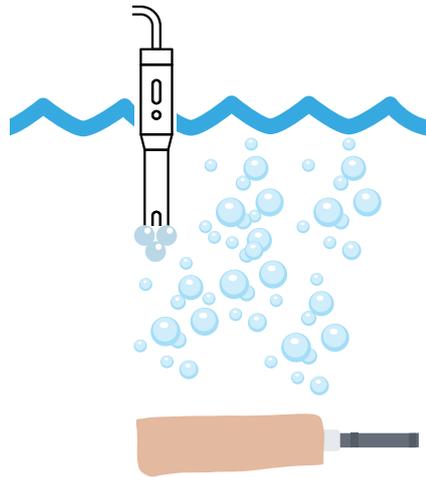


Figura 5.14: Representación de la perturbación presentada en las sondas del prototipo.

El sensor de temperatura del prototipo comenzó a medir la temperatura del aire que era suministrado al líquido, por eso es que este parámetro comenzó a incrementar, ya que el día del experimento fue muy caluroso, se registraron temperaturas de hasta 25°C, además, las tuberías que se encargan de suministrar aire en el laboratorio, generan fricción con el gas, lo que a su vez eleva su temperatura. En el caso de la *ProDSS*, no presentó problemas y registro la temperatura del agua correctamente, ya que pese a que el aire pudiera incrementar la temperatura del líquido, el enfriador se encargaba de regular este parámetro.

El pH no se vio afectado por la perturbación antes descrita, ya que al suministrar aire al sistema, este no debería perturbar el pH del agua. Analizando la figura 5.15(b), se puede ver que los valores registrados por ambos equipos fueron casi constantes, ya que la variación presentada por el dispositivo *Aqua Medic* fue de  $\pm 0.003$  y la del prototipo fue de  $\pm 0.02$ , sin embargo, la diferencia entre el promedio de los valores es de  $\pm 0.38$ , esto puede ser ocasionado por un problema de calibración en la sonda del prototipo.

La sonda del oxígeno disuelto del prototipo, también se vio afectada por las burbujas de la piedra de aireación, ya que se observa en la figura 5.15(c), que los valores que registró son cercanos a 8 mg/L y las lecturas no muestran el comportamiento creciente que tienen los datos recopilados por la multiparamétrica. En esta prueba, se esperaba que se registrara el incremento del oxígeno disuelto, debido a la presencia de la piedra de aireación. Las lecturas registradas por el sensor del prototipo podrían ser del oxígeno que hay en las burbujas que estaban en la sonda. Sin embargo, también se tenía en cuenta que este sensor presentó fallas en la primera prueba.

Dado el problema anteriormente descrito, se pudo validar la hipótesis sobre que el sensor de TDS estaba mayormente influenciado por la lectura de la temperatura, ya que la sonda del parámetro TDS estaba libre de burbujas. Sin embargo, en el minuto 65 de la prueba se modificó la posición de la piedra de aireación, y además se sacudieron las sondas de oxígeno disuelto y de temperatura para retirar las burbujas que se habían acumulado debajo de estas. Y es a partir de este momento, cuando las lecturas de oxígeno disuelto y temperatura se regularon y se acercaron a los valores registrados por la multiparamétrica. Pero, también se puede observar en la figura 5.15(d), que dichas acciones modificaron los datos registrados

por el sensor de TDS, cuando la sonda de este parámetro no se perturbo. Y en términos de programación, la temperatura es considerada para realizar el cálculo para obtener el valor del pH, del oxígeno disuelto y de los TDS.

Piedra de aireación en agua dulce a 12°C				
Equipo de medición	Temperatura [°C]	pH	Oxígeno disuelto [mg/L]	TDS [ppm]
Laboratorio	12.28 ( $\pm 0.17$ )	8.2 ( $\pm 0.003$ )	9.25	-
Prototipo	12.52 ( $\pm 1.70$ )	8.58 ( $\pm 0.02$ )	8.39	843.33 ( $\pm 55.92$ )

Tabla 5.5: Variables de la calidad del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante el experimento de agua dulce a 12°C en la prueba con la piedra de aireación.

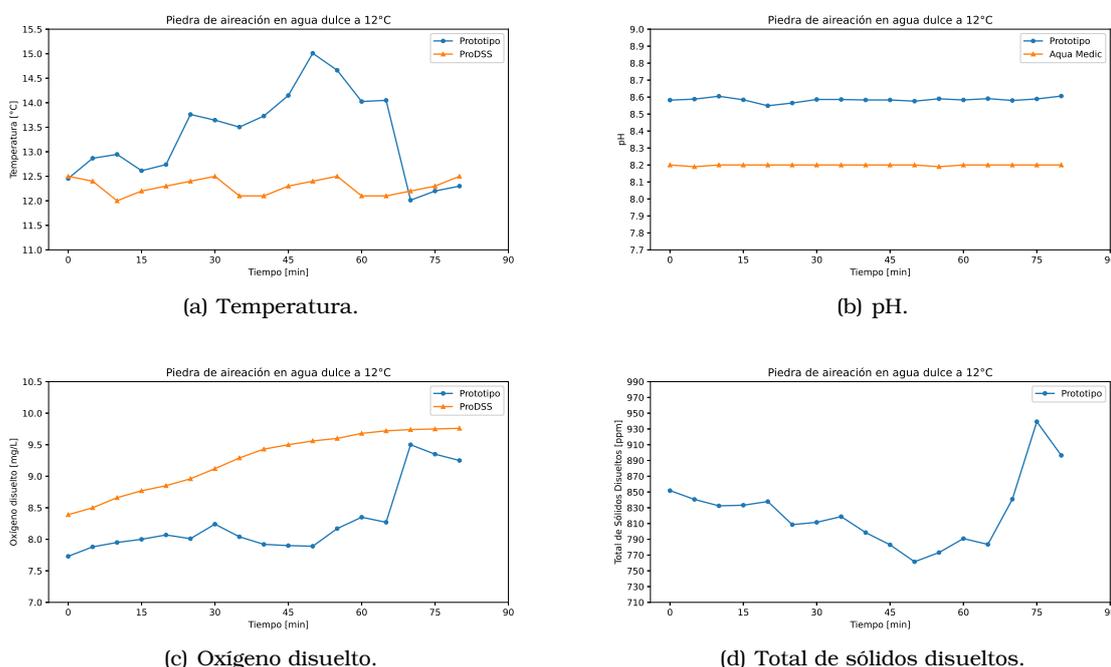


Figura 5.15: Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el equipo de la institución y el prototipo en el experimento de agua dulce a 12°C, en la prueba con la piedra de aireación.

#### 5.1.4.2. Temperatura

Equipo de medición	Temperatura [°C]		
	Agua dulce a 24°C	Agua marina a 24°C	Agua marina a 12°C
Laboratorio	24.12 ( $\pm 0.21$ )	24.20 ( $\pm 0.14$ )	12.26 ( $\pm 0.17$ )
Prototipo	24.45 ( $\pm 0.32$ )	24.50 ( $\pm 0.30$ )	12.53 ( $\pm 0.28$ )

Tabla 5.6: Comparación del registro de la temperatura del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de aire.

Al introducir la piedra de aireación en el tanque, se consideró el problema que se presentó en el experimento en agua dulce a 12°C, por lo que se colocó lejos de las sondas para evitar

problemas en las mediciones.

Revisando las gráficas de la figura 5.16 se puede notar que el proceso de aireación no presentó ningún efecto significativo en la temperatura de los distintos experimentos realizados. Tanto el prototipo como la *ProDSS*, continuaron con un registro semejante de la temperatura del agua. El sensor del prototipo continuo presentando algunos registros inusuales, debido a su precisión, pero al analizar la tabla 5.6 se puede ver que la mayor diferencia entre el promedio de los valores registrados por las sondas es de  $0.33^{\circ}\text{C}$ , este valor se presenta en el experimento en agua dulce a  $24^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, es muy cercano a la diferencia entre los promedios de los valores registrados de los demás experimentos.

El prototipo presentó una desviación estándar de  $\pm 0.32$  en el experimento de agua dulce a  $24^{\circ}\text{C}$ , dicho valor también fue el más alto de todos los experimentos realizados. En dicho experimento, al analizar la gráfica de la figura 5.16(b), se puede observar un comportamiento inesperado entre los minutos 30 a 45 de la prueba, y es que durante este periodo de tiempo, el *gateway* dejó de recibir información por parte del dispositivo. El problema que se presentó fue que en la *Raspberry Pi* se estaban ejecutando otros procesos, además de los necesarios para el funcionamiento del sistema de monitoreo, lo cual demandaba más recursos de los que tiene el ordenar y esto provocó que la placa colapsara. Se solucionó el problema reiniciando la tarjeta y evitando utilizarla para realizar más tareas que no pertenecieran al sistema de monitoreo.

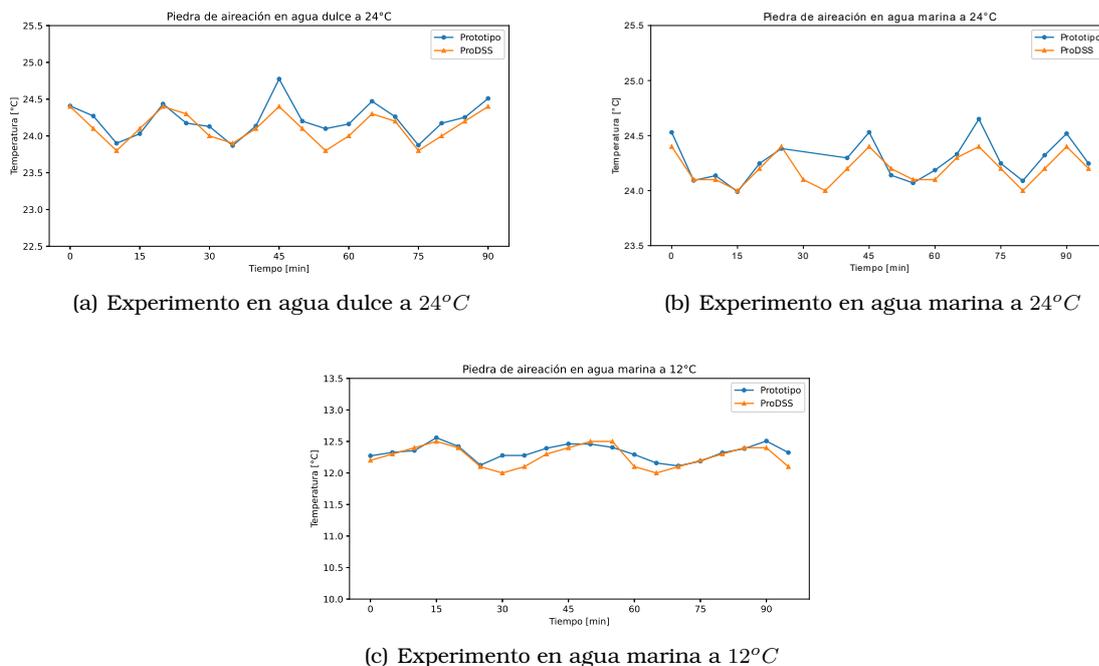


Figura 5.16: Representación gráfica de la temperatura medida por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de aireación en los experimentos realizados.

### 5.1.4.3. pH

En las gráficas de las figuras 5.17(b) y 5.17(c), se puede observar que el proceso de aireación no afectó el pH del agua, ya que se mantiene un registro prácticamente constante por parte de los equipos de medición, ya que la mayor desviación estándar registrada por el prototipo en estos dos experimentos fue de  $\pm 0.014$  y en el caso del *Aqua Medic* fue de  $\pm 0.005$ .

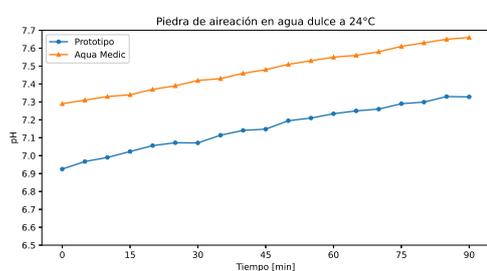
En la figura 5.17(a) correspondiente al experimento en agua dulce a  $24^{\circ}\text{C}$ , se puede ver que durante la medición del pH, los electrodos registraron un incremento de 0.3 unidades. Este evento fue provocado por el proceso de aireación, el cual rompe la tensión superficial del líquido, liberando los gases disueltos en el agua, en especial el dióxido de carbono. Al remover

el  $CO_2$  del agua, el pH incrementa [27].

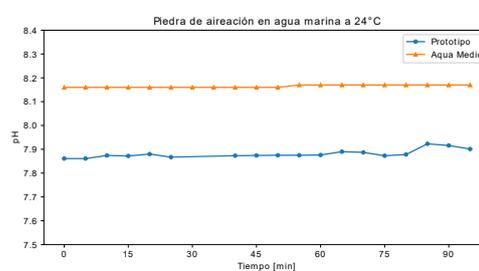
Al examinar los promedios de las mediciones registradas por el prototipo y por la multiparamétrica, en la tabla 5.7, se puede ver que la diferencia es de aproximadamente 0.30 unidades en todos los experimentos, la cual es similar a la obtenida en la prueba de control, por lo que se refuerza la hipótesis de que existe un error de calibración en el sensor del prototipo.

Equipo de medición	pH		
	Agua dulce a $24^{\circ}C$	Agua marina a $24^{\circ}C$	Agua marina a $12^{\circ}C$
Laboratorio	7.48	8.16 ( $\pm 0.005$ )	8.04 ( $\pm 0.001$ )
Prototipo	7.15	7.88 ( $\pm 0.014$ )	7.71 ( $\pm 0.008$ )

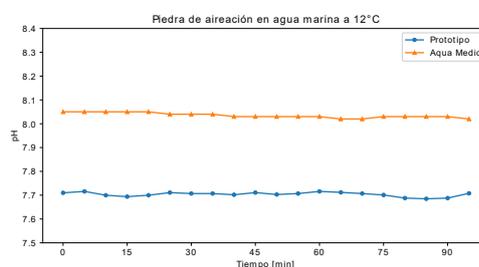
Tabla 5.7: Registro de los TDS en del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono.



(a) Experimento en agua dulce a  $24^{\circ}C$



(b) Experimento en agua marina a  $24^{\circ}C$



(c) Experimento en agua marina a  $12^{\circ}C$

Figura 5.17: Representación gráfica del pH medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de aireación en los experimentos realizados.

#### 5.1.4.4. Oxígeno disuelto

Equipo de medición	Oxígeno disuelto [mg/L]		
	Agua dulce a $24^{\circ}C$	Agua marina a $24^{\circ}C$	Agua marina a $12^{\circ}C$
Laboratorio	7.47 ( $\pm 0.04$ )	6.19 ( $\pm 0.03$ )	7.34
Prototipo	9.98 ( $\pm 0.15$ )	5.30 ( $\pm 0.06$ )	4.54

Tabla 5.8: Comparación del registro del oxígeno disuelto del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de aire.

Al introducir la piedra de aireación en el tanque de agua, se esperaría que el parámetro de oxígeno disuelto incrementara a lo largo del tiempo, como se aprecia en la figura 5.18(c), donde pese a las fallas que presentaba el sensor del prototipo, logró percibir el incremento del oxígeno disuelto en el agua. Sin embargo, al comparar los resultados del prototipo con el de la multiparamétrica, se puede notar que existe una diferencia de  $2.8 \text{ mg/L}$ .

