



Aplicación de Sistemas Embebidos e IoT para el Monitoreo de oxígeno disuelto en Estanques Acuícolas en Eldorado, Sinaloa.

Derechos de autor

Todos los derechos reservados

Jesús Antonio Nava Pintor

Prohibida su reproducción total o parcial,
sin consentimiento expreso del autor.

México MMXVII



Universidad Autónoma de Zacatecas

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica

Aplicación de Sistemas Embebidos e IoT para el Monitoreo de oxígeno disuelto en Estanques Acuícolas en Eldorado, Sinaloa.

Tesis

Que en cumplimiento parcial de los requisitos para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Presenta

Jesús Antonio Nava Pintor

Directores de tesis

Dr. Héctor Alonso Guerrero Osuna (UAZ – México)

Dr. Gerardo Ornelas Vargas (UAZ – México)

Dr. Luis Octavio Solís Sánchez (UAZ – México)

Dr. Rodrigo Castañeda Miranda (UAZ – México)

Zacatecas, Zacatecas, México. - junio de 2020

OFICIOS DE APROBACION

OFICIOS DE APROBACION



Aplicación de Sistemas Embebidos e IoT para el Monitoreo de oxígeno disuelto en Estanques Acuícolas en Eldorado, Sinaloa.

Aprobado por el jurado:

Dr. Héctor Alonso Guerrero Osuna

Dr. Gerardo Ornelas Vargas

Dr. Rodrigo Castañeda Miranda

Dr. José Manuel Ortiz Rodríguez

Dr. Luis Octavio Solís Sánchez

Dedicatoria

*A mi familia, pequeña, pero mis grandes motores:
Tania y Sussy quienes me dan su amor incondicional.*

A mis padres y hermanos:

Ezequiel, Dulce, Edgar y Sandra quienes

Me han inspirado siempre a ser mejor persona

Agradecimientos

- **Has-It (Hardware and Software Integrated Technologies) y su gerente general Joshua Mendoza Jasso, así como a todo el equipo: Mauricio Mendoza, Jonathan Hernández, Angelica Castruita, Claudia Alonso, David Gutiérrez.**
- **Laboratorio Nacional de Sistemas Embebidos, Diseño Electrónico Avanzado y Microsistemas (SEDEAM) con sede en la Universidad Autónoma del Estado de Zacatecas (UAZ), por permitirme el uso de sus instalaciones, equipos, así como de la ayuda de su excelente personal.**
- **Inspiración Tecnológica (Fintech) y a su gerente general, así como su personal: Edgar Pasillas, Alberto Yubaile.**
- **A mi asesor el Dr. Héctor Alonso Guerrero Osuna por sus enseñanzas de gran nivel académico y por la confianza que siempre me brinda.**
- **Al Dr. Gerardo Ornelas Vargas por el apoyo y conocimientos de excelencia que me brindó.**
- **Al CONACYT por el apoyo otorgado para el sustento de mi estancia durante la maestría.**

Resumen

El presente trabajo es un proyecto de investigación y desarrollo tecnológico en el que se describe el diseño, construcción e implementación de un sistema embebido de monitoreo de oxígeno disuelto aplicado en estanques acuícolas de forma remota mediante IoT, con el fin de recolectar los valores de oxígeno disuelto que son de vital importancia para el óptimo crecimiento de las especies marinas. El desarrollo de este trabajo se realizó en conjunto con acuicultores de la cooperativa María Esperanza localizada en el municipio de Eldorado, Sinaloa, México, el cual es uno de los estados con mayor producción de camarón a nivel nacional. Se hace énfasis en el desarrollo de un sistema de monitoreo que permita al acuicultor conocer en todo momento el valor de oxígeno disuelto actual de sus estanques, para ello, se propone el uso la arquitectura de una red LoRaWAN para el internet de las cosas (IoT), que abarca la creación de los dispositivos de borde, hasta el desarrollo de una red Lora, la validación de las mediciones del sistema, y por último, se implementa el sistema en estanques acuícolas dedicados a la producción de camarón *Vannamei*, facilitados por la cooperativa Maria Esperanza. El desarrollo de este sistema permite al productor obtener un mayor conocimiento de sus estanques y administrar de mejor forma sus recursos materiales y humanos reduciendo la tasa de errores, costos de reclutamiento de personal y aumentando la cantidad de camarón producido.

Palabras clave: Acuicultura, calidad del agua, monitoreo, sistemas embebidos, internet de las cosas (IoT).

Abstract

This work is a research and technological development project that describes the design, construction and implementation of an embedded IoT remote monitoring system applied to aquaculture ponds, in order to collect vital importance water quality parameters for the optimal growth of the marine species *L. vannamei*. This work was developed in coworking with fish farmers from the Maria Esperanza cooperative located in the municipality of Eldorado, Sinaloa, Mexico, which is one of the states with the highest shrimp production at the national level. This study emphasizes the development of a monitoring system that allows the fish farmer to know all time the current state of their ponds. To do this, it is proposed the use of LoRaWAN network architecture for the Internet of Things (IoT), which involves from creation of edge devices, to the development of a LoRa network, it also describes the validation of the system's measurements, and finally, it implements the system in aquaculture ponds dedicated to the production of *Vannamei* shrimp provided by the Maria Esperanza cooperative. The development of this system allows the producer to obtain a better knowledge of their ponds and in response a better manage their material and human resources by reducing the error rate, personnel recruitment costs and increasing the amount of shrimp produced.

Keywords: Aquaculture, water quality, monitoring, embedded systems, Internet of Things (IoT).

Índice General

Y

| | |
|---|-----------|
| Dedicatoria..... | vi |
| Agradecimientos..... | vii |
| Resumen..... | viii |
| Abstract..... | ix |
| 1 Introducción..... | 1 |
| 1.1 Importancia de calidad del Agua..... | 2 |
| 1.1.1 Oxígeno Disuelto..... | 3 |
| 1.1.2 Temperatura..... | 3 |
| 1.1.3 Influencia de la temperatura, salinidad y presión en la cantidad de oxígeno disuelto..... | 4 |
| 1.2 Proceso de Monitoreo de Calidad del Agua..... | 5 |
| 1.3 Contextualización del Problema..... | 5 |
| 1.4 Justificación..... | 7 |
| 1.5 Pregunta científica..... | 11 |
| 1.6 Hipótesis..... | 11 |
| 1.7 Objetivo general..... | 12 |
| 1.7.1 Objetivos particulares..... | 12 |
| 2 Marco Teórico..... | 13 |
| 2.1 Sensores..... | 13 |
| 2.1.1 Sensor de Oxígeno Disuelto..... | 13 |
| 2.1.2 Sensor de Temperatura..... | 14 |
| 2.2 Microcontroladores..... | 15 |
| 2.2.1 Arquitecturas Von Neumann y Harvard..... | 18 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.3 | Reloj de Tiempo Real..... | 19 |
| 2.4 | Internet de las Cosas..... | 20 |
| 2.5 | Redes LPWAN..... | 21 |
| 2.6 | Lora y LoraWAN..... | 22 |
| 2.7 | Arquitectura de una red LoRaWAN..... | 24 |
| 2.8 | MQTT..... | 25 |
| 3 | Materiales y Métodos..... | 26 |
| 3.1 | Metodología Aplicada..... | 26 |
| 3.1.1 | Estudio Preliminar..... | 27 |
| 3.1.2 | Especificación de Requerimientos..... | 27 |
| 3.1.3 | Planeación de Actividades..... | 27 |
| 3.1.4 | Diseño de Prototipo..... | 28 |
| 3.1.5 | Construcción Física..... | 28 |
| 3.1.6 | Pruebas Piloto..... | 28 |
| 3.1.7 | Implementación..... | 28 |
| 3.1.8 | Documentación..... | 28 |
| 3.2 | Arquitectura del Sistema Propuesto..... | 29 |
| 3.3 | Concentrador/Gateway..... | 30 |
| 3.3.1 | Instalación de la Network Server/Application Server..... | 31 |
| 3.3.2 | Network Server/Application Server..... | 32 |
| 3.3.3 | Dashboards de visualización..... | 33 |
| 3.3.4 | Sistema de Alimentación..... | 35 |
| 3.3.5 | Componentes seleccionados para el sistema de alimentación..... | 36 |
| 3.3.5.1 | Panel Solar..... | 36 |
| 3.3.5.2 | Batería..... | 37 |
| 3.3.5.3 | Diagrama de conexión del sistema de alimentación..... | 38 |
| 3.4 | Diseño y desarrollo del Nodo de monitoreo (End Node)..... | 39 |
| 3.4.1 | Módulo de Alarma..... | 39 |
| 3.4.2 | Sonda de Temperatura..... | 39 |
| 3.4.3 | Sonda de Oxígeno Disuelto..... | 40 |
| 3.4.4 | Modulo LoRa..... | 41 |
| 3.4.5 | Módulo de Alimentación..... | 42 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4.6 | Microcontrolador..... | 42 |
| 3.4.7 | Diseño PCB..... | 44 |
| 3.4.8 | Software Embebido..... | 49 |
| 3.4.8.1 | Flujo del programa con método de confirmación..... | 49 |
| 3.4.8.2 | Flujo del programa sin método de confirmación..... | 54 |
| 3.4.9 | Medición de Consumo Energético..... | 58 |
| 3.4.10 | Sistema de Alimentacion del nodo de monitoreo..... | 59 |
| 3.4.11 | Componentes seleccionados para el sistema de alimentación..... | 60 |
| 3.4.11.1 | Panel Solar..... | 60 |
| 3.4.11.2 | Controlador de carga..... | 61 |
| 3.4.11.3 | Batería..... | 61 |
| 3.4.11.4 | Diagrama de Conexión del sistema de alimentación..... | 62 |
| 3.5 | Implementación del sistema..... | 63 |
| 3.5.1 | Instalación en San Jerónimo..... | 64 |
| 3.5.2 | Pruebas preliminares..... | 64 |
| 3.6 | Implementación Final en Eldorado, Sinaloa..... | 66 |
| 3.7 | Pruebas de Funcionamiento..... | 68 |
| 3.7.1 | Prueba de Mediciones Físicoquímicas..... | 68 |
| 3.7.2 | Prueba de Monitoreo Continuo..... | 68 |
| 3.7.3 | Prueba de Conexión a internet..... | 68 |
| 3.7.4 | Pruebas de Cobertura de la Zona de Cosecha..... | 68 |
| 3.7.5 | Pruebas de Suministro Energético..... | 69 |
| 4 | Resultados..... | 70 |
| 4.1 | Resultado de la prueba de mediciones físicoquímicas..... | 70 |
| 4.2 | Resultado de las pruebas de monitoreo continuo y conexión a Internet..... | 71 |
| 4.3 | Resultado de Pruebas de Cobertura de la Zona de Cosecha..... | 73 |
| 4.4 | Problemas detectados en las pruebas..... | 74 |
| 5 | Conclusiones..... | 76 |
| 6 | Referencias Bibliográficas..... | 77 |