Al analizar las figuras 5.18(a) y 5.18(b), se puede apreciar un comportamiento prácticamente lineal en los datos recolectados por la multiparamétrica, los cuales presentaron desviaciones estándar de  $\pm 0.04$  y  $\pm 0.03$ , respectivamente. Los datos recolectados por el sensor del prototipo de igual forma siguen una tendencia lineal con una mayor variación provocada por alguna falla, sin embargo, las desviaciones estándar registradas para los experimentos anteriormente mencionados, fueron de  $\pm 0.15$  y  $\pm 0.06$ . La estabilidad del oxígeno disuelto en estos experimentos se puede asociar a dos factores, el primero sería la temperatura, ya que la solubilidad de los gases es menos viable en altas temperaturas. Y el segundo factor sería la posición de la piedra de aireación, ya que al estar apartada de las sondas, la capacidad de oxigenar completamente el agua del tanque se ve reducida debido a la distancia y a la temperatura.

Por último, en los resultados de esta prueba, presentados en la tabla 5.8, al igual que en la prueba de control, que conforme se avanza en el proceso de experimentación el valor promedio de los datos que obtiene el sensor del prototipo se decrementa. Lo cual hace evidente que tiene un problema a nivel de *hardware*.

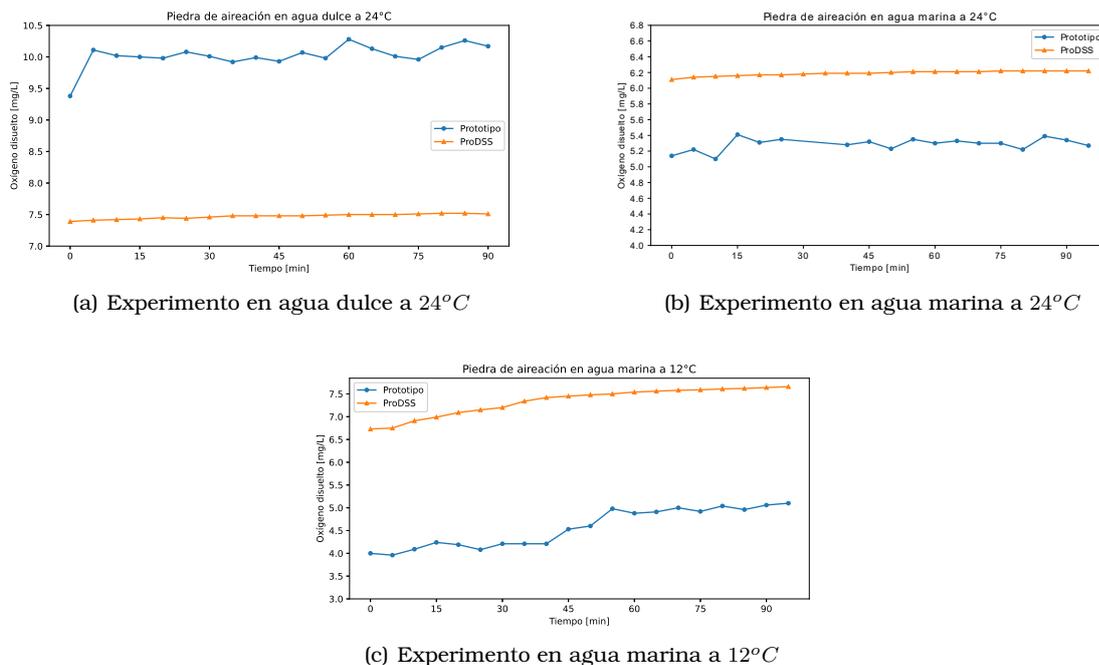


Figura 5.18: Representación gráfica del oxígeno disuelto medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba de aireación en los experimentos realizados.

#### 5.1.4.5. Total de sólidos disueltos

El proceso de aireación no implicó cambios significativos en el valor medido de los TDS, ya que al comparar los resultados obtenidos en la tabla 5.4 de la prueba de control, con los adquiridos en esta prueba, en la tabla 5.9, se puede observar que los valores promedio no presentan gran variación, la mayor diferencia que se da es de  $50.9 \text{ ppm}$  en el experimento de agua dulce a  $24^\circ\text{C}$ , mientras que en los experimentos de agua marina existe una diferencia menor de  $4 \text{ ppm}$ .

Si se observan las gráficas de la figura 5.19, se puede notar que los datos recolectados

por el sensor presentan una alta variación, pero al revisar la tabla 5.9, se percibe que en el experimento de agua marina a  $12^{\circ}\text{C}$  se presenta una desviación estándar de  $\pm 35.56 \text{ ppm}$ , cuyo valor es el mayor entre los experimentos.

Equipo de medición	TDS[ppm]		
	Agua dulce a $24^{\circ}\text{C}$	Agua marina a $24^{\circ}\text{C}$	Agua marina a $12^{\circ}\text{C}$
Prototipo	766.16 ( $\pm 17.27$ )	1127.85 ( $\pm 17.22$ )	1976.91 ( $\pm 35.56$ )

Tabla 5.9: Registro de los TDS en del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono.

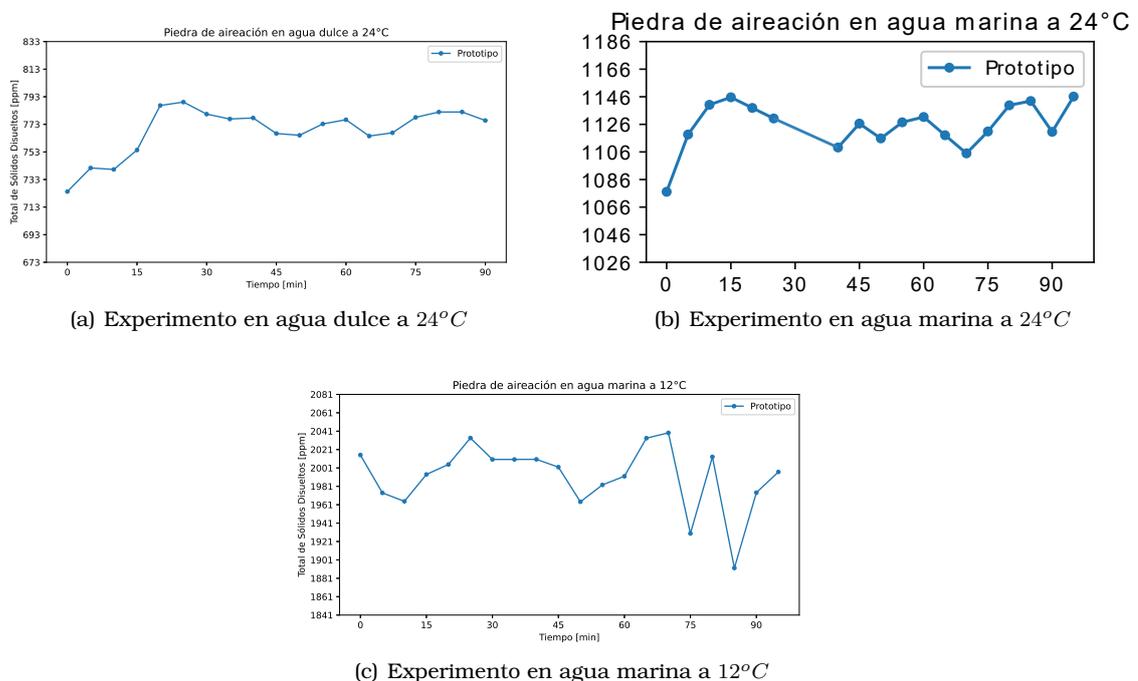


Figura 5.19: Representación gráfica del total de sólidos disueltos medido por el prototipo, durante la prueba de aireación en los experimentos realizados.

### 5.1.5. Prueba con piedra de aireación y suministro de dióxido de carbono

#### 5.1.5.1. Temperatura

A lo largo de las pruebas y experimentos, la temperatura es el único parámetro que se mantuvo sin ninguna alteración, pese a las perturbaciones introducidas al sistema. Al analizar las gráficas de la figura 5.20, se puede notar que fue en esta prueba donde la multiparamétrica y el prototipo mantuvieron registros muy cercanos con una diferencia entre los promedios de los experimentos menor a  $0.35^{\circ}\text{C}$ . Los equipos de medición registraron correctamente el comportamiento de la temperatura, el cual era influenciado por el enfriador.

En el experimento de agua dulce a  $12^{\circ}\text{C}$ , se reportó una desviación estándar de  $\pm 0.49^{\circ}\text{C}$ , este valor es mayor al registrado en los demás experimentos, esto pudo haber sido ocasionado por la interrupción de la comunicación entre los minutos 10 y 35, tiempo en el cual el *gateway*

dejo de recibir información por parte del prototipo. El problema que se presentó fue que al detectar valores de pH por debajo del rango establecido (menores a 6), la *Raspberry Pi* intentó mandar una alerta, pero debido a la intermitencia de la red *Wi-Fi* de la institución, el proceso de notificación no se pudo concluir, por lo que la rutina programada en el ordenador se detuvo. Durante los 20 minutos de inactividad se arregló el error.

Equipo de medición	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]			
	Agua dulce a $12^{\circ}C$	Agua dulce a $24^{\circ}C$	Agua marina a $24^{\circ}C$	Agua marina a $12^{\circ}C$
Laboratorio	12.23 ( $\pm 0.16$ )	24.12 ( $\pm 0.23$ )	24.15 ( $\pm 0.18$ )	12.26 ( $\pm 0.16$ )
Prototipo	12.09 ( $\pm 0.49$ )	24.43 ( $\pm 0.32$ )	24.35 ( $\pm 0.17$ )	12.59 ( $\pm 0.28$ )

Tabla 5.10: Comparación del registro de la temperatura del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono.

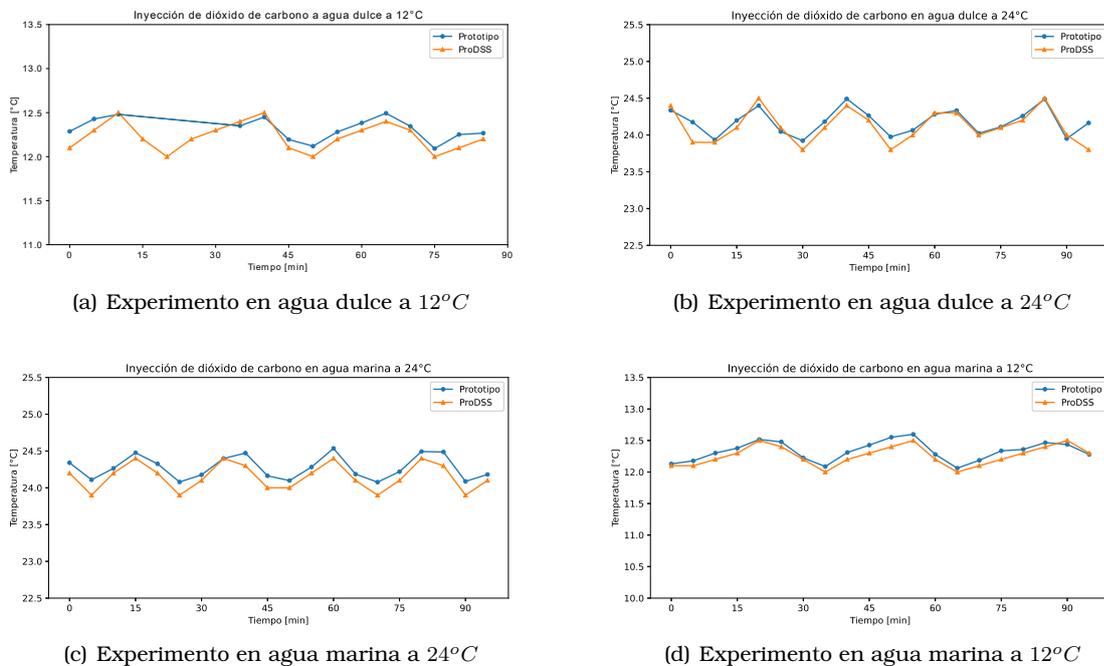


Figura 5.20: Representación gráfica de la temperatura medida por el equipo de la institución y el prototipo, durante la inyección de dióxido de carbono en los experimentos realizados.

### 5.1.5.2. pH

Equipo de medición	pH			
	Agua dulce a $12^{\circ}C$	Agua dulce a $24^{\circ}C$	Agua marina a $24^{\circ}C$	Agua marina a $12^{\circ}C$
Laboratorio	5.66	5.23	5.19	5.46
Prototipo	5.60	5.01	5.24	5.15

Tabla 5.11: Comparación del registro del pH del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono.

Ante la presencia de dióxido de carbono en el sistema, el pH en el agua se redujo exponencialmente, como se puede apreciar en las gráficas de la figura 5.21. Este comportamiento fue registrado tanto por el equipo *Aqua Medic* como por el prototipo. Este suceso, como se explica en el capítulo 2 de este trabajo, se presenta debido a que el pH del agua se torna ácido en presencia de  $CO_2$ , debido a que el dióxido de carbono toma el lugar del oxígeno en el líquido.

En las gráficas se puede observar que después de transcurrir 20 minutos en los experimentos, los valores registrados de pH, por la *ProDSS*, dejan de decrementar y se estabilizan en valor entre 5 y 5.5 unidades. Este suceso se presenta debido a que al interactuar el  $CO_2$  con la molécula del agua, se origina ácido carbónico, el cual se encuentra en mayor proporción en el líquido, conforme se reduce el pH. Durante los 20 minutos donde se presenta el decremento exponencial de este parámetro, el agua intenta amortiguar el ácido carbónico que se produce en ella. Cuando el valor del pH se estabiliza, significa que se terminó la alcalinidad del agua, es decir, la capacidad del agua para neutralizar ácidos, es por esta razón que el pH no decrece más.

Considerando los resultados obtenidos en la tabla 5.11, se puede observar que la diferencia entre los promedios de los datos recolectados por los equipos en los experimentos en agua dulce es menor a 0.07 unidades, mientras que en los experimentos en agua marina, son mayores a 0.20 unidades. Esto podría deberse al desempeño de los sistema frente al tipo de agua en el que se implementen.

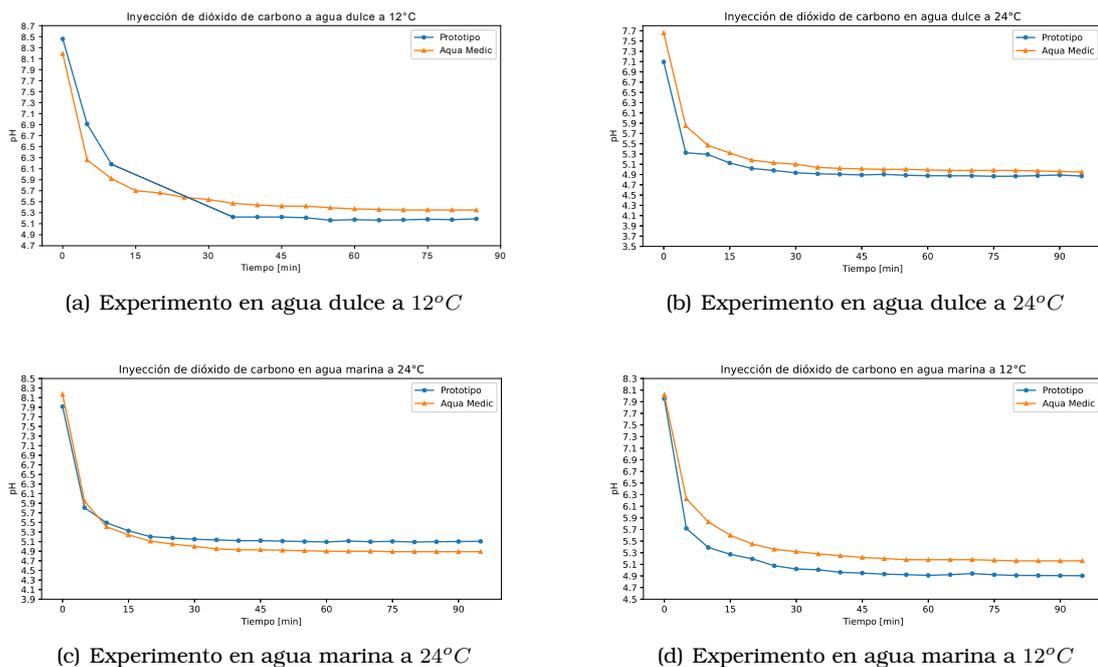


Figura 5.21: Representación gráfica del pH medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la inyección de dióxido de carbono en los experimentos realizados.