Índice de Tablas y Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2. 1 Funcionamiento Basico de un Sensor..... | 13 |
| Figura 2. 2 Partes de un sensor de oxígeno disuelto, electrodo e Clark..... | 14 |
| Figura 2. 3 Partes de la sonda de Temperatura..... | 15 |
| Figura 2. 4 Principales partes de un Microcontrolador..... | 15 |
| Figura 2. 5 Periféricos Internos del Microcontrolador..... | 17 |
| Figura 2. 6 Microcontrolador y sus periféricos..... | 17 |
| Figura 2. 7 Arquitectura Von Neumann..... | 18 |
| Figura 2. 8 Arquitectura Harvard..... | 18 |
| Figura 2. 11 Reloj de Tiempo Real de una computadora Dallas..... | 20 |
| Figura 3. 1 Comparación entre Tipos de Comunicación Local..... | 21 |
| Figura 3. 2 Arquitectura de una red LoRaWAN..... | 24 |
| Figura 3. 3 Modelo de Metodología Empleada..... | 26 |
| Figura 3. 4 Parte del cronograma de actividades..... | 27 |
| Figura 3. 5 Arquitectura del sistema propuesto..... | 29 |
| Figura 3. 6 Gateway y sus diferentes backhuls y tarjetas de conexión local..... | 30 |
| Figura 3. 7 Interfaz AEP para la configuración del Gateway..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Figura 3. 8 Ejemplo de Registro de un end node..... | 33 |
| Figura 3. 9 Ejemplo de Lista de nodos registrados en la plataforma..... | 33 |
| Figura 3. 10 Edición de los parámetros del dashboard..... | 34 |
| Figura 3. 11 Dashboards Creados, no se muestran datos hasta que sean recibidos..... | 34 |
| Figura 3. 12 Script LUA para la extracción de los datos y visualización en dashboard..... | 35 |
| Figura 3. 13 Panel Solar Seleccionado de 85 Watts..... | 36 |
| Figura 3. 14 Batería de 12V 14A seleccionada..... | 37 |
| Figura 3. 15 Controlador de Carga Seleccionado..... | 37 |
| Figura 3. 16 Diagrama de Conexión del Sistema Fotovoltaico al Gateway..... | 38 |
| Figura 3. 17 Ensamble Final del Nodo Gateway..... | 38 |
| Figura 3. 18 Modulo de Radiofrecuencia LoRa..... | 41 |
| Figura 3. 19 Arquitectura del microcontrolador basado en una arquitectura Harvard..... | 43 |
| Figura 3. 20 Diagrama contextual de los elementos que componen al nodo de monitoreo. | 43 |
| Figura 3. 21 Diagrama esquemático a bloques del nodo de monitoreo..... | 44 |
| Figura 3. 22 Diagrama esquemático del microcontrolador..... | 44 |
| Figura 3. 23 Diagrama esquemático del regulador de voltaje..... | 45 |
| Figura 3. 24 Diagrama esquemático de la sonda de oxígeno disuelto y su ADC..... | 45 |
| Figura 3. 25 Diagrama esquemático de la sonda de temperatura y su dispositivo ADC..... | 45 |
| Figura 3. 26 Diagrama esquemático del módulo LoRa..... | 45 |
| Figura 3. 27 Diagrama esquemático del módulo de alarma..... | 46 |
| Figura 3. 28 Diseño PCB Todas las capas..... | 46 |
| Figura 3. 29 Diseño PCB, capa superior (Top Layer)..... | 46 |
| Figura 3. 30 Diseño PCB, capa inferior (Bottom Layer)..... | 47 |
| Figura 3. 31 Diseño PCB, vista superior 3D..... | 47 |
| Figura 3. 32 Diseño PCB, Vista inferior 3D..... | 47 |
| Figura 3. 33 Diseño PCB, vista isométrica 3D..... | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 3. 34 Resultado de Fabricación y ensamble de PCB..... | 48 |
| Figura 3. 35 Diagrama de conexión del nodo de monitoreo con el current ranger para la determinación de consumo energético..... | 58 |
| Figura 3. 36 Panel solar seleccionado para el nodo de monitoreo..... | 60 |
| Figura 3. 37 Controlador de carga seleccionado para el nodo de monitoreo..... | 61 |
| Figura 3. 38 Batería seleccionada para el nodo de monitoreo..... | 61 |
| Figura 3. 39 Diagrama de conexión del sistema de alimentación y el PCB del nodo de monitoreo..... | 62 |
| Figura 3. 40 Ensamble final del nodo de monitoreo..... | 62 |
| Figura 3. 41 Granja Acuícola de San Jerónimo..... | 63 |
| Figura 3. 42 Granjas Acuicolas en Eldorado, Sinaloa..... | 63 |
| Figura 3. 43 Instalación del sistema de monitoreo en la granja de san jerónimo..... | 64 |
| Figura 3. 44 Formato de registro de parámetros Físico-Químicos del Agua..... | 66 |
| Figura 3. 45 Poste Colocado para la instalación del sistema..... | 66 |
| Figura 3. 46 implementación del Sistema de Monitoreo en Eldorado, Sinaloa..... | 67 |
| Figura 3. 47 Ubicación ente el nodo Gateway y las oficinas de operación..... | 69 |
| Y | |
| Figura 4. 1 Comparativa entre sensores, Hanna instruments (gris), YSI (Naranja) y el sistema propuesto (azul)..... | 70 |
| Figura 4. 2 Comparación de los datos de oxígeno disuelto entre el oxímetro y el nodo de monitoreo..... | 71 |
| Figura 4. 3 Dashboard de Temperatura..... | 72 |
| Figura 4. 4 Dashboard para el oxígeno disuelto..... | 72 |
| Figura 4. 5 Resultado de 8 días de monitoreo de oxígeno disuelto..... | 73 |
| Figura 4. 6 Resultado de 8 días de monitoreo de Temperatura..... | 73 |
| Figura 4. 7 Dato recibido desde las oficinas de operación, ubicadas a unos 10 km de distancia..... | 74 |

| | |
|---|----|
| Figura 4. 8 Desconexión del Gateway..... | 74 |
| YTabla 1 Configuraciones posibles para el Gateway..... | |
| Tabla 2 Características Técnicas de la Sonda de Temperatura..... | 40 |
| Tabla 3 Características Técnicas de la Sonda de Oxígeno Disuelto..... | 41 |

Capítulo 1

Introducción

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura mejor conocida como la FAO, la acuicultura son las actividades, técnicas y conocimiento de crianza de organismos acuáticos vegetales o marinos, que, mediante intervención humana, busca el incremento en la reproducción y el óptimo desarrollo de los organismos acuáticos, estas actividades pueden realizarse en diferentes entornos de desarrollo, ya sea en agua salada o dulce. La acuicultura es considerada una actividad del sector primario, que puede realizarse mediante 4 sistemas de producción; acuicultura extensiva, semi-intensiva, intensiva e hiperintensiva [1]. La acuicultura se ha convertido en una actividad importante en la sociedad, ya que es practicada tanto por sectores agrícolas marginales que buscan la seguridad alimentaria, así como empresas multinacionales dedicadas a la producción semi-intensiva, intensiva e hiperintensiva, lo que a su vez la convierte en una fuente generadora de empleos en todo el mundo[2].

En México la acuicultura es una actividad en vías de crecimiento, pues se considera uno de los países con potencial para el desarrollo de acuicultura, debido a sus excelentes climas tropicales, ecosistemas y gran variedad de organismos acuáticos, que han convertido de la acuicultura y las actividades pesqueras en actividades muy importantes para el desarrollo social y económico, estudios realizados por el Instituto Nacional de Pesca dan a conocer que de la muestra total de pesquerías evaluadas, un 27% se encuentran en estado de deterioro, 53% se encuentran en su punto máximo de rendimiento y el 20% están dentro de la posibilidad de aumentar su producción, por lo que la acuicultura a nivel

nacional, representa una opción para la autosuficiencia alimentaria y desarrollo sostenible, estimulando el desarrollo regional [3][4].

México se posiciona en el lugar 24 en producción acuícola mundial, cuya producción principal se centra en la especie de camarón *L. vannamei*, del cual se posiciona en el 6to lugar por detrás de potencias mundiales en acuicultura como lo son, china, vietnam, indonesia, ecuador y Tailandia, la zona más fuerte en cuanto a las actividades acuícolas a nivel nacional se encuentra al noreste del país, teniendo a los estados de Sonora y Sinaloa como los principales protagonistas en las actividades acuícolas, los cuales contribuyen con casi la mitad de la producción acuícola nacional, en estos estados el impacto económico de la acuicultura ya ha sobrepasado a la ganadería, la producción de camarón genera 400 mdd por año y 7 mil empleos directos [5][6].

1.1 Importancia de calidad del Agua

Para mantener un alto rendimiento de producción acuícola, se vuelve prioritario mantener un buen control en los procesos productivos involucrados, entre los procesos más críticos se encuentra el control y monitoreo de los parámetros de **calidad del agua**, Calidad del agua se define como los el conjunto de todos los factores naturaleza fisicoquímica y biológica que indican la condición del agua, y que afectan en la sobrevivencia, reproducción, crecimiento y manejo de organismos acuáticos.[7] Existen una gran cantidad de factores fisicoquímicos, sin embargo solo algunos son los que juegan un papel importante, a estos factores son a los que el acuicultor debería atender pues tiene un mayor efecto sobre el desarrollo las especies marinas [8]. Mantener el control de los factores más importantes de calidad de agua dentro de los rangos apropiados, definirá la obtención de una especie maria con mejor salud y, por ende, un mejor producto. Un estanque con una buena calidad del agua producirá especies marinas más saludables que uno con calidad precaria [9].

La importancia de calidad del agua en acuicultura, radica en los efectos directos o indirectos que tienen estos factores fisicoquímicos y biológicos en el desarrollo y crecimiento de especies acuáticas, en cultivo de camarón los factores de calidad del agua más importantes que influyen en la variabilidad de la producción según algunos modelos estocásticos son el PH, la temperatura y el oxígeno disuelto [10] [11] [12].