Un suceso que se puede observar en la figura 5.21(a) es que las mediciones de pH mayores a 5.6 del prototipo, están por encima de los valores registrados por el equipo *Aqua Medic* y las mediciones menores a 5.6 del prototipo, están por debajo de las que obtuvo el equipo de la institución. Este comportamiento se puede justificar debido a la calibración de los equipos. Ambos se calibraron en dos puntos, por lo tanto, los voltajes registrados en esos dos puntos, pueden llegar a ser diferentes, como se muestra en la figura 5.22. Y esto es lo que ocasiona dicho comportamiento en los datos.

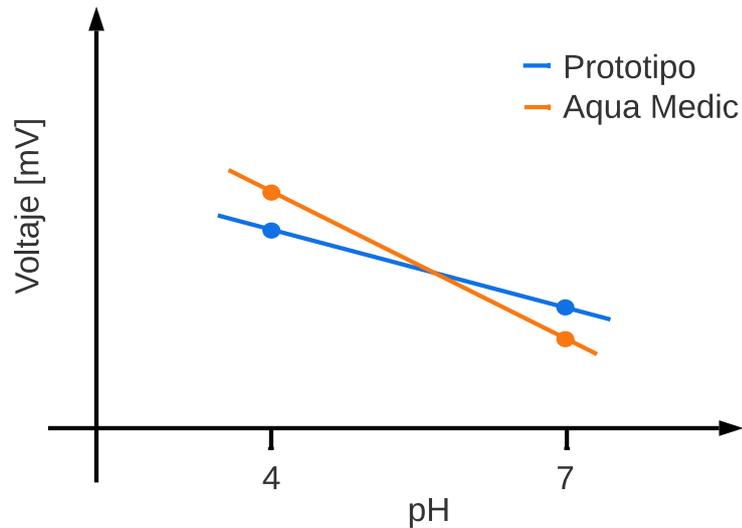


Figura 5.22: Imagen ilustrativa del problema de calibración entre el equipo *Aqua Medic* y el prototipo.

El mismo evento ocurre en la figura 5.21(c), pero en caso inverso, se tiene que aclarar que el equipo *Aqua Medic* se necesitaba calibrar cada que se comenzaba un experimento, por lo que no siempre se observa el mismo comportamiento en las curvas.

### 5.1.5.3. Oxígeno disuelto

Equipo de medición	Oxígeno disuelto [mg/L]			
	Agua dulce a 12°C	Agua dulce a 24°C	Agua marina a 24°C	Agua marina a 12°C
Laboratorio	3.06	2.33	1.67	2.45
Prototipo	3.91	4.26	1.93	1.92

Tabla 5.12: Comparación del registro del oxígeno disuelto del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono.

En las gráficas de la figura 5.23 se puede observar que al ingresar el dióxido de carbono al entorno, este va desplazando el oxígeno que se encontraba dentro del líquido, provocando que la concentración de dicho gas disminuya conforme avanza el tiempo. Este suceso es percibido tanto por la multiparamétrica como por el prototipo, aún cuando esta ha presentado fallas.

En esta prueba también fue evidente que al transcurrir el proceso de experimentación, los datos que registra el prototipo van disminuyendo en referencia con los registrados por la multiparamétrica.

En esta figura 5.23(a) se puede apreciar la pérdida de información que se mencionó con anterioridad.

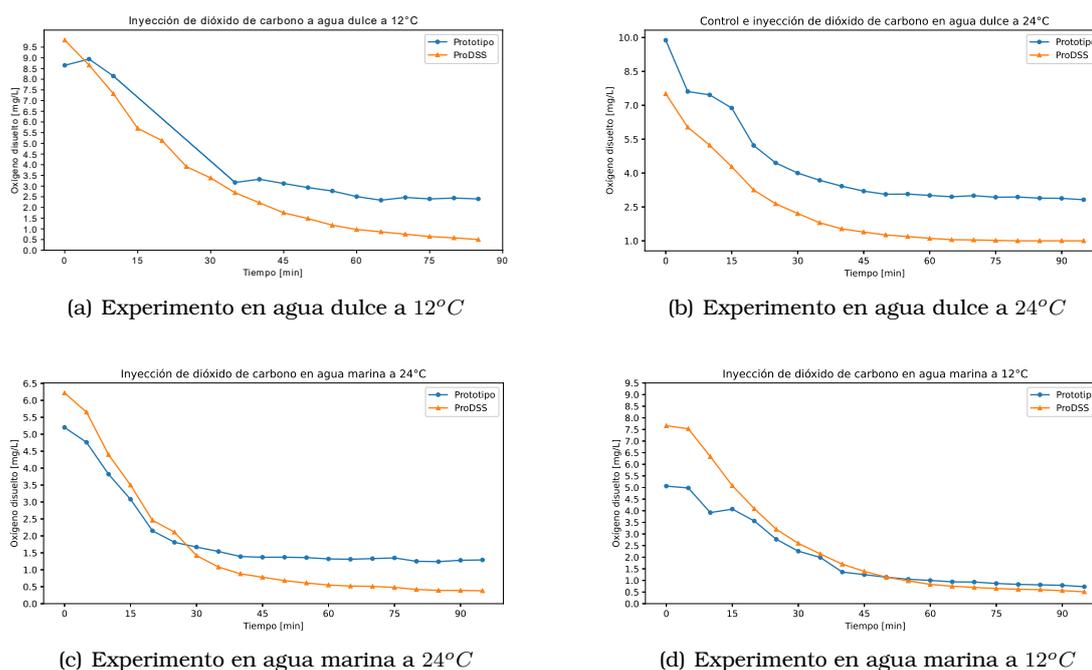


Figura 5.23: Representación gráfica del oxígeno disuelto medido por el equipo de la institución y el prototipo, durante la prueba con el suministro de dióxido de carbono en los experimentos realizados.

#### 5.1.5.4. Total de sólidos disueltos

Equipo de medición	TDS[ppm]			
	Agua dulce a 12°C	Agua dulce a 24°C	Agua marina a 24°C	Agua marina a 12°C
Prototipo	815.42 ( $\pm 16.01$ )	826.81 ( $\pm 24.15$ )	1137.16 ( $\pm 7.80$ )	1972.55 ( $\pm 29.86$ )

Tabla 5.13: Registro de los TDS en del agua entre el equipo de la institución y el prototipo durante los experimentos en la prueba con el suministro de dióxido de carbono.

El sensor de TDS continuo mostrando lecturas irregulares, ya que al observar los datos de la tabla 5.13, las desviaciones estándar registradas en los experimentos en agua dulce son mayores a  $\pm 15$  ppm y en el caso del experimento en agua marina a 24°C se obtuvo una desviación estándar de  $\pm 7.80$  ppm, lo cual es peculiar, ya que dicho sensor no está diseñado para utilizarse en agua marina.

Al analizar la tendencia de las gráficas en los experimento de agua marina, se puede notar que las mediciones registradas por el sensor de TDS reproducían el comportamiento de la temperatura.

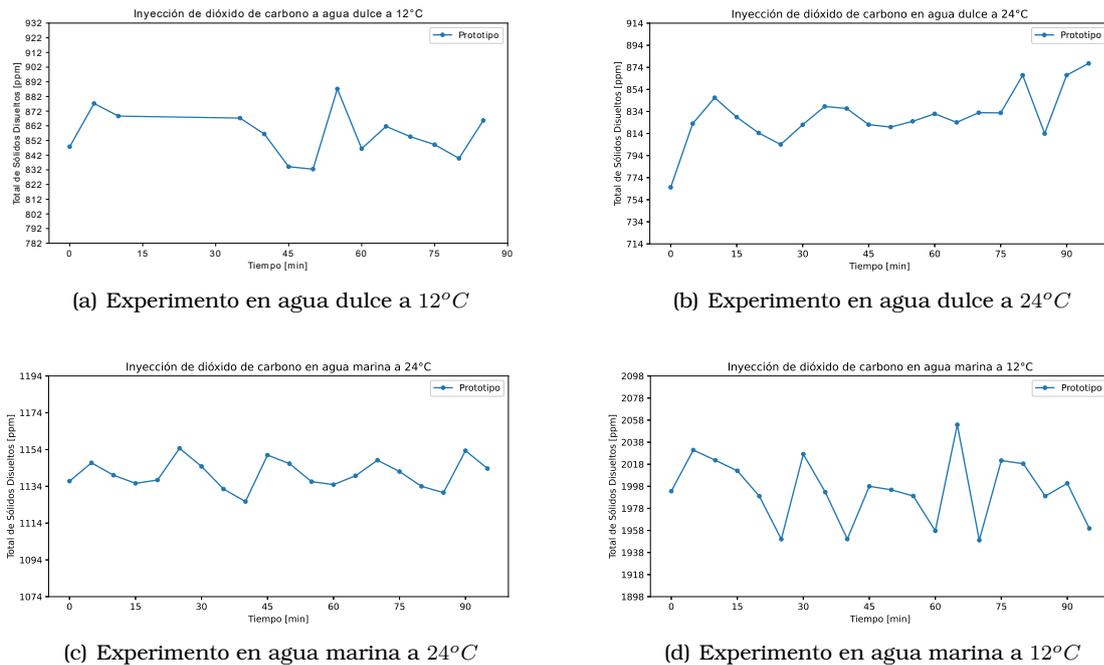


Figura 5.24: Representación gráfica del total de sólidos disueltos medido por el prototipo, durante la prueba con el suministro de dióxido de carbono en los experimentos realizados.

### 5.1.6. Análisis general

Una vez terminada la primera fase de experimentación, se puede concluir que los sensores de pH, oxígeno disuelto y temperatura, que conforman al prototipo, son capaces de reaccionar ante los cambios abruptos del medio, ya que ante las perturbaciones generadas en las distintas pruebas, los sensores registraban las variaciones percibidas, sin importar que el experimento se realizará en agua dulce o en agua marina.

El sensor de temperatura fue el que obtuvo el mejor desempeño, ya que este midió cambios en la temperatura muy similares a los registrados por el equipo de laboratorio, y las desviaciones estándar registradas en las pruebas fueron menores a los  $\pm 0.5^\circ C$ . No obstante, en algunas mediciones llegó a registrar valores irregulares, los cuales pueden haber sido provocados debido a la sensibilidad de la sonda.

En el caso del sensor de pH, este tuvo una variación máxima de  $\pm 0.38$ , con respecto a los valores registrados por el equipo de la institución, sin embargo, al revisar detenidamente las gráficas, se puede percibir que el sensor es capaz de registrar los cambios de pH que existan en el medio, ya que los valores registrados por el equipo de la institución y por el sensor de pH del prototipo seguían las mismas tendencias. Al finalizar los experimentos, se revisó el prototipo y se volvió a calibrar el equipo, pero en esta ocasión se dejó reposar la sonda 5 minutos en las soluciones tampones de pH 7 y pH 4, antes de calibrar el sensor, lo cual mejoró notablemente las lecturas registradas, ya que al medir el valor de pH de distintas soluciones calibradoras, la variación fue de  $\pm 0.05$ .

Durante el proceso de experimentación, el sensor de oxígeno disuelto fue el que presentó mayores anomalías, ya que los valores que se registraban alcanzaron una variación máxima de  $\pm 2.83 \text{ mg/L}$ , con respecto a los obtenidos por la multiparamétrica. Y si se observa, la evolución de los valores registrados por la sonda del prototipo, con respecto a los de la multiparamétrica a lo largo de los experimentos, se puede notar que la diferencia entre las mediciones cada vez era mayor. Al examinar la sonda del sensor, se pudo percibir que su membrana estaba dañada, por lo que el agua interactuaba directamente con el cátodo de la prueba. Además, la solución interna de la sonda se combinaba con los distintos líquidos con los que interactuaba la sonda. Esto explicaba el comportamiento errático del sensor. No

obstante, si se evalúan detalladamente las gráficas de las pruebas, se puede observar que el equipo registraba los cambios abruptos que ocurrían en el entorno, ya que al igual que con el sensor de pH, las mediciones del sensor de oxígeno disuelto del prototipo, seguían el mismo patrón que las mediciones del equipo de laboratorio.

El sensor de TDS fue el que presentó mayor variación en sus mediciones, alcanzado un máximo de  $\pm 57.65$  ppm. Incluso se puede percibir, al evaluar las gráficas, que el comportamiento de las mediciones replica la conducta de la temperatura. Es por esta razón que se concluye que el sensor tenía un error de compensación con respecto a la temperatura. También se encontró que el movimiento de la sonda de TDS, ocasionada por el constante flujo del agua, provocaba perturbaciones en las mediciones.

Al final, no se pudieron corregir los fallas presentadas por los sensores de oxígeno disuelto y TDS, sin embargo, se decidió continuar utilizándolos en la segunda fase, con el fin de demostrar que el sistema de monitoreo es capaz de supervisar cuatro parámetros continuamente.

### 5.1.7. Prueba de servicio con tanques de agua marina.

Dentro de las instalaciones del CICESE, se encuentra una zona donde se realiza el tratamiento de grandes cantidades de agua marina, para después poder distribuirla a los cultivos de los distintos investigadores. Esta zona en particular es conocida por el personal de la institución, debido a que en ella se pierde fácilmente la señal de telefonía móvil y de *Wi-Fi*, por parte de la red estudiantil del CICESE. Este lugar (figura 5.25), está conformado por un sistema de bombas que extraen el agua del mar y la depositan en dos grandes tanques para su correspondiente tratamiento, de igual forma las bombas son las encargadas de distribuir el líquido a los distintos cultivos que la necesitan.



Figura 5.25: Zona de acondicionamiento de agua marina.

Debido a lo anterior, se quería comprobar si el sistema de monitoreo era lo suficientemente robusto para poder transmitir información en este lugar. El prototipo se probó en su versión de boya, como se puede observar en la figura 5.26(a) y el control de paquetes se realizó utilizando el *application server* de *ChirpStack* a través de la *Raspberry Pi*, la cual tenía conectados un *mouse*, un teclado y un monitor (figura 5.26(b)).

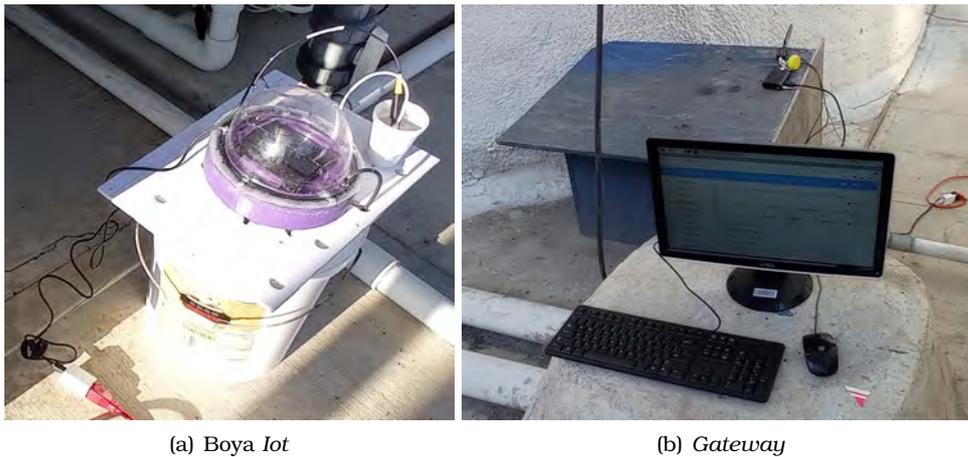


Figura 5.26: Elementos del sistema de monitoreo de la calidad del agua.

La primera configuración que se realizó fue colocando un tanque en medio de la transmisión entre el *gateway* (punto A) y la boya (punto B), como se puede observar en la figura 5.27. Entre el punto A y el punto B habían aproximadamente 6 metros de separación. Las medidas del tanque eran de alrededor de 5m de diámetro por 3m de altura, y este contenía agua salada en su interior. Se estuvieron transmitiendo datos cada minuto durante un periodo de una hora, en la cual se recibía correctamente la información enviada desde el *end-device*, con una tasa de retransmisión de 1 paquete por cada 10 que se recibían correctamente.



Figura 5.27: Ubicación del *gateway* y del *end-device* con uno de los tanques como interferencia.

Para rectificar el correcto funcionamiento del sistema, se propuso cambiar de ubicación a la boya y colocarla en medio de los dos tanques de agua, como se puede ver en la figura 5.28, para observar si esta acción generaba algún cambio en el comportamiento del sistema. La duración de esta prueba fue de media hora, ya que durante ese lapso de tiempo se recibieron sin retransmisiones 29 paquetes de datos y solo uno tuvo que retransmitirse una vez.

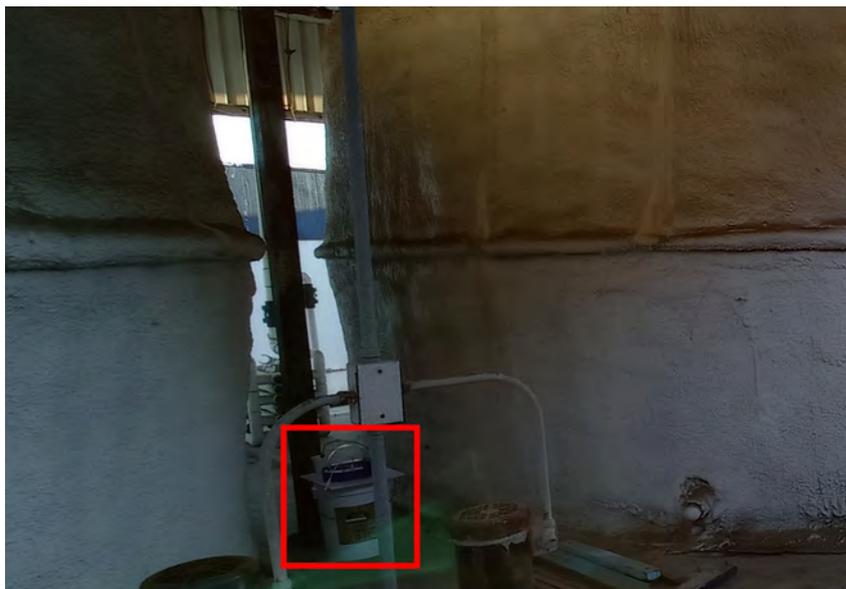


Figura 5.28: Posicionamiento de la boya en medio de los tanques de agua marina.

Con este experimento se pudo corroborar la fortaleza del protocolo LoRaWAN ante este tipo de escenarios, en el que otras tecnologías de comunicación inalámbrica son deficientes.

## 5.2. Fase de evaluación en ambientes de acuicultura

Durante la primera fase de experimentación, se comprobó que tres de los cuatro sensores implementados en el prototipo son aptos para utilizarse tanto en agua dulce como en agua marina. Son capaces de percibir alteraciones en el entorno que monitorean y cuentan con una buena resolución en las lecturas que realizan.

Tomando en cuenta los resultados de la primera fase de experimentación, en esta fase únicamente se analizarán los datos de los parámetros de temperatura y pH. Esto debido a que las fallas que se presentaron en el sensor de oxígeno disuelto no permiten que mida correctamente y en el caso del sensor de TDS, se comprobó que no está diseñado para poder implementarse en una actividad como la acuicultura.

En la fase de evaluación se dejaron de lado los experimentos en un entorno controlado sin organismos, para dar paso a la instalación del prototipo en escenarios reales de acuicultura. Lo anterior con el fin de probar y caracterizar el funcionamiento del sistema en cultivos experimentales de camarón, abulón, carpas koi, lobina rayada y almejas pismo, realizados por investigadores del CICESE.

### 5.2.1. Cultivo experimental de camarón

El primer cultivo experimental en el que se probó el sistema de monitoreo fue de camarón, el cual estaba bajo la supervisión del Doctor Misael Rosales Leija. El sistema acuícola cumplía con el objetivo de preservar a los organismos, ya que no se estaba realizando ninguna actividad con ellos. El sistema acuícola se puede observar en la figura 5.29, el cual es un sistema cerrado conformado por un tanque de compensación y el tanque donde de alojaban los camarones.

#### 5.2.1.1. Diseño experimental

El cultivo de camarones se ubicaba al interior de un invernadero, en el cual se mantenía una temperatura en torno a los  $30^{\circ}C$ , sin embargo, en épocas cálidas del año se habían llegado

a registrar temperaturas mayores a los  $40^{\circ}\text{C}$ . En el interior del invernadero se presentaba un ambiente húmedo.

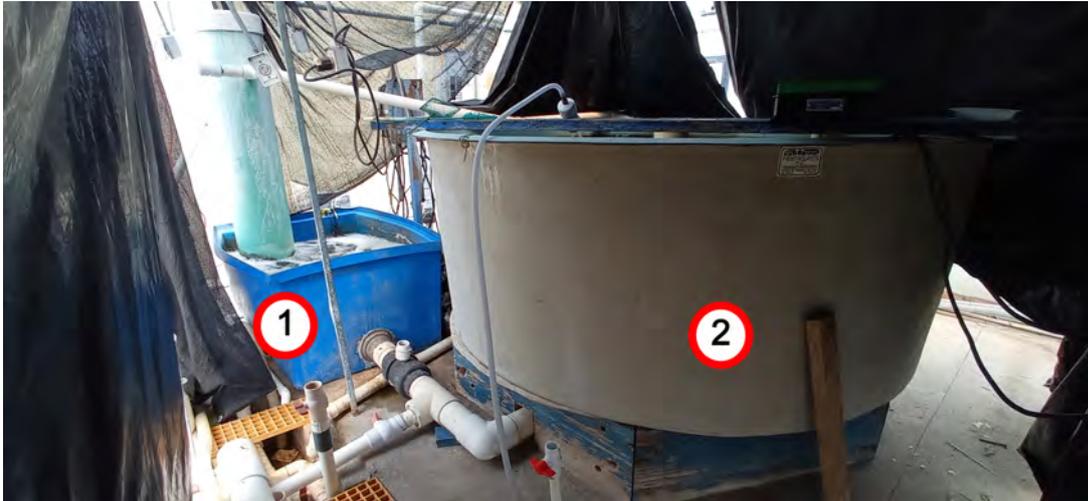


Figura 5.29: Sistema acuícola para el mantenimiento de camarones. Tanque de compensación (1) y tanque de cultivo (2).

En la figura 5.30 se puede apreciar algunos de los camarones que habitaban en el interior del tanque de cultivo.



Figura 5.30: Camarones en el interior del tanque de cultivo

El propósito de este experimento era evaluar el rendimiento del sistema de monitoreo de la calidad del agua, bajo las condiciones que se presentan dentro de un invernadero.

Es importante mencionar, que la estructura en forma de boya que se diseñó para almacenar los componentes del sistema de registro de datos no se utilizó para la realización de este experimento, debido a que no se lograba que fuese completamente impermeable, se ahondará más sobre este tema en la subsección correspondiente al experimento en el cultivo de los carpas koi. Sin embargo, gracias al diseño modular de los componentes del prototipo, el sistema de recolección de datos se pudo adecuar a un gabinete de plástico, el cual se puede apreciar en la figura 5.31. Dicha estructura le aportaba protección a los componentes electrónicos. El gabinete se necesitaba posicionar cerca del tanque para que las sondas de los sensores se pudieran colocar en su interior, debido a la reducida longitud de las pruebas.



Figura 5.31: Adaptación del sistema recolector de datos en un gabinete.

La composición del escenario de experimentación se puede apreciar en la figura 5.32, en la cual se puede notar que el sistema de monitoreo se posicionó junto al tanque de compensación, en el cual se introdujeron las sondas del prototipo para monitorear la calidad del agua. Para supervisar la correcta transmisión de datos del *end device* al *gateway*, se conectaron a la *Raspberry Pi* un monitor, un teclado y un *mouse*.



Figura 5.32: Configuración del escenario de experimentación realizada durante el experimento en el cultivo de camarones. Tanque de compensación (1), sistema de recolección de datos (2) y *gateway* (3).

Para este experimento se fijó un tiempo de duración de dos días. Se realizó una medición de los parámetros de la calidad del agua cada minuto, para evaluar el rendimiento del sistema con el mínimo intervalo de recolección de información que se le puede configurar. Por último, el equipo se energizó por medio de una toma de corriente, ya que el lugar no contaba con acceso a luz solar para poder hacer uso de los paneles solares y la batería.

#### 5.2.1.2. Análisis de resultados

El sistema se supervisó durante un periodo de dos horas, en las cuales se validó la correcta transmisión y recepción de los datos por parte del *end device* y el *gateway*. Además, se verificó que el procesamiento de la información se estaba realizando exitosamente. Al corroborar lo anterior, se decidió dejar trabajando el sistema sin supervisión hasta el día siguiente. En la figura 5.33 se puede ver la cantidad de lecturas que realizó el prototipo. Al analizar los datos se puede notar que el prototipo funcionó durante un periodo de tres horas.

El problema que se presentó fue que la *Raspberry Pi* colapso debido a la temperatura presente en el entorno. Esto fue ocasionado debido a que los investigadores al retirarse de las instalaciones cierran por completo el invernadero, lo que provoca que la temperatura del ambiente aumente. Ante tal suceso, se desconectaron todos los periféricos del ordenador, se detuvo el experimento y se retiró la *Raspberry Pi* del invernadero para regular su temperatura.

Al revisar los demás componentes del sistema, se encontró que el *end device* continuaba funcionando y compartiendo los datos que registraba de la calidad del agua, sin embargo, al no estar disponible el *gateway*, no había forma de que estos se registraran. El gabinete se encontraba en la misma posición del día anterior y sin ningún tipo de filtración o salpicadura.

Al estabilizarse la temperatura de la *Raspberry Pi* se revisó para comprobar que, ante el problema que se presentó, no se hubiera comprometido la integridad del dispositivo. Después de examinar el equipo y de ponerlo a prueba en conjunto con el *end device*, se verificó que el sistema continuaba funcionando correctamente.

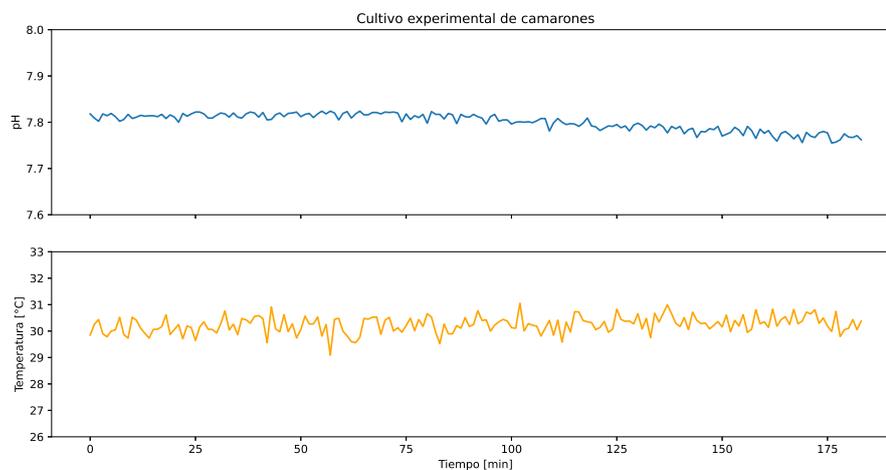


Figura 5.33: Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el prototipo en el cultivo experimental de camarones.

Al evaluar los datos recopilados por el sistema, durante los primeros 100 minutos del experimento se registró un pH promedio de 7.81 unidades, con una variación de  $\pm 0.007$  unidades. Sin embargo, tiempo después se comenzó a notar un ligero decremento en este parámetro, reduciendo su valor a un promedio de 7.77 unidades con una variación de  $\pm 0.009$ . Este decremento en el pH no es abrupto y se va presentando conforme avanza el tiempo, por lo que se asocia al funcionamiento natural de los sistemas de recirculación acuícola, ya que este tipo de sistemas acidifican el agua y como el cultivo de camarones no cuenta con un actuador que regule el pH del agua, el dispositivo captó este comportamiento del sistema acuícola.

La temperatura promedio registrada en el cultivo fue de  $30.24^{\circ}\text{C}$ , con una variación de  $\pm 0.32^{\circ}\text{C}$ , lo cual es coherente con la temperatura registrada dentro del invernadero.

### 5.2.2. Cultivo experimental de abulones

Concluido el experimento en el cultivo de camarones, se planteó probar el sistema de monitoreo de la calidad del agua en el cultivo experimental del Maestro Jesús Roberto Oyervides Figueroa. El experimento del Maestro, en términos generales, consiste en medir el impacto que tiene la cantidad de dióxido de carbono en el ambiente sobre las conchas de los abulones. Dichos organismos se encuentran distribuidos en diferentes sistemas acuícolas en los cuales se varía el pH del agua con el fin de observar el desarrollo de los animales. El maestro Roberto cuenta con cultivos de abulones rojos, azules y una especie híbrida entre las dos anteriores, con el objetivo de identificar que especie de abulón es la que mejor se adapta bajo sus condiciones de experimentación.

### 5.2.2.1. Diseño experimental

En la figura 5.34(a) se pueden observar las peceras empleadas por el equipo del investigador Roberto para la crianza y experimentación con los abulones. En la figura 5.34(b) se muestra el arreglo de equipos *Aqua Medic* utilizado por los investigadores para registrar el pH de los distintos cultivos experimentales.



(a) Peceras empleadas para el cultivo de abulones. (b) Equipo de medición utilizado para el monitoreo del pH de los cultivos.

Figura 5.34: Cultivos experimentales de abulón

Como se puede observar en las figuras 5.34(a) y 5.35, los sistemas con los que trabajan los investigadores son reducidos en tamaño, por lo que el diseño de la boya no es viable para utilizar en este experimento. Por ello, se aprovechó el *case* realizado en el cultivo de camarones para llevar a cabo la prueba.

La composición del escenario de experimentación se puede apreciar en la figura 5.35, en la cual se puede observar que el sistema de monitoreo se colocó en el tanque de compensación asociado al segundo grupo de experimentos. En esta prueba se conectaron a la *Raspberry Pi* los periféricos correspondientes para poder monitorear el correcto funcionamiento del ordenador y que el proceso de transmisión y recepción de la información se realizara adecuadamente.