1.1.1 Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto es quizás el parámetro más crítico en calidad del agua, ya que permite la sobrevivencia de la mayoría de organismos acuáticos, es necesario en procesos biológicos como la descomposición de materia orgánica [13], y quizás más importante, en procesos metabólicos como la descomposición de glucosa para la obtención de energía, esta energía es utilizada para alimentarse y desarrollarse [14]. Para la especie de camarón *L. vannamei*, los rangos más apropiados de oxígeno disuelto van de 5 a 15 mg/L, en donde puede desarrollarse de buena forma, si el rango de oxígeno disuelto es de 2 a 5 mg/L puede provocar un desarrollo lento en su crecimiento debido al gasto energético por parte del camarón para obtener más oxígeno, esto provoca una disminución en su alimentación y los hace susceptibles a contraer enfermedades con facilidad [15], [16].

Si el oxígeno se encuentra en un rango menor de 2 mg/L, el camarón en estas condiciones se encuentra en un estado de estrés, lo que provoca una nula alimentación ya que la energía que se obtiene del poco oxígeno presente es utilizada para pasar más agua por sus branquias en orden de evitar la hipoxia, si estas condiciones se mantienen constantes puede ser altamente letal [17], es por esta razón que es preferible no proveer de alimento cuando los niveles de oxígeno son bajos, de otra forma el valioso alimento podría desperdiciarse [18][19].

1.1.2 Temperatura

La temperatura también influye en el desarrollo de plantas y organismos en el agua [20], además de que el crecimiento y la demanda de oxígeno se duplican a medida que la temperatura va en aumento [21]. La temperatura afecta a las especies poiquilotérmicas

como el camarón, que no pueden regular su temperatura corporal, en cambio la temperatura de sus cuerpos se equilibra de acuerdo a la temperatura de su entorno, si la temperatura del agua se encuentra dentro del rango apropiado para el camarón, la tasa metabólica aumenta de tal forma que aumenta también el apetito y la ingesta de alimento, esto en presencia del rango apropiado de oxígeno disuelto permitirá un desarrollo óptimo del camarón, por el otro lado, si la temperatura del agua se encuentra fuera de los rangos apropiados puede llegar a ser letal [22], [23].

La especie *Vannamei* se desarrolla mejor de entre 23 a 30 °C, sin embargo, es una especie que puede tolerar un amplio rango de temperaturas, al grado de que los acuicultores los perciben como la especie más fuerte frente al mal de las manchas blancas (WSSV), la cual se cree, está estrechamente relacionada con la temperatura[24], *Vannamei* puede resistir temperaturas tan bajas como 15°C y tan altas como 33°C, sin embargo, al ser temperaturas que se encuentran fuera de los límites óptimos de desarrollo de la especie marina, se podría provocar una disminución considerable en su rango de crecimiento al verse sometido a un estrés térmico[25].

1.1.3 Influencia de la temperatura, salinidad y presión en la cantidad de oxígeno disuelto

La cantidad de oxígeno disuelto presente en los estanques se ve altamente influenciada principalmente por tres factores fisicoquímicos; la temperatura, salinidad y presión. El agua es menos soluble cuando la temperatura y salinidad van en aumento, además, la presión está relacionada con la altitud, en donde mientras más altitud se tenga, la presión atmosférica disminuye, lo que provoca también una disminución en la capacidad del agua por disolver oxígeno [26].

Por estas razones el monitoreo de los parámetros de **calidad del agua** siempre ha formado parte fundamental de los procesos de producción acuícola, ya que está directamente relacionado con el rendimiento de la producción, **la necesidad principal en el proceso de monitoreo, es obtener el conocimiento de los factores fisicoquímicos de**

calidad del agua y realizar acciones en base a ello, lo cual se vuelve de vital importancia al momento que se presente alguna anomalía que comprometa la salud de los organismos acuáticos, **conocer el estado del agua nos permitirá tener un tiempo de respuesta rápido en la ejecución de acciones preventivas**, permitirá mantener el control de los factores más importantes de calidad de agua dentro de los rangos apropiados, lo que definirá la obtención de una especie con mejor salud y, por ende, un mejor producto. Un estanque con una buena calidad del agua producirá especies marinas más saludables que uno con calidad precaria [9].

1.2 Proceso de Monitoreo de Calidad del Agua

El proceso de monitoreo de calidad del agua ha sufrido cambios en cómo se realiza conforme la tecnología avanza, hoy día existen sondas sensoriales capaces de medir estos parámetros fisicoquímicos, y aunque también existen procesos químicos que permiten medir los factores de calidad del agua, como, por ejemplo, el método de Winkler para determinar la cantidad de oxígeno disuelto, el uso de las sondas son la forma más rápida de conocer el estado de calidad del agua, y por esta razón las sondas son el equipo tecnológico más usado en este proceso [27][28]. sin embargo, aunque el uso de las sondas permite realizar mediciones rápidamente, existe una problemática generalizada, y es que, debido a los cambios constantes y a las diferentes variables fisicoquímicas y biológicas que afectan el estado del agua, es necesario realizar mediciones frecuentes que permitan detectar posibles anomalías, sin embargo, la frecuencia de las mediciones varía con respecto al lugar de producción.

1.3 Contextualización del Problema

Actualmente la Granja Acuícola María Esperanza SPR de RL de CV, ubicada en el municipio de Eldorado, Sinaloa, como parte de sus procesos productivos, se realizan mediciones de oxígeno disuelto diariamente, el proceso de monitoreo de oxígeno disuelto se realiza mediante una sonda sensorial llamada oxímetro, en donde se registra la medición. Una vez realizadas las mediciones queda a consideración del productor si es necesario realizar

alguna acción preventiva, esta interpretación está basada en gran medida en su experiencia. El monitoreo debe de realizarse al menos 3 veces al día debido a las fluctuaciones del oxígeno disuelto en los estanques, siendo al anochecer la medición más crítica, ya que es cuando el proceso de fotosíntesis cesa, en ese momento las plantas presentes en el estanque como el fitoplancton dejan de producir oxígeno [1] y en cambio lo consumen, junto con los camarones y otros organismos vivos presentes en los estanques, por lo que, si no se realiza una medición precisa y se toman precauciones, la producción de camarón puede verse afectada a la mañana siguiente.

El proceso actual de monitoreo tiene muchos inconvenientes, por ejemplo, la incapacidad de detectar anomalías o cambios repentinos de oxígeno disuelto en los estanques, lo que puede afectar en tiempo de respuesta de ser necesario. Otro inconveniente es el factor de error humano, la granja ha reportado pérdidas en la producción, debido a omisión y falsificación de los datos de monitoreo de oxígeno disuelto, que desembocaron en la no ejecución de acciones preventivas, además, la localización de las granjas de producción, que al estar orientadas a la producción semi-intensiva, se encuentran en zonas remotas de la población, lo que hace más difícil realizar un monitoreo preciso.

Este patrón se repite en otros lugares del mundo, por ejemplo en Indonesia, potencia mundial en acuicultura, en el distrito Takalar, se realizó un estudio en una granja de producción intensiva de camarón, Zainuddin et al [29], en su caso de estudio menciona que la vigilancia de los estanques intensivos sólo se realiza actualmente de forma manual, es decir, la medición de calidad del agua se lleva a cabo periódicamente todas las mañanas y tardes utilizando un instrumento de medición manual. Esos procesos de vigilancia tienden a ser poco prácticos, ya que requieren salarios elevados para los trabajadores y altos niveles de error humano.

Otro estudio realizado en la India, menciona que la técnica actual para medir la calidad del agua consiste en recoger una muestra de agua de un estanque y hacerla analizar en el laboratorio cercano mediante análisis físicos y químicos. Sin embargo, ese método se ve

afectado por el tiempo, ya que las características físicas del agua cambian durante el transporte del estanque al laboratorio. Los agricultores sólo pueden conocer el estado de sus estanques después de los resultados de los análisis químicos en el laboratorio. En ocasiones, se hace demasiado tarde para que el agricultor tome medidas para mejorar la calidad del agua. Como resultado, los agricultores sufren grandes pérdidas [30].

En Ecuador, un estudio menciona que el productor de camarones es responsable de extensas áreas de tierra que se utilizan para la creación de los estanques donde se cultivan y cosechan los camarones. Por esta razón, el personal encargado de la recogida de muestras de agua recorre grandes distancias para obtener los datos necesarios para el análisis. Esto influye en la eficacia del seguimiento periódico y simultáneo del desarrollo de este tipo de mariscos. Además, los parámetros físico-químicos recogidos manualmente están expuestos a errores humanos, que pueden conducir a resultados erróneos. Este proceso, sumado al manejo manual de bombas y motores que oxigenan y controlan el nivel del agua, puede generar graves consecuencias en el rendimiento de la producción de camarones [31].

1.4 Justificación

De lo anterior mencionado se puede deducir que de forma general es importante para los productores mantener un monitoreo continuo de los parámetros de calidad del agua, en orden de llevar un mejor manejo de los procesos de producción, **por ello, nace la necesidad de este proyecto de investigación, que pretende establecer una base para la mejora del proceso de monitoreo de calidad del agua.**

El programa sectorial presentado por la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), busca consolidar los sectores acuícolas y su capacidad productiva nacional para la autosuficiencia alimentaria, así como para el abasto y comercialización dentro del mercado interno, lo que permitirá la asignación de mayores beneficios al sector pesquero como el estímulo a la innovación. Para consolidar las actividades acuícolas, es necesario

promover el desarrollo científico y tecnológico que permita incrementar su rendimiento productivo, realizando mejoras en los procesos involucrados e incrementando la rentabilidad en su implementación, para lograrlo es necesaria la colaboración del sector productivo con los desarrollos de investigación científica y tecnológica, sobre aspectos cotidianos, como sanidad, factores ambientales, etc. [32].

Estudios han señalado que la incorporación de tecnología en cualquier rama de la economía es un generador de valor importante, Borbón *et al* [33] menciona que los niveles de tecnología e innovaciones son los principales factores del crecimiento económico, menciona también, que en la acuicultura mexicana, a pesar de que el registro histórico de empleados disminuyó dramáticamente, el factor de producción se ha comportado de manera estable, la evidencia demuestra que esto se debe a la incorporación de tecnología e innovación implementada en los procesos de producción acuícola, así como a la creación de instituciones de investigación científica y desarrollo tecnológico que han permitido satisfacer la demanda creciente de consumo final, por esta razón, es importante entonces generar desarrollo tecnológico e innovaciones que mejoren los procesos productivos acuícolas [3].

La Granja Acuícola María Esperanza SPR de RL de CV, ha estado orientada a la producción semi intensiva y manejo de camarón, siempre en búsquedas tecnológicas que mejoren el proceso de producción y de acopio del producto procedentes de estanques acuícolas de la región. El presente proyecto de investigación se centra en establecer una base para la mejora en el proceso actual de monitoreo de oxígeno disuelto de la empresa, mediante desarrollo tecnológico que permita incrementar los rendimientos productivos y que aporte modernización y competitividad.