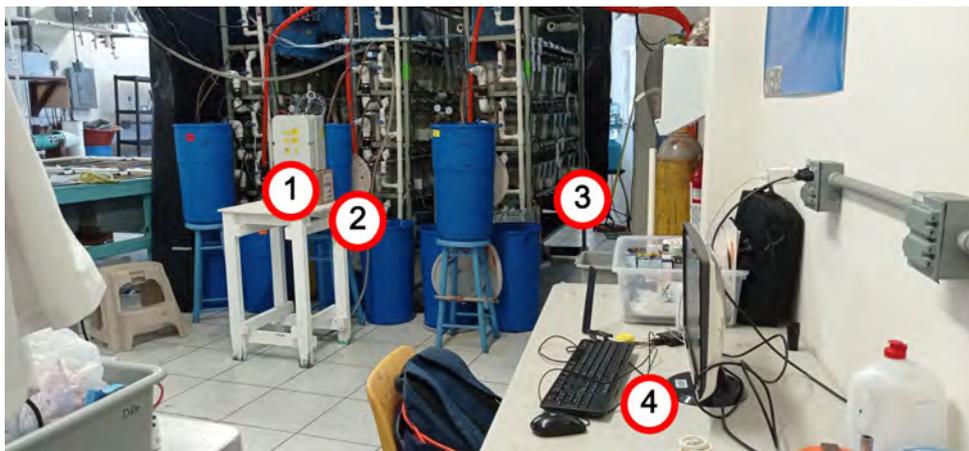


Figura 5.35: Configuración del escenario de experimentación realizada en el cultivo de abulones. Sistema de recolección de datos (1), tanque de compensación (2), cultivos de abulones (3) y *gateway*.

El equipo de trabajo del Maestro Oyervides monitorea los parámetros del agua de sus sistemas dos veces al día y cuenta con una bitácora como parte de su trabajo. El propósito de este experimento es comparar el registro que realizan los investigadores con el registro

que realiza el sistema de monitoreo de la calidad del agua. En este escenario, la mayoría del tiempo hay personas trabajando en el laboratorio, moviéndose de un lado a otro, realizando actividades como la recolección de datos, el recambio de agua de los sistemas, la valoración de los organismos, entre otras tareas. Éstas características del escenario representan un desafío para el sistema, ya que debe de ser capaz de recolectar los datos pese a los eventos que sucedan en el exterior.

La alimentación del sistema de recolección de datos fue por medio de una toma de corriente, la duración del experimento se fijó en tres días y se programó el sistema para realizar una medición de los parámetros de la calidad del agua cada minuto.

### 5.2.2.2. Análisis de resultados

Durante los primeros dos días del experimento, se supervisó el funcionamiento del sistema, al inicio del día y en la tarde, se verificaba que el sistema recopilara la información de la calidad del agua, además de realizar el procesamiento de los datos. En el tercer día, no se realizó ninguna supervisión de los procesos en el sistema y se dejó que trabajara hasta la conclusión del experimento.

A lo largo de la prueba, los investigadores trabajaban con normalidad y realizaban sus actividades diarias. Esto implicaba el cruzar en medio de la línea de vista directa entre el *end device* y el *gateway*, causando interferencia en la comunicación de los dispositivos. También, al realizar el recambio de agua, ellos salpicaban el gabinete que contenía la circuitería. No obstante, el funcionamiento del sistema, en general, durante el experimento fue exitoso y se logró la recopilación de la información a lo largo de los tres días de experimentación.

Al analizar los datos de la figura 5.36, se puede observar que durante los tres días de duración del experimento, existió un momento del día en el que el prototipo registró una perturbación en el cultivo que ocasionaba que los valores registrados de la calidad agua cambiaran abruptamente. El suceso que provocaba este comportamiento, en la información recopilada por el sistema de monitoreo, era el proceso de recambio de agua que efectuaban los investigadores en sus cultivos. Al presentarse valores irregulares en las lecturas, el proceso de alerta del sistema se activaba, el cual efectuaba el envío del mensaje de alerta, avisando al personal que había ocurrido un evento en los cultivos, tal que se habían visto afectados los parámetros de la calidad del agua.

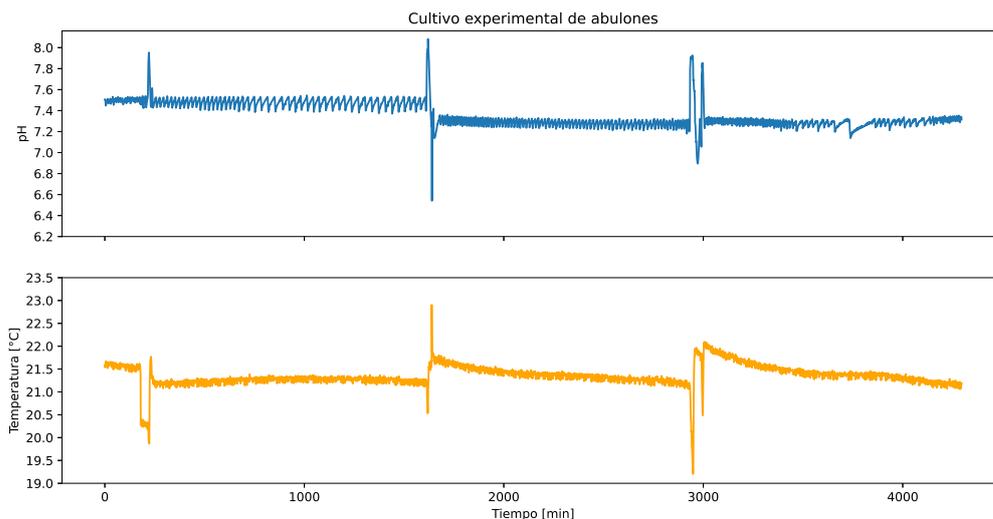


Figura 5.36: Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el prototipo en el cultivo experimental de abulones.

Este experimento resalta la importancia de contar con un monitoreo continuo de la calidad

del agua, ya que comparado con el registro que realizan los investigadores, no tienen conocimiento de los eventos que suceden a lo largo del día en sus cultivos, únicamente cuentan con la información del inicio del día y del final. Si detectan una anomalía, no cuentan con el registro del momento del día en el que se presentó y asociar el problema a un hecho en particular se vuelve más complicado. Con el registro continuo de las variables de la calidad del agua, si se presenta algún problema en el cultivo, se cuenta con la hora del día en el que se presentó y es más fácil identificar el motivo pudo haber provocado el problema. Tomando en cuenta el sistema de alertas, no es necesario monitorear de cerca durante todo el tiempo los datos que se obtienen, ya que el mismo sistema, en caso de detectar un problema, alerta al usuario final.

Al evaluar la información recopilada por el sistema durante el primer día de experimentación se registró un pH promedio de 7.5 unidades con una variación de  $\pm 0.04$  unidades, lo cual concordaba con los datos registrados por el Maestro Roberto. A lo largo de los dos últimos días de experimentación, el pH se redujo a un promedio de 7.28 unidades con una variación de  $\pm 0.03$  unidades, este decremento de 0.2 unidades en el pH fue provocado por el equipo del Maestro Roberto con fines de experimentación.

La temperatura promedio registrada en el cultivo de abulones fue de  $21.3^{\circ}\text{C}$  con una desviación estándar de  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Es importante mencionar que cada vez que se realizaba el recambio de agua en el cultivo, la temperatura aumentaba en promedio  $0.6^{\circ}\text{C}$ , este suceso se puede apreciar en la gráfica correspondiente al parámetro de la temperatura, ya que después de que se presenta el registro de datos inusuales debido al recambio, se puede notar que la temperatura del agua aumenta y conforme avanza el tiempo decrementa hasta que se estabiliza en  $21.3^{\circ}\text{C}$ .

### 5.2.3. Estanque ornamental de carpas koi

Al completar los dos experimentos anteriores, se comenzó con el proceso para acondicionar los componentes del sistema de monitoreo de la calidad del agua e implementarlo en un estanque ornamental de carpas koi, en cual también hay presencia de microalgas. El estanque mencionado le pertenece a la Doctora Carmen Guadalupe Paniagua Chávez y se encuentra ubicado en la entrada del edificio SUBNARGENA del CICESE (figura 5.37).



Figura 5.37: Estanque ornamental ubicado en la entrada del edificio SUBNARGENA del CICESE.

#### 5.2.3.1. Acondicionamiento del sistema

Antes de comenzar con el experimento en el estanque de las carpas koi, primero se evaluó si la estructura impresa en 3D, para almacenar los componentes electrónicos, era impermeable

y si podía flotar. Para realizar esta prueba se relleno la estructura con piedras y se introdujo en un bote de 20 litros con agua, como se puede observar en la figura 5.38(a).



(a) Arreglo propuesto para probar la flotabilidad e impermeabilidad del cuerpo impreso. (b) Problema de filtración detectada en el cuerpo impreso.

Figura 5.38: Prueba de flotabilidad e impermeabilidad del cuerpo impreso en 3D.

Al comenzar esta prueba se pudo notar que la estructura podía flotar y soportaba un peso de 2.250 *kg* sin hundirse, por lo que cumplía con la característica de flotabilidad y toleraba un peso mayor al de los componentes electrónicos. Para evaluar si la estructura era impermeable, se dejó reposando al interior del bote durante 24 horas. Cumplido el plazo, se revisó el cuerpo y se encontraron pequeñas gotas en su interior, como se puede observar en la figura 5.38(b), esto podría ser debido a que el proceso de impresión no es perfecto y en algunas partes dejó pequeñas fisuras a través de las cuales se filtró el agua.

Para solucionar el problema de la filtración en el cuerpo impreso, se utilizó pegamento para PVC (WELD ON 700 PVC), el cual se untó en el interior de la boya. Una vez que secó el pegamento, se dejó el cuerpo sumergido en agua durante un periodo de dos días, para corroborar que el pegamento fuese efectivo. Transcurrido el tiempo de prueba, se pudo comprobar que ya no se presentaban filtraciones en el cuerpo, por lo que se procedió a realizar la siguiente prueba.

Asegurada la impermeabilidad de la estructura impresa, faltaba garantizar que no se presentaran filtraciones en la unión entre el cuerpo impreso y el acrílico. En el diseño de la boya, se propuso utilizar un empaque y tornillos para formar un sello que no permitiera la entrada de agua. En la figura 5.39 se puede observar que se sumergió la boya por completo en el bote de 20 litros para probar que no hubiese filtraciones. No obstante, transcurridos cinco minutos de la prueba, se notó que el agua comenzaba ingresar al interior, por lo que se retiró la boya del agua. Para solucionar este problema se decidió sellar por completo la boya con silicón *Sista*.

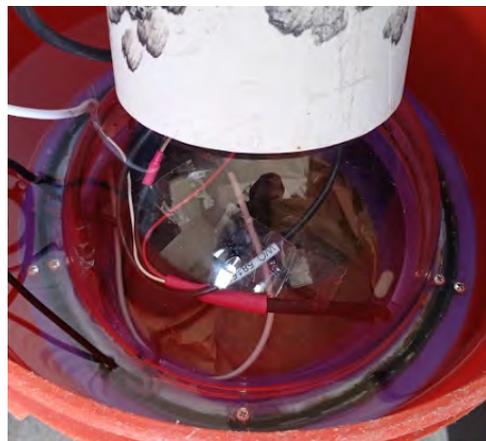


Figura 5.39: Prueba de hermeticidad de la boya.

Concluida la revisión de hermeticidad y flotabilidad de la boya, se procedió a introducir cada uno de los componentes que constituyen al dispositivo IoT en el interior de la estructura diseñada en 3D. Este proceso se puede observar en la figura 5.40. Se puede notar que una vez que se terminó de armar la boya, se selló con silicón para asegurar que fuera completamente hermética. Se dejó reposar el equipo por un periodo de 24 horas para que el silicón secase por completo. Durante el proceso de armado de la boya, los sistemas electrónicos se encontraban sin energía.



(a) Componentes que constituyen al dispositivo IoT. (b) Dispositivo IoT con el sistema de recolección de datos en su interior.



(c) Dispositivo IoT en su versión de boya, completamente armado. (d) Boya en reposo, mientras se seca el silicón.

Figura 5.40: Proceso de armado del dispositivo IoT en su versión de boya.

Al energizar el dispositivo IoT, por primera vez en su versión de su boya, se puso a prueba su conectividad con el *gateway*. En esta prueba se presentó un problema, ya que el *end device* trataba de comunicarse con el *gateway*, pero este no reconocía al dispositivo, por lo que rechazaba su solicitud para unirse al servidor de red. Se desconocía la causa de este suceso, sin embargo, al consultar el foro oficial de la comunidad de *ChirpStack*, se mencionaba que esto sucedía por un error en la base de datos del servidor de red, por lo que se procedió a limpiarla. No obstante, esta acción no resolvió el problema.

Se continuaron realizando diversas modificaciones en la configuración del *gateway*, en específico, en cada uno de los servidores de *ChirpStack*, sin embargo, el problema continuaba, por lo que se concluyó que la falla se estaba presentando en el dispositivo IoT, así que se tomó la decisión de desarmar la boya y revisar cada uno de sus componentes.

Al desmontar la boya, antes de revisar el *software* y *hardware* del dispositivo, se probó si se podía establecer un canal comunicación entre el *gateway* y el sistema de recolección de datos, como se muestra en la figura 5.41. Al instante en el que se energizó el sistema de recolección de datos, este entabló comunicación con el *gateway* y se pudo unir a la red en cuestión de segundos y al monitorear los paquetes que se recibían en el *gateway*, estos eran

correctos. Dado este resultado, se concluyó que el problema de conectividad presentado con la boya completamente armada, pudo haber sido causado por interferencia entre la antena del dispositivo y los paneles solares o debido a que el sistema estuviese completamente sellado.



Figura 5.41: Escenario implementado para probar la conectividad entre el *gateway* y el sistema de recolección de datos.

Para encontrar cual era el problema, se volvió a armar la boya con todo y cúpula, sin embargo, en esta ocasión no se selló. Para poner a prueba la robustez de la comunicación, se propusieron tres escenarios, en el primero se dejaría interactuando la boya con el *gateway* a un metro de distancia, en el segundo se alejaría la boya del *gateway* una distancia de cinco metros y, por último, en el tercero se colocaría en medio de ambos equipos una pared que interfiriera con la línea de vista directa. Estas configuraciones se pueden observar en la figura 5.42.



(a) Comunicación entre el *gateway* y el *end device* a un metro de distancia. (b) Comunicación entre el *gateway* y el *end device* a cinco metros de distancia.



(c) Comunicación entre el *gateway* y el *end device* con una pared como interferencia.

Figura 5.42: Escenarios propuestos para evaluar la robustez del enlace de comunicación entre el *gateway* y el *end device*.

En los tres escenarios propuestos, la comunicación se daba de manera adecuada, ya que los paquetes enviados por el *end device* eran recibidos por el *gateway* y la información era correcta. Dado este resultado, comenzó a tomar mayor peso la hipótesis de que el problema había sido originado por sellar completamente la boya.

Para refutar o verificar la hipótesis, anteriormente mencionada, se procedió a sellar la boya con silicón. Durante el proceso de sellado de la boya, esta mantenía la comunicación con el *gateway*. Al terminar de colocar el silicón en la boya y mientras se dejaba reposando para que se secara el silicón, se empezó a observar un comportamiento anormal en los datos que recibía el *gateway*, ya que el primer intento de transmisión del *end device* era exitoso, sin embargo, realizaba las dos retransmisiones que se le habían programado en caso de pérdida de datos. Este suceso era anormal y se comenzó a presentar después de sellar por completo la boya. Este hecho se asoció a que posiblemente la composición del silicón generaba interferencia entre la comunicación del *gateway* y el *end device*.

No obstante, después de analizar detalladamente el comportamiento del sistema, se encontró que la antena de la boya contaba con la potencia suficiente para que la señal se pudiera enviar desde el equipo sellado al *gateway*, pero la antena del *gateway* no contaba con la suficiente potencia para que la boya pudiera recibir el *acknowledged* de dato recibido, por lo que el *end device* realizaba las retransmisiones.

La primera vez que se intentó establecer comunicación entre la boya y el *gateway* ocurrió el mismo problema, ya que la boya le enviaba la solicitud de unión al *gateway*, y este al recibir el mensaje, le pedía a la boya que se identificara, pero como la boya no recibía ningún mensaje, en vez de identificarse, mandaba nuevamente el mensaje de solicitud de unión, por lo que al *gateway* no le quedaba otra opción que rechazar al dispositivo.

Para resolver este problema, se investigó una manera de aumentar la potencia de transmisión del *gateway*, sin embargo, no se encontró información de como realizarlo, por lo que se decidió continuar con el experimento con la configuración que se tenía.

### 5.2.3.2. Diseño experimental

Después de acondicionar cada uno de los componentes del sistema de monitoreo del agua, se continuó con la preparación de la estación de monitoreo, la cual se puede observar en la figura 5.43. Dicha estación estaba conformada por el *gateway* y los periféricos conectados a la raspberry para supervisar el funcionamiento de la boya. La instalación se realizó al interior del edificio SUBNARGENA.



Figura 5.43: Estación de monitoreo montada al interior del edificio SUBNARGENA durante el experimento en el estanque de carpas koi.

La boya se introdujo al estanque de las carpas koi durante la tarde de un día soleado. Se puede observar en la figura 5.44(a) la interacción que se presentaba entre el dispositivo IoT y el estanque ornamental.



(a) Dispositivo IoT tomando lecturas de la calidad del agua del estanque de carpas koi.

(b) Carpas koi hospedadas en el estanque ornamental.

Figura 5.44: Estanque ornamental de carpas koi.

El objetivo de este experimento es probar el sistema de monitoreo en su versión de boya, para evaluar su flotabilidad e impermeabilidad, además se quiere comprobar si el diseño realizado de la estructura es eficaz para permanecer a la intemperie y resguardar los componentes electrónicos del sistema de recolección de datos. A lo largo del día, en la ubicación del edificio SUBNARGENA, se presentan corrientes de aire que mantienen en constante movimiento el agua del estanque, por lo que el dispositivo IoT estará continuamente cambiando de posición. Es importante mencionar que las carpas koi atraen a un águila que intenta cazarlas, por lo que se presentan momentos del día en los que este depredador se zambulle en el agua, lo que podría ocasionar que la boya pudiese voltearse o ser movida bruscamente por la acción del águila.

Por otra parte, este experimento permitió evaluar si el agua representa un problema para la transmisión de datos entre el *gateway* y el *end device*.

La duración del experimento se determinó que sería de dos días. Se configuró que el sistema realizara una medición de los parámetros de la calidad del agua cada minuto.

Debido a la naturaleza del escenario, se puede probar la alimentación del dispositivo de recolección de datos por medio de energía solar. Al dejar el experimento funcionando durante 48 horas, se aseguraba que durante las 24 horas del segundo día, el sistema estaría trabajando con la energía proporcionada por los paneles solares, ya que la batería se habría descargado durante la noche del primer día.

### 5.2.3.3. Análisis de resultados

La supervisión del sistema de recolección de datos se realizaba una vez al día, dicha actividad consistía en revisar que la boya se mantuviera flotando en el estanque de carpas koi y que no presentara signos de filtración en su interior, para esto se inspeccionaba cuidadosamente que dentro la cúpula no hubiera presencia de gotas de agua y que no estuviera empañada. Una vez comprobado que el dispositivo IoT se encontraba en óptimas condiciones, se verificaba que la transmisión de datos entre el *end device* y el *gateway* se efectuara adecuadamente.

Si se realiza un análisis de la cantidad de lecturas realizadas por el dispositivo IoT, en la figura 5.45, se puede observar que estuvo en funcionamiento durante un periodo de aproximadamente 26 horas y media. El problema que se presentó fue que los paneles solares no fueron capaces de generar la energía suficiente para poder alimentar al sistema de recolección de datos y a la vez cargar la batería. Debido a esta situación se decidió concluir el experimento 12 horas antes del tiempo especificado. En este experimento, el *gateway* se mantuvo funcionando correctamente todo el tiempo.

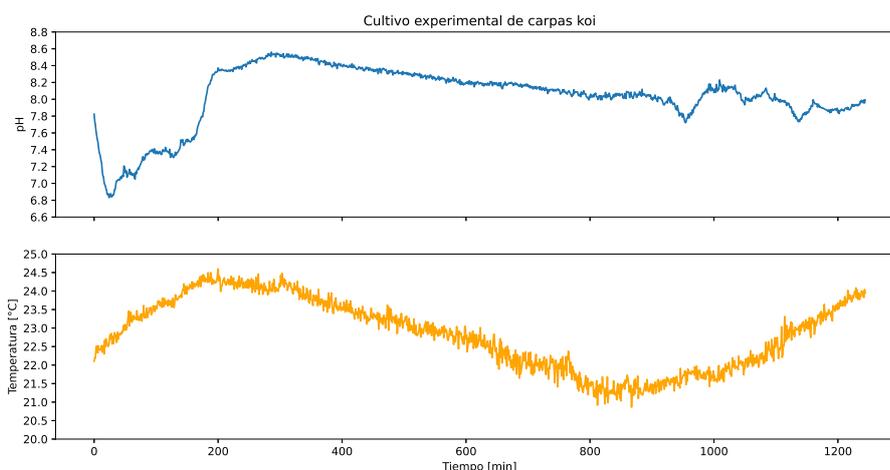


Figura 5.45: Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el prototipo en el estanque ornamental de carpas koi.

Al evaluar los datos de temperatura registrados por el prototipo, en la figura 5.45, se puede observar que estos tienen un comportamiento senoidal, el cual concuerda con la conducta de la temperatura a lo largo del día. En la lectura realizada en el minuto 200 del experimento, se presentó la mayor temperatura registrada del día, cuyo valor fue de  $24.60^{\circ}\text{C}$ , esto sucedió a las 6 de la tarde con 41 minutos (hora de Ensenada) y a partir de ese momento, la temperatura comenzó a decaer hasta los  $20.86^{\circ}\text{C}$ , este valor se registró a las 9 de la mañana del día siguiente y fue correspondiente al minuto 867 del experimento. Por último, después del minuto 867, se observa como la temperatura comenzó a elevarse alcanzando un valor de  $24.09^{\circ}\text{C}$  en la última lectura realizada por la boya, lo cual sucedió a las 4 con 43 minutos de la tarde. Al observar estos resultados, se puede concluir que el dispositivo IoT realizó un correcto monitoreo de la temperatura del agua del estanque a lo largo del experimento.

Analizando el pH registrado en la figura 5.45, se puede observar que este parámetro cuenta con fluctuaciones, las cuales muestran que durante el día aumenta y durante la noche decrece. En [54] se menciona que en entornos con un desarrollo elevado de algas se pueden observar cambios en el pH durante el día, debido a que cuando estos organismos acuáticos crecen y se reproducen utilizan  $\text{CO}_2$ . Al consumir el dióxido de carbono presente en el agua, esto provoca que el pH aumente. Si durante el día se presentan las condiciones favorables para el crecimiento de algas, mientras los rayos del sol aumentan la temperatura del agua, el entorno se volverá más alcalino. Generalmente, el pH alcanza su valor máximo durante la tarde y desciende por las noches, esto es debido a que el crecimiento de algas está condicionado a la profundidad a la que puede penetrar la luz solar.

#### 5.2.4. Cultivo experimental de lobina rayada

Al tener conocimiento del desempeño del dispositivo IoT con el uso de paneles solares, se decidió continuar con los experimentos, pero en cultivos en los que se pudiera conectar el equipo a una toma de corriente. Tomando en cuenta lo anterior, se consultó con el Maestro Damián Hernández Bautista la posibilidad de implementar el prototipo del sistema de monitoreo de la calidad del agua en su cultivo experimental de lobina rayada, el cual estaba ubicado en el laboratorio de peces marinos del CICESE. El investigador aceptó que se colocara el sistema en su cultivo experimental.

##### 5.2.4.1. Diseño experimental

En la figura 5.46 se puede ver la composición del cultivo experimental del Maestro Damián, cada tina contaba con organismos en su interior y el experimento del investigador consistía

en encontrar un sustituto, de calidad y nutrición, a las harinas de pescado. Las cuales son altas en precio, y sobre todo, altas contaminantes y degradantes ecológicas. En el experimento se realiza una evaluación de la sustitución de la harina de pescado (alimento comúnmente utilizado en la acuicultura) por harina de subproducto de ave de grasas. Las sustituciones se realizaban de manera continua progresiva (0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %). El cultivo del Maestro Damián se basaba en un Sistema de Recirculación Acuícola, el cual podía adaptarse para ser cerrado o abierto, el agua circulaba a través de todas las tinas, por lo que todo el sistema compartía las mismas condiciones de la calidad del agua.



(a) Vista lateral del cultivo de lobina rayada

(b) Vista interna del cultivo de lobina rayada

Figura 5.46: Composición del cultivo experimental de lobina rayada

Como se puede observar en las imágenes de la figura 5.46, las tinas utilizadas para el cultivo de lobina rayada son reducidas en tamaño, por lo que el uso del dispositivo IoT en su versión de boya quedó descartado. Por esta razón se procedió al desmontaje de la boya y se verificó que todos los circuitos en su interior se encontraran en perfectas condiciones, después de haber pasado 36 horas sumergidos en el estanque de las carpas koi. Contando con todos los componentes del sistema, se procedió a armar el dispositivo IoT en su versión de gabinete, el cual fue utilizado por primera vez en el experimento del cultivo de camarón.

La ubicación de los componentes del prototipo del sistema de monitoreo de la calidad del agua se pueden apreciar en la figura 5.47(a), el dispositivo IoT se colocó cerca de la tina de la cual se tomarían las lecturas de la calidad del agua y el *gateway* se posicionó sobre una mesa, como lo indica la flecha de la figura 5.47(b).



(a) Ubicación de los componentes del sistema de monitoreo. Posición del dispositivo IoT (A) y posición del *gateway* (B).

(b) Ubicación inicial del *gateway*

Figura 5.47: Configuración inicial del escenario de experimentación realizada en el cultivo de lobina rayada.

La mesa se encontraba ubicada detrás de un muro que separaba el cultivo de experimentación del pasillo. Con esta configuración se presentó un problema, en el que el proceso de

transmisión y recepción de datos se daba de forma adecuada, no obstante, la información que se recibía en el *gateway* era errónea, ya que los valores obtenidos indicaban lecturas de pH mayores a 10 unidades y en cuanto a la temperatura, se recibían datos que oscilaban entre valores positivos y negativos.

Este problema se relacionó a la interferencia que sufría la señal que se transmitía del *end device* al *gateway*, por parte de las tinas de cultivo, la gran cantidad de agua que se manejaba en el lugar y los muros de concreto. Para solucionar esta problemática se posicionó de otra forma el *gateway*, de tal manera que se presentara línea de vista directa entre las antenas del *end device* y el *gateway*, en la figura 5.47(b) se puede observar la posición final del *gateway*, resaltada con un círculo rojo. Y en la figura 5.48 se aprecia la línea de vista directa entre las antenas de los equipos.

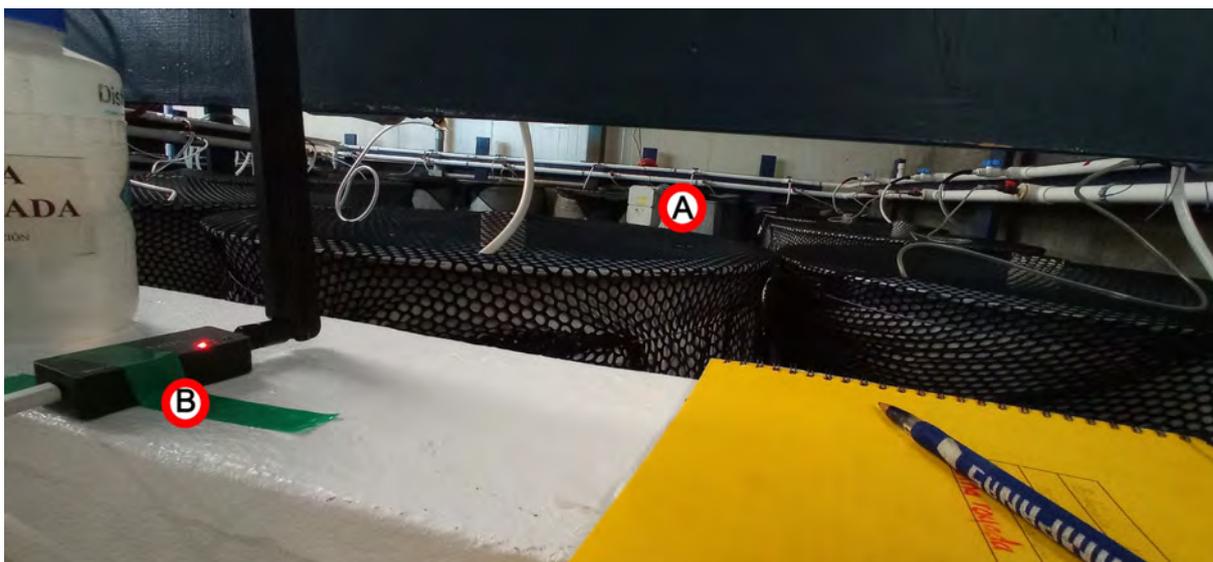


Figura 5.48: Línea de vista directa entre las antenas del *end device* y el *gateway*. Posición del dispositivo IoT (A) y posición del *gateway* (B).

En la figura 5.49(a) se puede observar la forma en que se acomodó el dispositivo IoT para que realizara la medición de la calidad del agua del cultivo de lobinas. En la figura 5.49(b) se pueden notar los organismos en el interior de la tina.



(a) Dispositivo IoT tomando lecturas de la calidad del agua en el cultivo de lobina rayada. (b) Lobina rayada cultivada por el Maestro Damián.

Figura 5.49: Cultivo experimental de lobina rayada

El objetivo de este experimento era evaluar el rendimiento del sistema sin que este se

supervisara, por lo que una vez instalado el sistema y energizado, se dejó que interactuaran el *gateway* y el *end device* durante un periodo de dos días, que fue la duración del experimento. Se programó en el dispositivo de recolección de datos, que realizara una medición de los parámetros de la calidad del agua cada minuto.

Los resultados de este experimento se pudieron valorar hasta el final del mismo.

#### 5.2.4.2. Análisis de resultados

Analizando los resultados de la gráfica mostrada en la figura 5.50, se puede observar que, a lo largo del periodo de experimentación, se presentó un comportamiento constante en los parámetros de la calidad del agua que se midieron. Este comportamiento es el que se esperaría observar de un cultivo experimental, para poder asegurar el éxito de las operaciones acuícolas. En el gráfico no se ven reflejadas las acciones de mantenimiento realizadas por el investigador, ya que el diseño de sistema permitía mantener estables los parámetros de la calidad del agua en los tanques de cultivo.

Es importante mencionar que el sistema de recolección de datos de la calidad del agua se mantuvo funcionando y en servicio durante todo el tiempo que duró el experimento.

El valor promedio de pH registrado durante este experimento fue de 7.9 unidades con una desviación estándar de  $\pm 0.007$  unidades.

La temperatura promedio registrada en el cultivo de lobina rayada fue de  $22.5^{\circ}\text{C}$  con una desviación estándar de  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Éste parámetro estaba regulado por un enfriador. Por esta razón, en la gráfica de temperatura se observa un comportamiento de onda triangular.