Partiendo de la necesidad de detectar posibles anomalías repentinas, puede considerarse que un monitoreo de oxígeno eficiente, es la medición frecuente de los estanques acuícolas. Con la llegada de conceptos tecnológicos nuevos como lo es el Internet de las

cosas (*Internet of Things, IoT*), es posible afrontar esta necesidad con una perspectiva diferente, Kevin Ashton menciona que las personas son la principal fuente de captura de datos, sin embargo, las personas tienen limitaciones humanas que llevan a una precisión limitada en la captura de datos, es por eso que, si se dota a cosas de medir de cualquier forma su entorno y recopilar esta información sin intervención humana, tendríamos la posibilidad de empoderar a computadoras para que conozcan el valor de estos datos recopilados, y administren de mejor forma la información, que a su vez permitirá mejorar procesos, detectar fallas o incluso saber cuándo una cosa está obsoleta o necesita reparaciones [34].

El concepto de Internet de las cosas define a elementos físicos como cosas que son capaces de interactuar con su entorno y comunicarse mediante diferentes tecnologías de comunicación y electrónica embebida en los dispositivos, son capaces de conectarse a otros elementos físicos mediante internet, así como aplicaciones digitales, que permiten controlar su comportamiento, entre otras cosas [35], debido a esto se considera una potencial solución dentro de algunas aplicaciones agrícolas como detección de fugas y control de flujo en granjas, automatización de fumigación y pesticidas, monitoreo de movimiento de animales en los pastizales, entre otras más [36].

Las redes de sensores inalámbricas (*Wireless Sensor Networks, WSN*) han sido usadas desde los años 2000, con los avances tecnológicos actuales en las telecomunicaciones han ganado gran popularidad, las WSN han probado ser muy efectivos en la captura, análisis y transmisión de datos ambientales, el uso de sensores inalámbricos distribuidos genera un mapeo más preciso del estatus del agua y permite un monitoreo constante en locaciones con difícil acceso, sin la necesidad de intervención humana, los WSN típicamente cuentan con un radio transceiver, un microcontrolador y un circuito eléctrico que permita la interacción con los sensores, y una fuente de energía.

Dentro de los avances tecnológicos de las WSN están las redes de área amplia a baja potencia (Low Power Wide Area Networks, LPWAN por sus siglas en inglés), las cuales han sido usadas con éxito en agricultura de precisión, las redes LPWAN tienen la ventaja de alcanzar rangos de longitudes grandes de conectividad a un muy bajo consumo energético. Según LPWAN Technical Workgroup, las redes LPWAN están diseñadas para enviar pequeñas cantidades de datos intermitentemente a grandes distancias y por tiempo prolongado[37], estas características son las necesarias para la acuicultura semi intensiva, en donde los estanques están en áreas remotas, sin servicios básicos como luz eléctrica ni servicios de comunicaciones como lo es internet, algunos trabajos han demostrado que el uso de WSN para el monitoreo de calidad del agua puede solucionar algunas “trampas” en las técnicas de monitoreo que han sido usadas a través de los años, esto incluye la habilidad de remplazar equipo de laboratorio costoso, realizar las mediciones en el sitio, evitando el transporte de las pruebas al laboratorio para el análisis, ahorrando tiempo y costos [38].

Por lo que el uso de WSN e internet de las cosas son tecnologías que nos permiten establecer una base para las telecomunicaciones en el monitoreo de calidad del agua, algunos trabajos relacionados con Internet de las cosas y redes de sensores inalámbricos (WSN) se han implementado. Las redes Zigbee han sido utilizadas en distintos lugares con la finalidad de llevar un monitoreo de calidad del agua, en ellos se miden algunos parámetros como pH, temperatura, turbidez y oxígeno disuelto, así como el control de aireadores con éxito, incluso han agregado alertas de anomalías mediante la tecnología celular, enviando mensajes personales a un número telefónico la información puede ser visualizada en diferentes tipos de dashboards [29][39] [40] [41]. La tecnología Wi-Fi también es ampliamente usada en las WSN, un estudio en el que se miden más parámetros como los nitratos, alcalinidad, sal, y el amoníaco en el agua utilizando una computadora raspberry Pi, el cual tiene conectividad a internet pues tienen embebido la tecnología Wi-Fi[42], otros utilizan en afamado esp8266, el cual es un microcontrolador

con Wi-Fi embebido, lo que permite la conexión a internet y el desarrollo de aplicaciones web para el monitoreo de calidad del agua y el control de aireadores [43][44][45].

La tecnología Wi-Fi también puede ser usada como una red de sensores inalámbricos, con diferentes topologías, como la topología WiFi Mesh, en donde se colocan varios access point que cubren el rango de alcance del sensor inalámbrico colocado en el agua, de esta forma se recolectan los datos y son redireccionados a una interfaz gráfica dentro de una página web donde puede ser visualizada la información [46].

La tecnología celular se ha hecho presente, se desarrolló un dispositivo para el monitoreo de calidad del agua en línea el cual permite el control de aireadores así como el monitoreo de pH y oxígeno disuelto, el dispositivo es controlado desde una estación o un teléfono móvil a través de la red celular [47]. Sin embargo, las redes de sensores basadas en Zigbee, Wi-Fi o Red Celular tienen un elevado gasto energético, es por eso que son usadas más en producción intensiva o hiper intensiva, en donde existen los recursos para mantener en funcionamiento las WSN. Esto se vuelve una tarea más difícil en producción semi intensiva en donde se han utilizado últimamente las redes LPWAN, debido a su pequeño gasto energético y grandes distancias de comunicación se han desarrollado sistemas experimentales con éxito[48][49][50] [51].

Por todo lo anterior mencionado, se considera que, a partir de las tecnologías de LPWAN e internet de las cosas, es posible el desarrollo de un sistema de monitoreo de oxígeno disuelto aplicado en estanques acuícolas de producción semi intensiva, que permita una mejora en el proceso de monitoreo de oxígeno disuelto.

1.5 Hipótesis

La implementación de un sistema de monitoreo permitirá al acuicultor obtener los parámetros de calidad del agua, específicamente de oxígeno disuelto y conocerá el estado actual de sus estanques, lo que le permitirá realizar acciones preventivas de ser necesario,

reduciendo el tiempo de respuesta en caso de anomalías, y obteniendo una mejoría en el proceso de monitoreo de oxígeno disuelto.

1.6 Objetivo general

El Diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo autónomo de oxígeno disuelto aplicado en estanques acuícolas de producción semi intensiva de camarón blanco *L. vannamei*, que permita realizar un monitoreo continuo en el proceso de monitoreo de oxígeno disuelto.

Para alcanzar el objetivo general, se proponen los siguientes objetivos particulares:

1.6.1 Objetivos particulares

- Diseño y desarrollo del nodo de monitoreo: Se diseñará y desarrollará el dispositivo que estará recabando datos de los estanques.
- Monitoreo Continuo: La información debe estar disponible en intervalos de tiempo cortos de 10 minutos, para que el acuicultor tenga conocimiento del estado actual de sus estanques.
- Cobertura de la zona de cosecha de Camarón: La zona de cobertura del sistema inalámbrico debe cubrir el área de cosecha.

- **Suministro de Energía:** Establecer un suministro energético que permita el funcionamiento del sistema.
- **Conexión a Internet:** El sistema está basado en el concepto de Internet de las Cosas (IoT), para subir la información de los nodos de monitoreo es necesario tener acceso a internet.
- **Visualización de Información:** La plataforma debe permitir la visualización de los datos obtenidos de los estanques.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Sensores

Los sensores son dispositivos que cambian el dominio de la magnitud medida en una magnitud que puede ser manipulada por instrumentos electrónicos como los microcontroladores, los sensores contienen un intermediario llamado transductor el cual está en contacto con la magnitud física y cuya salida es manipulada para obtener un dominio deseado. Debido a que los sistemas de medida actuales los dominios más habituales son las salidas digitales y analógicas, las cuales pueden ser fácilmente interpretadas por ejemplo por un microcontrolador [52]



Figura 2. 1 Funcionamiento Básico de un Sensor

2.1.1 Sensor de Oxígeno Disuelto

Un sensor de oxígeno disuelto transforma la magnitud fisicoquímica de oxígeno disuelto en una señal proporcional de salida, el método más usado para medir oxígeno disuelto es mediante el electrodo de Clark, el cual usualmente consiste de un cátodo de oro, y un ánodo de plata, un voltaje de polarización es aplicado en ambos electrodos, el ánodo y el cátodo se encuentran localizados dentro de una cámara de reacción, la cual está repleta

de electrolito, la cámara de reacción esta separa del medio a medir por una membrana, esta membrana permite al oxígeno disuelto difundirse dentro del sensor. Cuando el sensor es sumergido en un medio que contiene oxígeno, la diferencia en la presión parcial de oxígeno entre las paredes internas y externas de la membrana permite el paso del oxígeno a través de la membrana, el oxígeno es reducido por el cátodo en la cámara de reacción, resultando en un flujo de corriente que es proporcional a la cantidad de oxígeno disuelto transformado[53].

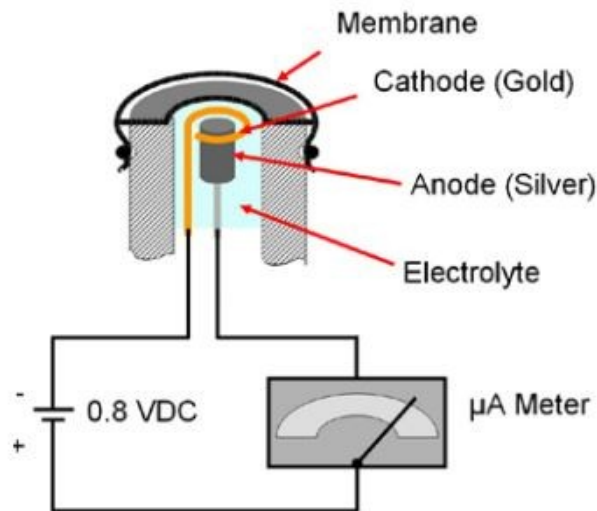


Figura 2. 2 Partes de un sensor de oxígeno disuelto, electrodo e Clark

Los primeros sensores de oxígeno disuelto están basados en el electrodo de Clark el cual inicialmente media la concentración de oxígeno disuelto en la sangre, sin embargo, el electrodo Clark puede ser utilizado para medir la concentración de oxígeno disuelto en muchas soluciones diferentes.

2.1.2 Sensor de Temperatura

La sonda de temperatura convierte el calor en una magnitud resistiva, esto se logra gracias a un transductor compuesto por una resistencia de platino, la cual permite una correlación casi lineal entre la temperatura y resistencia, es por esa razón que el platino es el estándar industrial para la medición de temperatura.

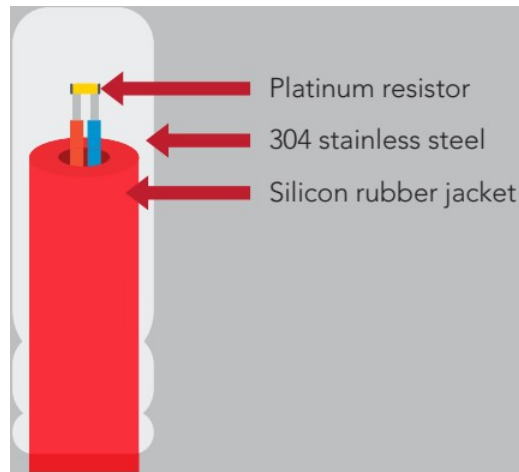


Figura 2. 3 Partes de la sonda de Temperatura

2.2 Microcontroladores

Es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Cuando es fabricado, no contiene datos en su memoria, para que pueda ejecutar acciones es necesario generar o crear algún programa, el cual puede ser escrito en cualquier lenguaje de programación para microcontroladores, el programa es codificado a un sistema numérico hexadecimal y posteriormente grabado en la memoria del microcontrolador para que este pueda ejecutarlo asociándose con dispositivos externos para su funcionamiento.

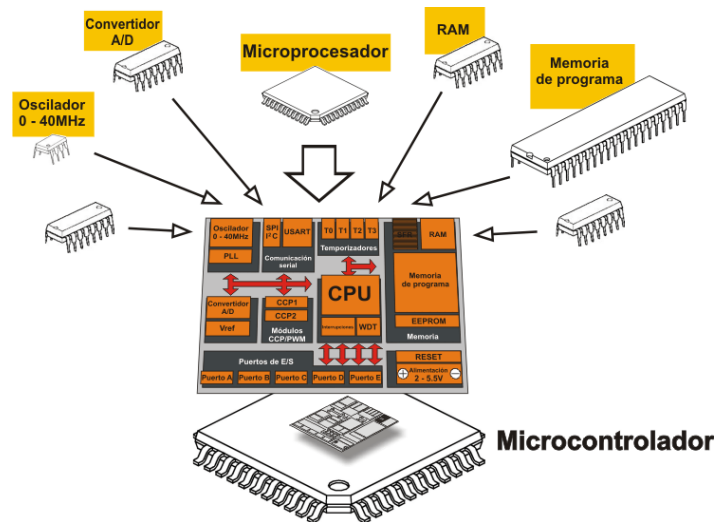


Figura 2. 4 Principales partes de un Microcontrolador

A continuación, se describen algunos de los periféricos que con mayor frecuencia

encontraremos en los microcontroladores:

Entradas/salidas de propósito general: también descritos como puertos E/S, generalmente agrupadas en puertos de 8 bits. Permiten leer datos del exterior o escribir en ellos desde el interior del microcontrolador. De esta manera se puede manipular el voltaje que pasa por el pin hasta un dispositivo externo (leds, relevadores, etc...).

Temporizadores y contadores: Son circuitos sincrónicos que se utilizan principalmente para la medición de frecuencias, implementación de relojes o para el conjunto con otros periféricos que requieren una base estable de tiempo entre otras funcionalidades.

Convertidor analógico-digital: Es muy frecuente trabajar con señales analógicas (véase temperatura, velocidad, sonido, etc...), estas deben ser convertidas a digital para poder ser comprendidas por el microcontrolador y por eso se incorpora un conversor analógico-digital.

Puerto Serie: Este periférico está presente en casi cualquier microcontrolador, normalmente en forma de UART (universal Asynchronous Receiver Transmitter) o USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) dependiendo de si permiten o no el modo síncrono de comunicación. Este periférico comúnmente es utilizado para realizar la comunicación con otro microcontrolador o cualquier otro dispositivo que cuente con el puerto de comunicación serial como por ejemplo una computadora.

SPI: Este tipo de periférico se utiliza para comunicar al microcontrolador con otros microcontroladores o con periféricos externos conectados a él, por medio del protocolo SPI.

I2C: Cumple las mismas funciones que el SPI, pero requiere menos señales de comunicación y cualquier nodo puede iniciar una transacción. Es muy utilizado para conectar las tarjetas gráficas de las computadoras personales con los monitores, para que

estos últimos informen de sus prestaciones y permitir la autoconfiguración del sistema de vídeo.

Modulador de ancho de pulso: Los PWM son periféricos muy útiles sobre todo para el control de motores, sin embargo, hay un grupo de aplicaciones que pueden realizarse con este periférico, dentro de las cuales podemos citar: inversión DC/AC para UPS, conversión digital analógica D/A, control regulado de luz (dimming) entre otras.

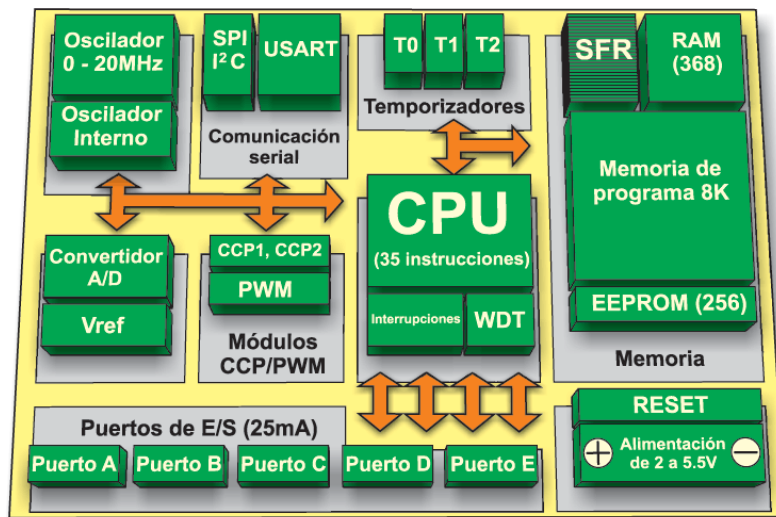


Figura 2. 5 Periféricos Internos del Microcontrolador

El microcontrolador es entonces la parte esencial del sistema ya que es el que maneja todas las funciones que este debe realizar, tal como procesar todos los datos numéricos obtenidos de las mediciones realizadas, llevar a cabo la intercomunicación con otros microcontroladores o chips con el objetivo de enviar o recibir información, manipulación de cargas, etc...

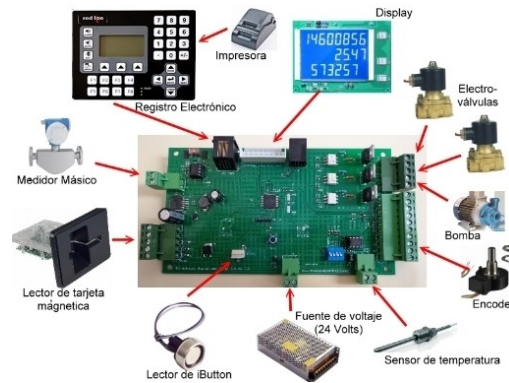


Figura 2. 6 Microcontrolador y sus periféricos.

2.2.1 Arquitecturas Von Neumann y Harvard

Las arquitecturas Von Neumann y Harvard son modelos generales del hardware de los ordenadores que presentan dos soluciones diferentes al problema de la conexión CPU con la memoria y a la organización de la memoria como almacén de instrucciones y datos. La arquitectura Von Neumann toma el nombre del matemático John Von Neumann, que propuso la idea de un ordenador con el programa almacenado.

ARQUITECTURA VON NEUMANN

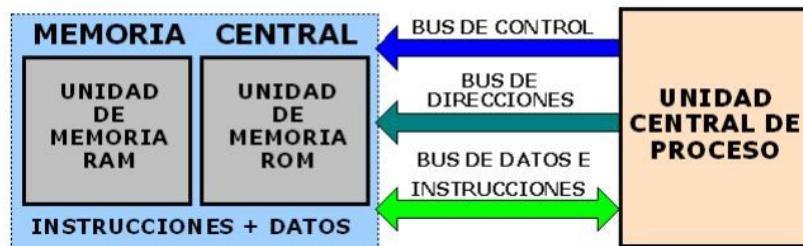


Figura 2. 7 Arquitectura Von Neumann

La arquitectura Von Neumann y Harvard son modelos generales del hardware de los ordenadores que presentan dos soluciones diferentes al problema de la conexión del CPU con la memoria y a la organización de la memoria como almacén de instrucciones y datos. La arquitectura Von Neumann utiliza una memoria única para instrucciones y datos. Esto significa que con un mismo bus de direcciones se localizan instrucciones y datos y que por un único bus de datos transitan tanto instrucciones como datos. La misma señal de control que emite la CPU para leer un dato, sirve para leer una instrucción. No hay señales de control diferentes para datos e instrucciones.

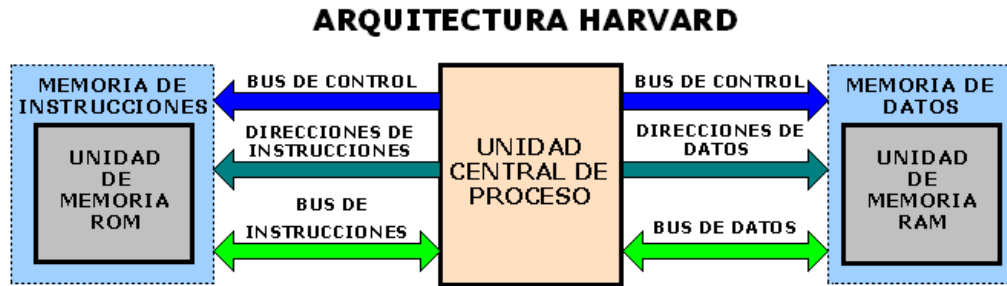


Figura 2. 8 Arquitectura Harvard

El término arquitectura Harvard se debe al nombre del lugar donde Howard Aiken diseñó los ordenadores MAR I, II, III y IV. Estos ordenadores fueron los primeros en utilizar memorias separadas para instrucciones y datos, una concepción diferente al ordenador de programa almacenado. La arquitectura Harvard utiliza memorias separadas para instrucciones y datos. En este caso la memoria de programa tiene su bus de direcciones, su propio bus de datos y su bus de control. Por otra parte, la memoria de datos tiene su propio bus de datos, direcciones y control, independiente de los buses de la memoria de programa. La memoria de programa es solo de lectura, mientras que en la de datos se pueden leer y escribir.