El registro realizado con el prototipo de sistema de monitoreo fue similar a los valores establecidos por el Maestro Damián, el cual mantenía fijo el valor de la temperatura en  $22.5^{\circ}\text{C}$  y el del pH en un intervalo de 7.6 a 8 unidades.

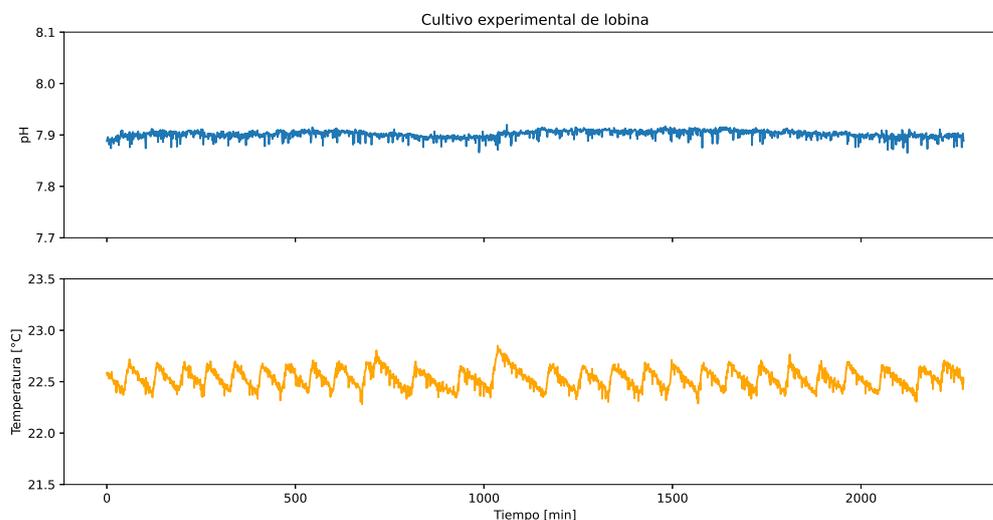


Figura 5.50: Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el prototipo en el cultivo experimental de lobina rayada.

#### 5.2.5. Cultivo experimental de almejas pismo

Por último, se puso a prueba el prototipo de sistema de monitoreo de la calidad del agua en un cultivo experimental de almejas pismo, del cual la Doctora Carmen Guadalupe Paniagua Chávez y el Maestro Salvador Villasuso Palomares eran los encargados de supervisar y mantener en condiciones adecuadas a los organismos. Este cultivo tenía el objetivo de preservar a las almejas hasta el día en que se realizara el proceso para liberar sus gametos. La ubicación del cultivo experimental fue en el laboratorio de moluscos del CICESE.

### 5.2.5.1. Diseño experimental

La configuración del escenario para poder preservar a las almejas pismo se puede observar en la figura 5.51. Este escenario es muy similar al utilizado durante la primera fase de experimentación, pero en este caso se le añadió el tanque donde se alojarían los organismos y el biofiltro. Para contar con un punto de referencia, se utilizó el equipo *Aqua Medic* para medir el pH del cultivo, sin embargo, como el registro de pH se mantuvo constante con una ligera variación de  $\pm 0.01$  unidades y la supervisión del escenario se realizaba dos veces por día, no se llevo a cabo un registro exhaustivo de las lecturas realizadas por este equipo.

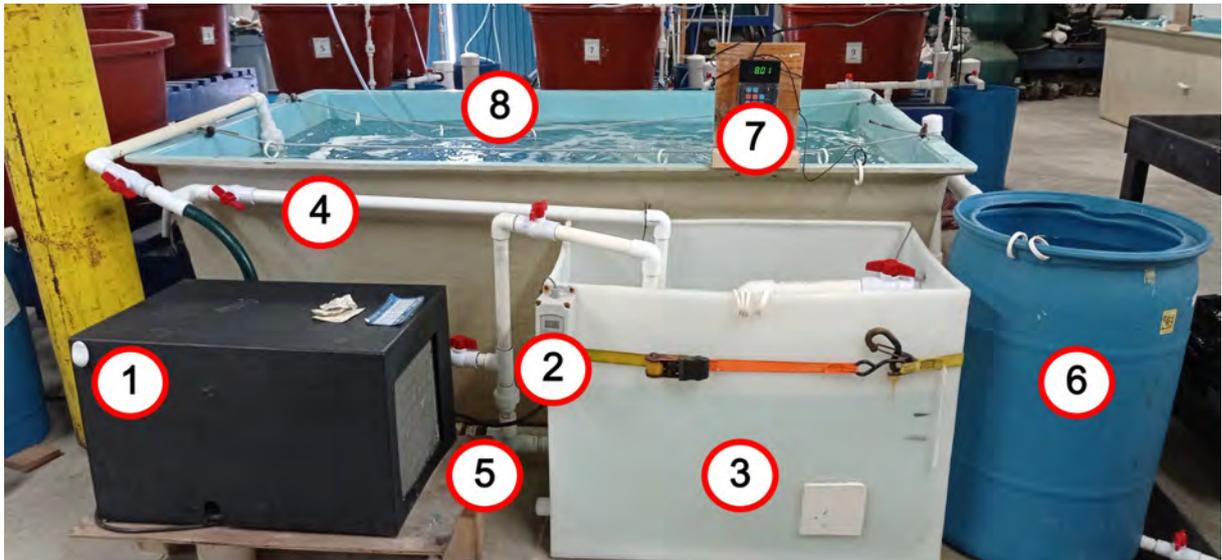


Figura 5.51: Configuración base del sistema cerrado. Enfriador (1), control del enfriador (2), tanque de agua (3), tubería para la conexión de la bomba (4), bomba magnética (5), biofiltro (6), equipo *Aqua Medic* (7) y tanque con los organismos (8).

En la figura 5.52(a) se puede ver la forma en que se posicionó el dispositivo IoT para que llevara a cabo la medición de la calidad del agua del cultivo de almejas pismo. En la imagen se puede observar que el sistema de monitoreo se colocó dentro del tanque de cultivo. En la figura 5.52(b) se puede apreciar la forma en que se distribuyeron las almejas pismo en el cultivo, tratando de simular de la mejor forma las condiciones de su hábitat natural.



(a) Ubicación del dispositivo *IoT* para la recolección de datos de la calidad del agua en el cultivo de almejas pismo. (b) Distribución de almejas pismo en el tanque de cultivo.

Figura 5.52: Cultivo experimental de almejas pismo

La ubicación de los componentes del prototipo del sistema de monitoreo de la calidad del

agua se pueden apreciar en la figura 5.53, el dispositivo IoT se colocó cerca del tanque de cultivo para que las sondas pudieran colarse al interior de este y el *gateway* se posicionó sobre una mesa a aproximadamente  $5m$  de distancia del *end device*. En esta prueba se conectaron a la *Raspberry Pi* los periféricos correspondientes para poder monitorear el correcto funcionamiento del ordenador y que el proceso de transmisión y recepción de la información se cumpliera adecuadamente.

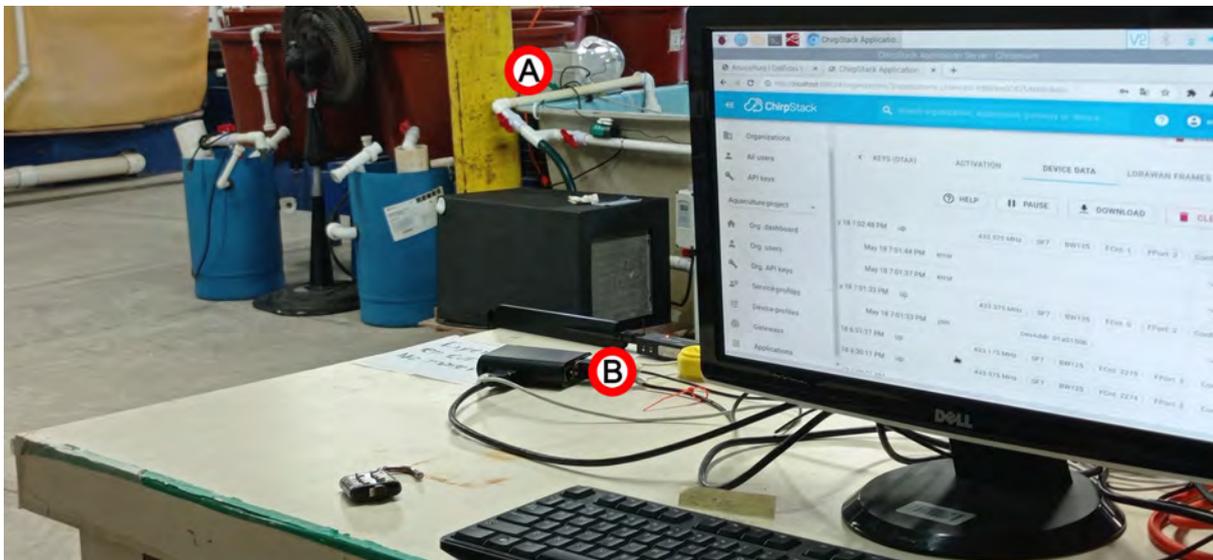


Figura 5.53: Ubicación de los componentes del sistema de monitoreo en el cultivo de almejas pismo. Posición del dispositivo *IoT* (A) y posición del *gateway* (B).

Se fijó un período de dos días para la duración del experimento. Se programó en el dispositivo de recolección de datos, que realizara una medición de los parámetros de la calidad del agua cada minuto.

### 5.2.5.2. Análisis de resultados

La supervisión del sistema de recolección de datos se realizaba una vez al día, dicha actividad consistía en revisar que la información se estuviera transmitiendo y recibiendo correctamente. Además, se verificaba que el procesamiento de esta fuera exitoso, todo esto se realizaba a través de la *Raspberry Pi*. También se verificaba que el equipo de medición estuviera en óptimas condiciones.

Al analizar los datos de la gráfica de la figura 5.54, haciendo énfasis en la temperatura, el sistema de recolección de datos registró un valor promedio de  $15.97^{\circ}C$  con una desviación estándar de  $\pm 0.17^{\circ}C$ , lo cual concuerda con la temperatura programada en el enfriador, ya que se le estableció mantener la temperatura del agua a  $16^{\circ}C$  y el registro triangular observado en la gráfica es debido al funcionamiento del equipo de enfriamiento. Transcurridas aproximadamente 24 horas del experimento, se puede observar que el sistema de monitoreo de la calidad del agua registró un decremento en la temperatura, recopilando un valor promedio de  $15.08^{\circ}C$  con una desviación estándar de  $\pm 0.18^{\circ}C$ , este suceso se presentó debido a que Maestro Salvador configuró al enfriador para que redujera la temperatura del agua a  $15^{\circ}C$ , para poder realizar sus operaciones de mantenimiento en el cultivo, sin que afectaran el estado de los organismos.

El valor promedio de pH registrado por el prototipo fue de 8.06 unidades con una variación de  $\pm 0.01$  unidades, este valor es similar al registrado por el equipo *Aqua Medic*, el cual fue de 8.01 unidades con una desviación estándar de  $\pm 0.01$  unidades. No obstante, las lecturas realizadas por el prototipo de sistema de medición de la calidad del agua, fueron capaces de detectar el aumento del pH debido a la reducción de temperatura en el sistema. El valor de pH

aumentó 0.06 unidades, dando como resultado un valor promedio de 8.12 unidades, mientras que el registro realizado por el equipo *Aqua Medic* se mantuvo en 8.01 unidades. Este suceso puede deberse a que al sensor utilizado en el prototipo se le puede realizar una configuración que compensa el valor de sus lecturas conforme a la temperatura que se mide, es por esta razón que al cambiar la temperatura del líquido, se puede observar que hay un efecto en el pH que mide el prototipo y el cual no detecta el equipo *Aqua Medic*, ya que no cuenta con esta configuración, por lo que se mantiene estable su lectura.

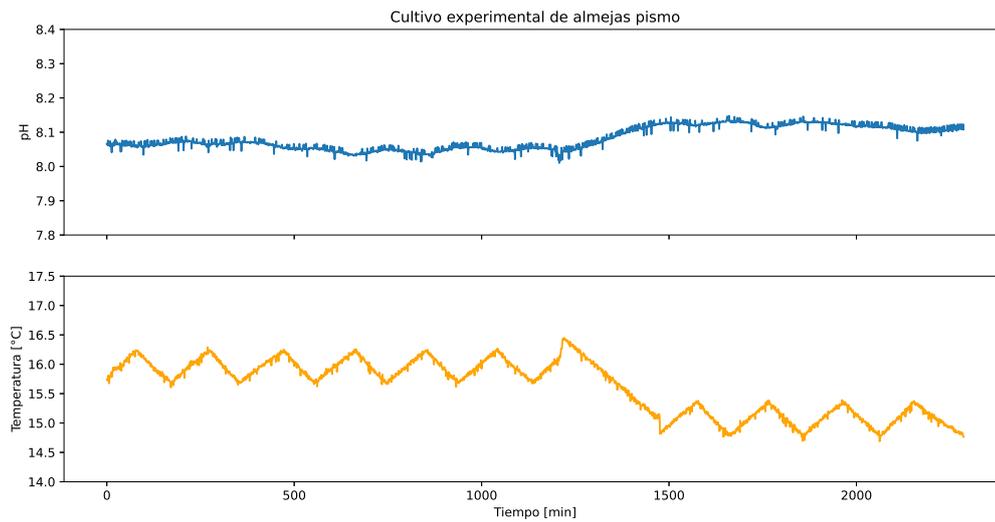


Figura 5.54: Representación gráfica de los parámetros de la calidad del agua medidos por el prototipo en el cultivo experimental de almejas pismo.

# Capítulo 6

## Conclusiones

### 6.1. Conclusiones generales

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en la primera fase de experimentación realizada en este proyecto, se destaca la importancia que tiene el proceso de calibración y mantenimiento de los sistemas de medición, para realizar un correcto monitoreo de cualquier variable de la que se tenga interés.

Se comprobó que el sistema es capaz de monitorear los parámetros de pH, temperatura y oxígeno disuelto en cultivos acuícolas de agua marina y agua dulce, además de que los sensores seleccionados para dichas variables son adecuados para la implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua en una actividad como la acuicultura.

El diseño de una interfaz *web* facilita la interacción entre el usuario final y los datos recopilados por el sistema de monitoreo, además cuenta con el beneficio de que a través de esta interfaz se pueden realizar distintas configuraciones al dispositivo IoT de manera remota.

### 6.2. Verificación de la hipótesis

Retomando la hipótesis que se presenta en la sección 1.2:

*El uso de la tecnología LoRaWAN permite que la comunicación en tiempo real se pueda llevar a cabo, ya que es un protocolo de largo alcance, bajo consumo de energía y bajas velocidades de datos, lo cual es perfecto para aplicaciones de IoT.*

*El dispositivo puede ser autosustentable, debido a que su sistema de alimentación se basará en un modelo híbrido basado en baterías y paneles solares, lo cual garantizará la disponibilidad de energía en cualquier momento gracias a la batería y la producción de esta durante el día por medio de los paneles solares. Además de que en interiores donde no se tenga acceso a luz del sol, se podrá conectar el dispositivo a una toma de corriente.*

*El contar con un sistema para la recolección, lectura y análisis de datos, en el proceso de crianza y cultivo de especies acuáticas, permitirá mejorar la toma de decisiones por medio de los parámetros recolectados. Además, se cuenta con el tiempo suficiente para actuar y evitar que la producción sufra algún daño, también se contará con datos actualizados constantemente las 24 horas del día.*

Al revisar la hipótesis, y bajo el sustento de los resultados obtenidos en los experimentos realizados en este trabajo, se puede concluir que el uso de la tecnología LoRaWAN para la implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua, en una actividad como la acuicultura, es viable siempre que se presente línea de vista directa entre el dispositivo final y el *gateway* o en escenarios en los que los obstáculos entre los componentes del sistema de comunicación representen la menor interferencia posible. No obstante, es importante mencionar que LoRaWAN es una tecnología de bajo consumo energético, por lo que su potencia

de transmisión es reducida debido a esta característica, pero se puede mejorar su desempeño utilizando mejores antenas o configuraciones de Spreading Factor (SF).