La arquitectura Von Neumann requiere menos líneas que la Harvard para conectar la CPU con la memoria, lo cual significa una conexión más simple entre ambas. Pero es imposible manipular simultáneamente datos e instrucciones, debido a la estructura de buses únicos, algo que sí es posible en la arquitectura Harvard, que tiene buses separados. Esto confiere a la arquitectura Harvard la ventaja de una mayor velocidad de ejecución de los programas.

2.3 Reloj de Tiempo Real

Los Relojes en Tiempo Real (RTC, por sus siglas en inglés) son dispositivos que contienen un oscilador y que generalmente necesitan un cristal para trabajar con la precisión requerida. Este cristal es un dispositivo piezoeléctrico, esto quiere decir que el cristal es capaz de polarizarse eléctricamente cuando se le aplica una fuerza para deformarlo y viceversa. Por lo dicho anteriormente el cristal es capaz de oscilar a una frecuencia precisa y conocida. El RTC se encuentra embebido dentro del sistema de medición, permite

agregar estampas de tiempo a los datos grabados en el dispositivo de almacenamiento. La exactitud de la estampa de tiempo va a depender del cristal con el que cuenta el RTC. La exactitud se puede medir en unidades Partes por Millón (PPM). Cristales con menor PPM cuestan mucho más que los que cuentan con un alto PPM. Cuando un cristal cuenta con una exactitud de 20 PPM, lo cual se interpreta como + 20, tendremos en el tiempo una variación de + 20 segundos después de 11 días, 13 horas, 46 minutos y 40 segundos. Lo anterior equivale a decir que después de un millón de segundos tendremos una variación de + 20 segundos.

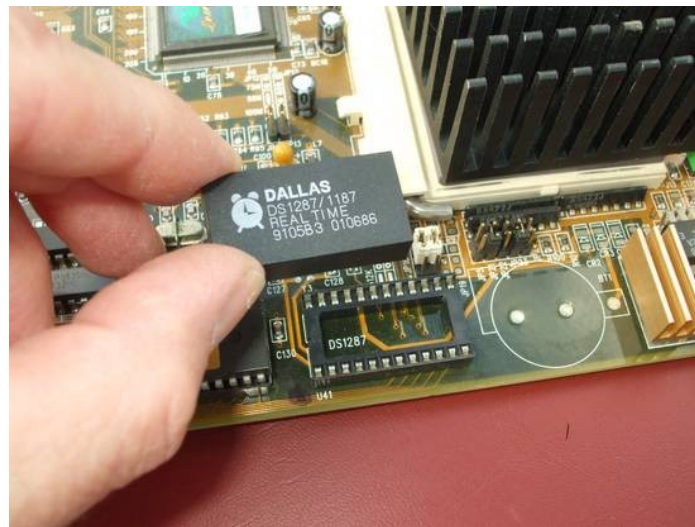


Figura 2. 9 Reloj de Tiempo Real de una computadora Dallas.

2.4 Internet de las Cosas

Desde la llegada del Internet, éste ha evolucionado de una forma veloz, desde aquellos rudimentarios módems hasta las rapidísimas y eficaces líneas de fibra óptica actuales. Al día de hoy se pueden conectar a Internet los dispositivos móviles, impresoras, Smart TV, cámaras vía IP, GPS y multitud de dispositivos electrónicos que poseen esta funcionalidad. Desde hace ya unos años se empezó a hablar del IoT (abreviación de Internet of Things, en español Internet de las cosas), no siendo más que una apuesta de futuro y comenzando a ser en la actualidad una absoluta realidad. Cada vez es más frecuente encontrarse con nuevos dispositivos capaces de conectarse a Internet y permitir al usuario un control y manejo de forma remota desde cualquier parte del mundo, pero esto no ha hecho más que comenzar.

Se puede definir el **Internet de las cosas** como la consolidación a través de la red de redes de una "red" que alojase una gran multitud de objetos o dispositivos, es decir, poder tener conectada a ésta todas las cosas de este mundo como podrían ser: vehículos, electrodomésticos, dispositivos mecánicos, o simplemente objetos tales como calzado, muebles, maletas, dispositivos de medición, biosensores, o cualquier objeto que se pueda imaginar. El objetivo que pretende alcanzar esta tecnología es hacer más cómoda la vida cotidiana, así como proporcionar una mayor seguridad en diversos ámbitos.

2.5 Redes LPWAN

Para la conexión local se ha seleccionado los dispositivos LoRaWAN, los cuales son dispositivos diseñados para dispositivos de bajo consumo energético y de alto alcance. El estándar de red LoRaWAN apunta a requerimientos característicos de Internet de las Cosas, tales como conexiones bidireccionales seguras, bajo consumo de energía, largo alcance de comunicación, bajas velocidades de datos, baja frecuencia de transmisión, movilidad y servicios de localización. Permite la interconexión entre objetos inteligentes sin la necesidad de instalaciones locales complejas, y además otorga amplia libertad de uso al usuario final, al desarrollador y a las empresas que quieran instalar su propia red para Internet de las Cosas.

| Característica | LoRa | ZigBee | Bluetooth | Wi-Fi |
|--|--|--|--|---|
| Especificación IEEE | 802.15.4g | 802.15.4 | 802.15.1 | 802.11n/b/c |
| Frecuencia de trabajo | 137 – 1020 MHz | 868/915 MHz; 2.4 GHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz; 5 GHz |
| Ancho de banda de canales BW | 7.8 – 500 kHz | 0.3/0.6 MHz; 2 MHz | 1 MHz | 22 MHz |
| Máxima tasa de datos | 0.018 – 37.5 Kb/s | 250 Kb/s | 1 Mb/s | 54 Mb/s |
| Alcance nominal | 172 m (Indoor)* 565 m (Outdoor)* | 10 - 100 m | 10 m | 10 - 100 m |
| Máxima potencia nominal de TX | Hasta 20 dBm | (-25) - 0 dBm | 0 - 10 dBm | 15 - 20 dBm |
| Protección de datos (Error de redundancia cíclica) | 16-bit CRC | 16-bit CRC | 16-bit CRC | 32-bit CRC |
| Tiempo de conexión | Menos de un segundo* | Menos de 30 ms | Entre 3 - 5 segundos | Máximo 10 segundos |
| Tipo de modulación | FSK/OOK/LoRa™ | BPSK (+ ASK), O-QPSK | GFSK | BPSK, QPSK, COFDM, CCK, M-QAM |
| Consumo energético | Muy bajo* | Bajo | Intermedio | Alto |
| Tipo de comunicación | Half dúplex | Half dúplex | Full dúplex | Full dúplex |
| Tipo de red | LPWAN Red de área ampliada de bajo consumo | WPAN Red de área personal | WPAN Red de área personal | WLAN Red de área local |
| Topologías de red | Punto a punto, punto a multipunto, estrella, malla | Punto a punto, punto a multipunto, estrella, malla, árbol | Scatternet (propio de Bluetooth) | Punto a hub ESS malla |
| Aplicaciones | Automatización, Domótica, sistemas de alarmas inalámbricas, monitorización y control industrial, sistemas de irrigación, sensórica* | Dispositivos portátiles, Domótica (control y monitorización), automatización, juguetes, sistemas de irrigación, sensórica | Dispositivos portátiles (periféricos como auriculares, teclados, mouse, entre otros) y algunos dispositivos industriales de comunicación | Se utiliza para acceder a Internet y para interconexión de computadoras |

Figura 3. 1 Comparación entre Tipos de Comunicación Local

En la ilustración 3 se observa una tabla comparativa entre las diferentes tecnologías disponibles para conexiones locales, el estándar LoRa es el protocolo indicado para nuestros objetivos, ya que se busca ahorrar energía y un largo alcance en el intercambio de datos, la transmisión se realiza dentro de las bandas de frecuencia abierta. El bajo consumo se debe a la baja potencia de transmisión de los dispositivos Lora lo que a su vez se traduce a una transmisión lenta pero segura, el ancho de banda es muy bajo en comparación con los de bluetooth Wi-Fi, sin embargo, no son útiles para este tipo de aplicaciones que no necesitan un ancho de banda muy grande, ya que solo se transmiten datos de sensores y no video ni audio o cualquier otro tipo de archivo que sea más pesado. LoRa es adecuado para la transmisión de datos de sensores que necesitan tener un ahorro energético máximo, lo que lo hace el protocolo adecuado para nuestros objetivos.

2.6 Lora y LoraWAN

Este gran esquema denominado IoT o internet de las cosas, tiene como base una red **LPWAN**. Una red de área amplia de baja potencia (LPWAN – Low-Power Wide-Area Network) es un tipo de red de área amplia de telecomunicaciones inalámbricas diseñada para permitir comunicaciones de largo alcance a una velocidad de bits baja entre objetos (denominados nodos) conectados.

Existen distintas tecnologías LPWAN, entre las que destaca LoRa. **LoRa** es el tipo de modulación en radiofrecuencia, patentado por Semtech, y que entre sus principales ventajas se encuentra:

- Alta tolerancia a las interferencias.
- Alta sensibilidad para recibir datos (-168dB).
- Bajo consumo (hasta 10 años con una batería).
- Largo alcance (10 a 20km).
- Baja transferencia de datos (hasta 255 bytes).
- Conexión punto a punto (directa y simple) o Mesh (presencia de un nodo intermediario que coordina una red de máximo 255 nodos y el nodo coordinador escucha un nodo a la vez).
- Frecuencias de trabajo: 915Mhz América, 868 Europa, 433 Asia.

Para la transmisión inalámbrica de datos es utilizada una red de datos de área amplia y baja potencia, con el uso del protocolo de estándar abierto LoRaWAN, donde los dispositivos son conectados en la banda libre de frecuencia 915 MHz. De tal forma, la transmisión inalámbrica utilizada está catalogada por la norma **NOM-121-SCT1-2009** bajo la banda ISM reservadas internacionalmente para el uso de energía de radiofrecuencia (RF) para fines industriales, científicos, médicos. La banda en que operarán los dispositivos (902-928MHz) sujeta a esta norma, está atribuida primaria o secundariamente a otros servicios fijos, móviles, de radiolocalización y de radioaficionados, según el **Cuadro**

Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF).

Todo esto hace a la tecnología ideal para conexiones a grandes distancias y para redes de IoT que se pueden utilizar en ciudades inteligentes, lugares con poca cobertura celular o redes privadas de sensores o actuadores, por eso nace LoRaWAN.

LoRaWAN es un protocolo de red LPWAN que usa la tecnología LoRa para comunicar y administrar dispositivos LoRa. Su objetivo es cubrir las necesidades de El Internet de las Cosas, como comunicación bidireccional segura, movilidad y localización de activos. Este estándar provee de una interoperabilidad sin precedentes, y elimina la necesidad de complejas instalaciones, dando libertad a los usuarios, desarrolladores y empresas para llevar rápidamente a cabo despliegues IoT.

Las principales características de LoRaWAN son:

- Topología estrella.
- Alcance de 10 a 15km en línea de vista.
- Encriptación AES 128.
- Soporte para 3 clases de nodos.
- Administración de dispositivos.
- Redes públicas y privadas.
- Bajo consumo y largo alcance.
- Baja transferencia de datos (hasta 242 bytes).

2.7 Arquitectura de una red LoRaWAN

LoRaWAN está conformada por “end nodes”, gateways, network server y application server. Los end nodes están dotados con la tecnología LoRa (Long Range), la cual es la capa física, capaz de generar modulación inalámbrica para crear enlaces de largo alcance. Los datos transmitidos por los end nodes no están ligados a un Gateway específico, si no que los datos pueden ser recibidos por múltiples gateways. Los Gateway reenvían el

paquete recibido desde el end node a la network server a través de algún backhaul soportado (ya sea red celular, ethernet, satélite o Wi-Fi), el network server administra los paquetes recibidos, mediante verificaciones de seguridad, confirmaciones, etc. Y por último es ligado a una aplicación específica para el procesamiento de la información.[54]

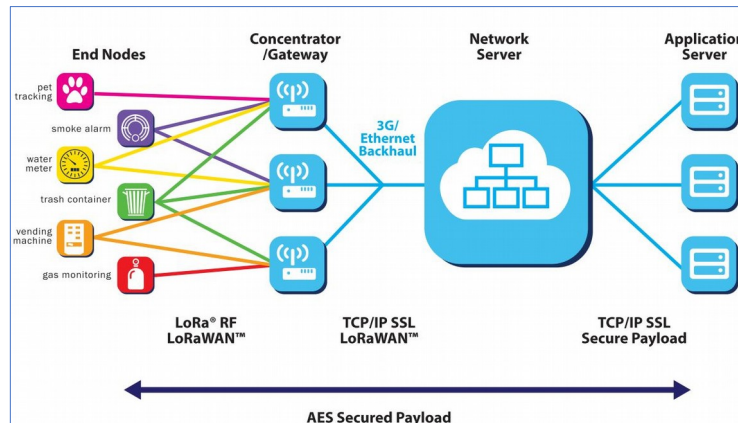


Figura 3. 2 Arquitectura de una red LoRaWAN

Los nodos (LoRa Devices) se dividen en tres clases:

- **Clase A:** Son dispositivos que están limitados a recibir datos si solamente han enviado un paquete antes. Cada vez que el dispositivo envía un paquete, se abren dos ventanas de recepción, la primera un segundo después de la transmisión y la segunda un segundo después de la primera ventana, con la oportunidad de recibir un paquete de vuelta. Debido a su comunicación condicionada estos son los dispositivos de menor consumo energético.
- **Clase B:** Estos dispositivos añaden la capacidad de recibir datos sin necesidad de enviar un paquete antes. Su funcionalidad permite que la aplicación envíe datos a los dispositivos de forma programada, esto se consigue mediante el envío periódico de balizas por parte del gateway. Estas balizas permiten a los dispositivos estar sincronizados con el gateway, y de esta forma negociar tiempos de recepción de paquetes desde el gateway al dispositivo, permitiendo al servidor saber cuándo el dispositivo está escuchando. Debido a su recepción periódica estos dispositivos presentan mayor consumo de energía que los de

clase A.

- **Clase C:** Son los dispositivos que se encuentran permanentemente escuchando, es decir pueden recibir datos en cualquier momento siempre y cuando no estén transmitiendo. Estos dispositivos presentan un consumo energético mayor respecto a las clases A y B.

2.8 MQTT

El MQTT (Message Queue Telemetry Transport) es un protocolo usado para la comunicación machine-to-machine (M2M) en el "Internet of Things". Este protocolo está orientado a la comunicación de sensores, debido a que consume muy poco ancho de banda y puede ser utilizado en la mayoría de los dispositivos empotrados con pocos recursos (CPU, RAM, etc.).

Capítulo 3

Materiales y Métodos

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la Universidad Autónoma de Zacatecas en el Laboratorio Nacional de Sistemas Embebidos, Diseño Electrónico Avanzado y Microsistemas (SEDEAM), y con ayuda de granjas acuícolas del estado de Zacateca, como la granja acuícola de San Gerónimo en donde se desarrollaron algunas pruebas para finalmente ser implementado el municipio de Eldorado, Sinaloa, México, en la Granja Acuícola María Esperanza SPR de RL de CV.

Para validar la hipótesis y alcanzar los objetivos establecidos en el presente proyecto de tesis, a continuación, se describen los materiales y métodos utilizados.

3.1 Metodología Aplicada

La metodología empleada esta basa en su mayoría el en las normas ISO para el desarrollo de productos en una empresa, en el que intervienen las siguientes fases de desarrollo: estudio preliminar, especificación de requerimientos, planeación de actividades, diseño de prototipo, construcción física, pruebas piloto, implementación, documentación.



Figura 3. 3 Modelo de Metodología Empleada

3.1.1 Estudio Preliminar

En esta fase se realiza un estudio al área de interés, para obtener información detallada de los problemas que acontecen. En esta etapa se definen las necesidades, y el planteamiento del problema en el área de interés. Para realizar un estudio preciso se realizó una visita a las granjas acuícolas de cultivo de camarón de la cooperativa Maria Esperanza, se obtuvo información detallada de los procesos de producción, así como del proceso de monitoreo de oxígeno disuelto. A partir de este estudio, se definió el problema de estudio del desarrollo de este proyecto.

3.1.2 Especificación de Requerimientos

En esta fase se desarrolla una entrevista o visita, a las partes de interés para obtener información muy detallada que permitan establecer los requerimientos para el proyecto o los objetivos a alcanzar. Gracias a la visita realizada, y en conjunto con los acuicultores, se pudieron establecer los requerimientos del proyecto, se estableció el monitoreo de oxígeno disuelto como el parámetro de interés para los acuicultores, tecnologías que pudieran solventar los problemas, alcances del proyecto, etc. De esta fase obtuvimos los objetivos de este proyecto y los requerimientos necesarios para alcanzar el objetivo (objetivos específicos).

3.1.3 Planeación de Actividades

Esta etapa permite definir las actividades y tareas que son necesarias para el desarrollo del proyecto, mediante el uso de cronogramas se calendarizan las actividades, lo que permite un mejor control en el desarrollo del proyecto. Mediante el software “Gantt Project” se realizó un cronograma de actividades, se plantearon las tareas a realizar, y el tiempo estimado para cada una de ellas.

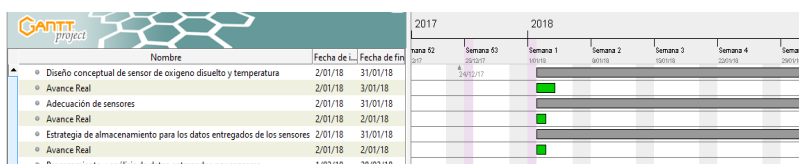


Figura 3. 4 Parte del cronograma de actividades.

3.1.4 Diseño de Prototipo

Se definen los elementos que son necesarios para alcanzar los objetivos o los requerimientos establecidos, se analiza como los elementos se conjuntan, lo que permite

un mejor entendimiento general del funcionamiento que se busca. Resultado del estudio de tecnologías, se definió a la arquitectura de una red LoRaWAN como la base para el diseño del sistema, esto nos permitió entender como todo es interconectado, y como todos los elementos se conjuntan para su funcionamiento, esto se ve más a detalle en el apartado “Arquitectura del Sistema Propuesto”.

3.1.5 Construcción Física

Se lleva a cabo la construcción física del diseño de prototipo establecido, en esta etapa se suelen detectar problemas de diseño, si existen, en ocasiones se tiene que volver a la etapa de diseño para corregir los problemas, pero también es posible corregir sin necesidad de volver a la etapa de diseño. El proceso de construcción física se ve más a detalle en los apartados “Diseño y desarrollo del nodo de monitoreo” y “Concentrador/Gateway”

3.1.6 Pruebas Piloto

Son las pruebas que verifican el funcionamiento de los elementos que componen al prototipo, se pueden realizar mediante pruebas unitarias, pruebas generales, etc. Aquí se realiza una pre verificación del cumplimiento de los requerimientos. El apartado “Pruebas Piloto” describe a más detalle cómo se realizaron las pruebas de diseño.

3.1.7 Implementación

Esta fase consiste en implementar el prototipo en un ambiente de trabajo real, lo que permitirá la verificación de los requerimientos establecidos para un prototipo funcional. Este apartado se describe en la sección “implementación del sistema”

3.1.8 Documentación

En esta etapa se redacta la documentación del proyecto desarrollado.

3.2 Arquitectura del Sistema Propuesto

El sistema propuesto está basado en la arquitectura de una red LoRaWAN, debido al amplio alcance de los enlaces, la robustez del protocolo, y el bajo consumo, que hacen de esta arquitectura la ideal para nuestro sistema. Los nodos de monitoreo (end Node) son instalados directamente en los estanques de producción de camarón, en donde recolectan datos de temperatura y oxígeno disuelto, el paquete de datos es enviado vía protocolo

LoRaWAN al Gateway que re direcciona la información a la network server mediante algún backhaul soportado, en este caso se eligió la tecnología 3G debido a la falta de redes de internet, la información es procesada en una aplicación específica que sirve como interfaz gráfica para el usuario. La figura 3.1 muestra la arquitectura específica de la red LoRaWAN para el sistema propuesto.