A lo largo de las pruebas realizadas en la primera fase de experimentación y en las efectuadas en los cultivos de camarón, lobina rayada y almeja pismo, se presentó línea de vista directa entre el dispositivo final y el *gateway*, por lo cual la transmisión y recepción de datos a través del protocolo LoRaWAN fue exitosa. No obstante, es importante mencionar que las fallas presentadas en el servicio de comunicación en los experimentos en agua marina a 24°C, en agua dulce a 12°C, en el cultivo de camarones y en el estanque de carpas koi, estuvieron mayormente relacionados a fallas en el *software* o *hardware* del sistema y no por el protocolo de comunicación.

En escenarios de experimentación como en el cultivo de abulón, el estanque ornamental de carpas koi y la prueba realizada en la ubicación de los tanques de agua marina, la interferencia que se presentaba en dichos entornos no representó ningún problema para que se pudiera dar de manera correcta la comunicación entre el *end device* y *gateway* a través del protocolo LoRaWAN, sin embargo, en un entorno con mayor densidad de obstáculos entre los componentes del sistema de comunicaciones, como lo fue en el experimento en el cultivo de lobina rayada, el protocolo de comunicaciones presentó problemas para poder entregar los datos íntegramente, este problema se solucionó reubicando el *gateway* para poder garantizar la línea de vista directa, pero otra solución pudo haber sido utilizar antenas con mayor ganancia y que fueran direccionales.

Para evaluar la autosustentabilidad del dispositivo IoT, se tendría que considerar el entorno en el que se llevó a cabo el experimento, es decir, si se realizó al interior de un laboratorio o al exterior en la intemperie. La mayor parte de los experimentos realizados en este trabajo fueron en interiores, por lo que se pudo probar que el dispositivo IoT funciona perfectamente en este tipo de escenarios, gracias a la versatilidad que le proporciona el módulo de gestión de energía solar, el cual permite que el dispositivo IoT pueda ser energizado por medio de una toma de corriente. Si se llegase a presentar una interrupción del suministro de energía, el sistema cuenta con una batería que le permite continuar en funcionamiento en lo que se resuelve el problema.

Evaluando la autosustentabilidad del dispositivo en exteriores, durante el experimento en el estanque ornamental de carpas koi, se pudo comprobar que el *end device* puede contar con hasta 26 horas y media de autonomía antes de que se termine por completo la energía almacenada en la batería, y aunado a esto, que los paneles solares propuestos son insuficientes para cosechar energía para cargar la batería y alimentar al sistema recolector de datos. Además, se consideró que durante el día se tendrían 10 horas de luz solar para realizar la cosecha, lo cual es erróneo, ya que se tuvo que haber considerado las horas de sol pico por día.

Los beneficios de contar con un sistema de monitoreo continuo de la calidad del agua en tiempo real, frente a la forma tradicional de los investigadores para supervisar sus cultivos, se pueden observar principalmente en los experimentos realizados en los cultivos de abulón y almejas pismo. En el primer cultivo se logra percibir, registrar y alertar sobre un suceso que altera el pH y la temperatura de los cultivos durante un periodo de 5 a 10 minutos y se presenta periódicamente durante las mañanas, este suceso se logró relacionar a la actividad de recambio de agua que realizan los investigadores en su cultivo, no obstante, este tipo de sucesos son desapercibidos por los investigadores debido a su rutina habitual de monitoreo. Con la ayuda de un sistema de monitoreo continuo se le brinda a los acuicultores mayor información sobre los eventos que se presentan en sus cultivos a lo largo del día y les permite relacionar dichos sucesos a algún acontecimiento.

Por último, al analizar los resultados obtenidos en el cultivo de almejas pismo, se puede observar que el sistema percibe y almacena el momento en el que se reduce la temperatura del cultivo, esto es importante ya que le permite conocer a los investigadores el momento exacto en el que se realizó un cambio en su sistema experimental y cuanto tiempo se ha expuesto a sus organismos a esas condiciones.

### 6.3. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se plantea:

- Rediseñar la estructura para el almacenamiento del sistema recolector de datos, para que sea más fácil acomodar los componentes electrónicos en su interior, además de utilizar otro método de construcción para asegurar que sea impermeable y hermético.
- Realizar un estudio más a fondo sobre la cosecha de energía solar y lograr que el dispositivo inteligente cumpla con la capacidad de ser autosustentable tanto en interiores como en exteriores.
- Diseño e implementación de algoritmos para reducir el consumo energético del prototipo, permitiéndole así mayor autonomía en escenarios donde se pueda realizar cosecha de energía solar.

# Bibliografía

- [1] H. Automation, "Ht-m01. mini lora gateway." [https://resource.heltec.cn/download/HT-M01/ht-m01\\_user\\_manual.pdf](https://resource.heltec.cn/download/HT-M01/ht-m01_user_manual.pdf), 2020. Last accessed 04 October 2022.
- [2] H. Automation, "Wireless stick lite (panda board) phaseout." <https://heltec.org/project/wireless-stick-lite/>, 2019. Last accessed 05 October 2022.
- [3] A. Scientific, "Embedded solutions." <https://atlas-scientific.com/>, 2022. Last accessed 20 October 2022.
- [4] WAVESHARE, "Solar power management module, for 6v 24v solar panel." <https://www.waveshare.com/solar-power-manager.htm>, 2022. Last accessed 18 October 2022.
- [5] FAO, "Pesca y acuicultura." <https://www.fao.org/fishery/es/aquaculture>, 2021. Last accessed 27 June 2022.
- [6] P. Holm, "World war ii and the "great acceleration" of north atlantic fisheries," *Global Environment*, vol. 5, no. 10, pp. 66–91, 2012.
- [7] M. F. Pinto, T. P. R. Oliveira, L. A. Rocha, and R. R. N. Alves, "People and fishery resources: A multidimensional approach," in *Ethnozoology*, pp. 119–149, Elsevier, 2018.
- [8] R. Reis, J. Albert, F. Di Dario, M. Mincarone, P. Petry, and L. Rocha, "Fish biodiversity and conservation in south america," *Journal of fish biology*, vol. 89, no. 1, pp. 12–47, 2016.
- [9] FAO, "El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022," Hacia la transformación azul. Roma, 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>.
- [10] CONAPESCA, "Relación de unidades económicas y activos embarcaciones mayores, menores e instalaciones acuícolas." <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/registro-nacional-de-pesca-y-acuicultura-rnpa>, 2021. Last accessed 24 June 2022.
- [11] D. Meyer, "Introducción a la acuicultura," 2004.
- [12] F. O'Donncha and J. Grant, "Precision aquaculture," *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 2, no. 4, pp. 26–30, 2019.
- [13] A. Pounds, "The gain project is funded by the eu horizon 2020 fund." <https://www.globalseafood.org/advocate/precision-aquaculture-part-1-data-and-evidence-based-management/>, 2021. Last accessed 29 June 2022.
- [14] A. Hegarty, G. Westbrook, D. Glynn, D. Murray, E. Omerdic, and D. Toal, "A low-cost remote solar energy monitoring system for a buoyed iot ocean observation platform," in *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 386–391, IEEE, 2019.
- [15] R. Kahn, "Internet." <https://www.britannica.com/technology/Internet>, 2022. Last accessed 13 July 2022.

- [16] H. Technologies, “What is an iot device?.” <https://www.hcltech.com/technology-qa/what-is-an-iot-device>, 2022. Last accessed 13 July 2022.
- [17] N. Latto, “¿qué es el internet de las cosas (iot)?.” <https://www.avast.com/es-es/c-what-is-the-internet-of-things>, 2021. Last accessed 1 August 2022.
- [18] P. Brous, M. Janssen, and P. Herder, “The dual effects of the internet of things (iot): A systematic review of the benefits and risks of iot adoption by organizations,” *International Journal of Information Management*, vol. 51, p. 101952, 2020.
- [19] A. K. Majumdar, *Optical wireless communications for broadband global internet connectivity: fundamentals and potential applications*. Elsevier, 2018.
- [20] SIGFOX, “¿qué es sigfox?.” <https://sigfox.com.py/que-es-sigfox/>, 2021. Last accessed 08 October 2022.
- [21] L. Alliance, “What is lorawan specification.” <https://lorawan-alliance.org/about-lorawan/>, 2022. Last accessed 02 October 2022.
- [22] C. B. Mwakwata, H. Malik, M. Mahtab Alam, Y. Le Moullec, S. Parand, and S. Mumtaz, “Narrowband internet of things (nb-iot): From physical (phy) and media access control (mac) layers perspectives,” *Sensors*, vol. 19, no. 11, p. 2613, 2019.
- [23] M. I. Hossain and J. I. Markendahl, “Comparison of lpwan technologies: Cost structure and scalability,” *Wireless Personal Communications*, vol. 121, no. 1, pp. 887–903, 2021.
- [24] J. P. Queralta, T. N. Gia, Z. Zou, H. Tenhunen, and T. Westerlund, “Comparative study of lpwan technologies on unlicensed bands for m2m communication in the iot: Beyond lora and lorawan,” *Procedia Computer Science*, vol. 155, pp. 343–350, 2019.
- [25] X. Feng, F. Yan, and X. Liu, “Study of wireless communication technologies on internet of things for precision agriculture,” *Wireless Personal Communications*, vol. 108, no. 3, pp. 1785–1802, 2019.
- [26] C. Encinas, E. Ruiz, J. Cortez, and A. Espinoza, “Design and implementation of a distributed iot system for the monitoring of water quality in aquaculture,” in *2017 Wireless telecommunications symposium (WTS)*, pp. 1–7, IEEE, 2017.
- [27] M. Timmons and N. R. A. C. (U.S.), *Recirculating Aquaculture Systems*. NRAC Publication, Cayuga Aqua Ventures, 2002.
- [28] S. Yang, S. Khan, X. Chuanxi, Z. Yifeng, and P. Shengchun, “Design and realization of a buoy for ocean acoustic tomography in coastal sea based on nb-iot technology,” in *OCEANS 2019-Marseille*, pp. 1–4, IEEE, 2019.
- [29] L. Parri, S. Parrino, G. Peruzzi, and A. Pozzebon, “A lorawan network infrastructure for the remote monitoring of offshore sea farms,” in *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 1–6, IEEE, 2020.
- [30] W. Hassan, M. Føre, J. B. Ulvund, and J. A. Alfredsen, “Internet of fish: Integration of acoustic telemetry with lpwan for efficient real-time monitoring of fish in marine farms,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 163, p. 104850, 2019.
- [31] F. J. Córdova Briones and D. J. Gonzabay Bailón, *Dispositivo acuático IOT para alimentar y mejorar la distribución del alimento en cultivos de camarón*. PhD thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas . . . , 2019.
- [32] D. I. Rivera Herrera and E. A. Yepez Aroca, “Diseño e implementación de un prototipo para la medición de calidad del agua y control de la oxigenación en forma remota orientado a la producción acuícola.” B.S. thesis, 2015.
- [33] T. T. Network, “What are lora and lorawan?.” <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>, 2022. Last accessed 02 October 2022.

- [34] O. C. O. . Partnerships, “Lora device developer guide.” <https://developer.orange.com/od-uploads/LoRa-Device-Developer-Guide-Orange.pdf>, 2016. Last accessed 03 October 2022.
- [35] L. Alliance, “Lorawan what is it? a technical overview of lora and lorawan.” <https://www.tuv.com/content-media-files/master-content/services/products/1555-tuv-rheinland-lora-alliance-certification/tuv-rheinland-lora-alliance-certification-overview-lora-and-lorawan-en.pdf>, 2015. Last accessed 03 October 2022.
- [36] ChirpStack, “The chirpstack project.” <https://www.chirpstack.io/project/>, 2022. Last accessed 04 October 2022.
- [37] R. Pi, “Raspberry pi documentation.” <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/getting-started.html>, 2022. Last accessed 04 October 2022.
- [38] NIST, “What is a sensor?” <https://www.nist.gov/el/intelligent-systems-division-73500/definitions>, 2021. Last accessed 06 October 2022.
- [39] L. Méndez-Barroso, J. Rivas-Márquez, I. Sosa-Tinoco, and A. Robles-Morúa, “Design and implementation of a low-cost multiparameter probe to evaluate the temporal variations of water quality conditions on an estuarine lagoon system,” *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, no. 11, pp. 1–18, 2020.
- [40] Keystudio, “Ks0429 keystudio tds meter v1.0.” [https://wiki.keystudio.com/KS0429\\_keyestudio\\_TDS\\_Meter\\_V1.0](https://wiki.keystudio.com/KS0429_keyestudio_TDS_Meter_V1.0), 2021. Last accessed 22 October 2022.
- [41] Pushbullet, “Pushbullet connects your devices, making them feel like one..” <https://www.pushbullet.com/>, 2022. Last accessed 18 October 2022.
- [42] J. Postel, “Rfc0821: Simple mail transfer protocol,” 1982.
- [43] MQTT.org, “Mqtt: The standard for iot messaging..” <https://mqtt.org/>, 2022. Last accessed 19 October 2022.
- [44] IONOS, “Servidor lamp: una solución económica para webs dinámicas.” <https://www.ionos.mx/digitalguide/servidores/know-how/servidor-lamp-la-solucion-para-webs-dinamicas/>, 2016. Last accessed 20 October 2022.
- [45] A. de la Cruz Meneses, “Dispositivo IoT orientado a la acuicultura.” <https://github.com/AleDelMen/Aquaculture-IoT-device>, 2022.
- [46] H. Automation, “Heltec esp32+lora series quick start.” [https://docs.heltec.org/en/node/esp32/quick\\_start.html](https://docs.heltec.org/en/node/esp32/quick_start.html), 2022. Last accessed 26 October 2022.
- [47] H. Automation, “Get limited technical resources.” [https://docs.heltec.org/general/view\\_limited\\_technical\\_data.html#esp32-lora-series](https://docs.heltec.org/general/view_limited_technical_data.html#esp32-lora-series), 2022. Last accessed 26 October 2022.
- [48] M. Glavin, P. K. Chan, and W. Hurley, “Optimization of autonomous hybrid energy storage system for photovoltaic applications,” in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 1417–1424, IEEE, 2009.
- [49] M. Glavin, P. K. Chan, S. Armstrong, and W. Hurley, “A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system,” in *2008 13th International power electronics and motion control conference*, pp. 1688–1695, IEEE, 2008.
- [50] I. Cedar Lake Ventures, “El clima y el tiempo promedio en todo el año en ensenada.” <https://es.weatherspark.com/y/2050/Clima-promedio-en-Ensenada-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>, 2022. Last accessed 08 November 2022.

- [51] C. Mehrbach, C. Culberson, J. Hawley, and R. Pytkowicz, "Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure 1," *Limnology and oceanography*, vol. 18, no. 6, pp. 897–907, 1973.
- [52] F. I. Incorporated, "¿cómo funcionan los chillers de procesos?." <https://blog.froztec.com/como-funcionan-los-chillers-de-procesos>, 2022. Last accessed 26 September 2022.
- [53] YSI, "Prodss manual del usuario." <https://www.ysi.com/File%20Library/Documents/Manuals/626973-YSI-ProdSS-User-Manual-RevB-Spanish.pdf>, 2014. Last accessed 28 September 2022.
- [54] C. W. Boards, "Folleto informativo ph." [https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf), 2022. Last accessed 15 November 2022.