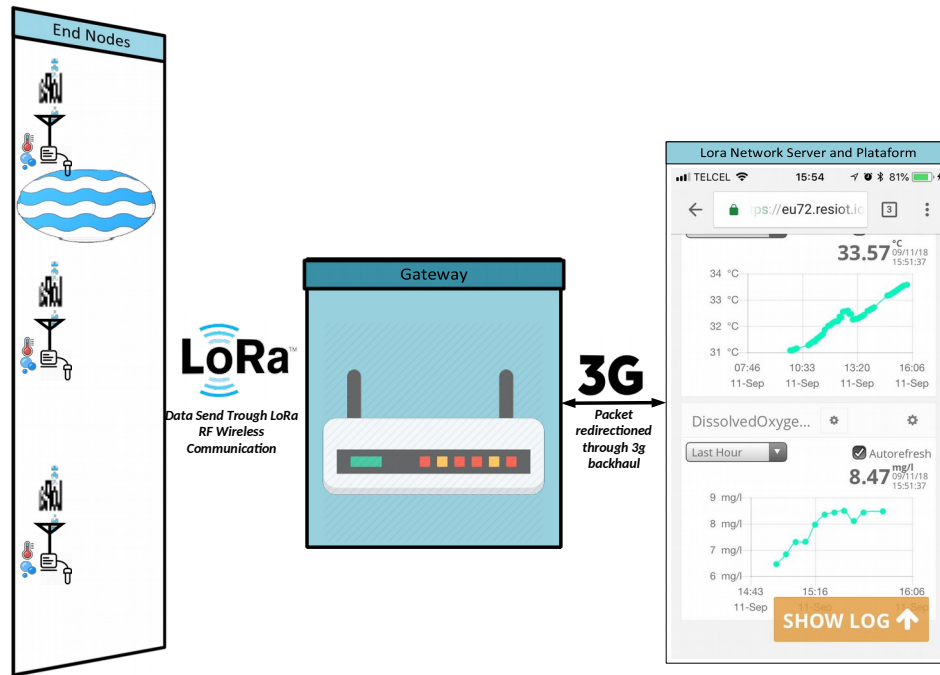


Figura 3. 5 Arquitectura del sistema propuesto

A continuación, se describe el desarrollo de los elementos que componen la arquitectura del sistema propuesto.

3.3 Concentrador/Gateway

como Gateway se seleccionó un dispositivo electrónico, el cual es una puerta de enlace de telecomunicaciones especialmente diseñado para aplicaciones industriales de internet de las cosas (IoT), gracias a su soporte de sistemas operativos (APP environment), el desarrollo de aplicaciones es muy potente.

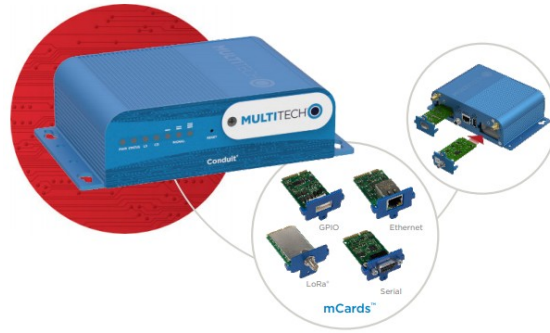


Figura 3. 6 Gateway y sus diferentes backhauls y tarjetas de conexión local
 El dispositivo tiene la capacidad de agregar periféricos de telecomunicaciones (backhaul), lo que lo hace sumamente configurable, las configuraciones posibles se muestran Tabla 1.

| Backhaul | APP Environment | Local Connection |
|----------|-----------------|------------------|
| 4G LTE | mPower | Ethernet |
| 3G | mLinux | Serial |
| 2G | | GPIO |
| Ethernet | | LoRaWAN |
| Wi-Fi | | |

Tabla 1 Configuraciones posibles para el Gateway

Entre sus ventajas están:

- Puede alcanzar hasta 16 kilómetros a línea de vista, y 5 kilómetros en zonas urbanas.
- Una amplia variedad de integración con plataformas para la nube, públicas y privadas.
- Alta configurabilidad dependiendo de la aplicación específica requerida.
- Comunicación bidireccional.

Además, tiene diferentes bandas de frecuencia de operación, las frecuencias abiertas para ISM en Europa que van desde 867-869 MHz y américa del norte 902-928 MHz.

La función del Gateway es redireccionar los datos recibidos desde la red LoRa y enviarla a la Network Server mediante el backhaul seleccionado, hasta una aplicación web, en el desarrollo de este proyecto se utilizó un Network Server que además provee una interfaz web especial para el desarrollo de proyecto de internet de las cosas, para lograr esto es necesario primero instalarlo en el Gateway.

3.3.1 Instalación de la Network Server/Application Server

Para hacer uso del LoRaWAN Network Server es necesario la instalación de los paquetes para que el Gateway funcione como una estación cliente (base station client). Para realizar la instalación es necesario acceder primero a la interfaz AEP, mediante esta interfaz se puede realizar la configuración total del Gateway.

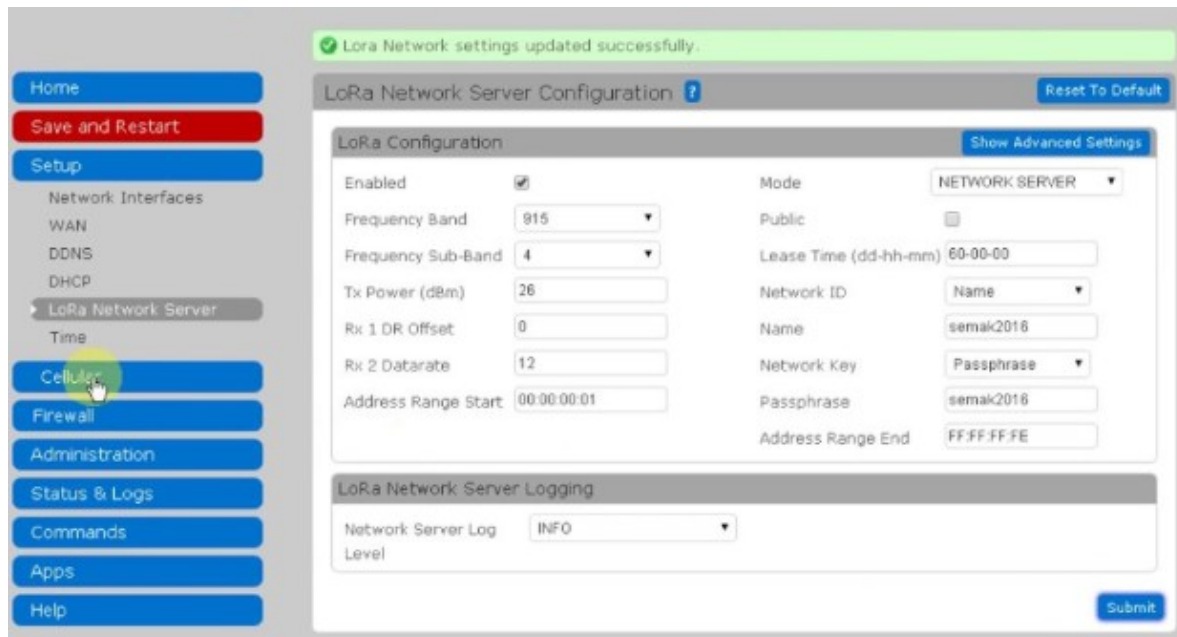


Figura 3. 7 Interfaz AEP para la configuración del Gateway

En este paso, se establece el uso de la red LoRa como forma de telecomunicaciones locales y una conexión TCP para establecer la conexión con la Network Server/Application Server, para ello también se selecciona el backhaul para realizar dicha conexión, como se había mencionado anteriormente 3G es la tecnología a utilizar.

3.3.2 Network Server/Application Server

Entre las principales características, proporciona una interfaz web para el control del Gateway, gestiona todas las características del protocolo LoRaWAN, como la autenticación de nodos, el mantenimiento de claves de cifrado, la gestión de enlaces ascendentes y descendentes a través de todos los gateways unidos a la red LoRa. Además, se tiene la capacidad para el desarrollo de scripts LUA, eventos, disparadores (triggers), notificaciones por e-mail y telegram, API, dashboards y conectores de datos, lo que lo

convierte en una herramienta con alta escalabilidad a nivel de desarrollo IoT.

Una vez instalada la network server/application server es posible realizar la configuración de la red LoRa, para ello es necesario agregar un “end device” o nodo de monitoreo, los siguientes campos son requeridos:

Nombre: El nombre del nodo a registrar.

Node AUTH/Type: Se especifica el tipo de dispositivo, es decir, si es tipo A, B y C.

Device EUI: Es un código de identificación único de 16 bytes del nodo.

Application EUI: Es un código de 16 bytes que identifica la aplicación, un nodo puede pertenecer a diferentes aplicaciones.

Device Address: es un identificador de dirección de 8 bytes

Application Session Key: es una llave de seguridad de 32 bytes para la autenticación de la aplicación.

Network Session Key: es una llave de seguridad de 32 bytes para la autenticación de la conexión.

Estos campos son requeridos por motivos de seguridad, la comunicación entre el nodo de monitoreo y el Gateway se encuentra encriptada con el protocolo AES, las llaves son utilizadas para la desencriptación de los paquetes recibidos y la autenticación del nodo que envía datos al Gateway. De esta forma se consigue que, aunque el Gateway reciba datos por LoRa, a menos que se trate de un dispositivo registrado, el Gateway no procesará los datos de la misma forma aplica para la Network Server/application. En la figura 3.4 se muestra el registro de un nodo de ejemplo en la plataforma web.

Figura 3. 8 Ejemplo de Registro de un end node

Los nodos registrados pueden ser visualizados en la opción de nodos, además se puede apreciar el estado, es decir, si el end node se ha conectado al gateway, así como la intensidad de la señal con la que realizó la conexión.

| State | Child Of | Name | DevEUI | AppEUI | DevAddr | Date Last Message | Authentication |
|-------|----------|--------------|------------------|------------------|----------|-----------------------|----------------|
| ✘ | | mDot_001 | 0082C5C2B353086D | 70B3D50000000000 | 26011F19 | Jun 18 2019, 10:37:14 | ABP Class C |
| ✔ | | Nodo_002 | 0402030104020301 | 70B3D50000000000 | 01010302 | Dec 3 2019, 14:04:23 | ABP Class A |
| ✘ | | RocketScream | 0102030405060708 | 70B3D50000000000 | A0000001 | Feb 27 2019, 12:38:37 | ABP Class A |
| ✘ | | NodoA | 0403020104030201 | 70B3D50000000000 | aaaaaaaa | Jun 7 2019, 15:28:06 | ABP Class C |
| ✘ | | Vestible | 0102030401020304 | 70B3D50000000000 | 26021544 | Jan 16 2019, 13:00:03 | ABP Class A |

Figura 3. 9 Ejemplo de Lista de nodos registrados en la plataforma

Registrado el nodo de monitoreo e instalado el Network Server/Application server, el Gateway está listo para recibir datos desde la red LoRa y direccionarlos a la Aplicación.

3.3.3 Dashboards de visualización

Para la visualización de los datos de monitoreo se agregaron 2 dashboard, uno para el oxígeno disuelto y el otro para la temperatura. En la creación de dashboard se especifica el nombre del dashboard, la localización, la escala de medición las unidades de medida, tamaño del dashboard. En las figuras se muestra la creación de los dashboards correspondientes a la temperatura y oxígeno disuelto.

Figura 3. 10 Edición de los parámetros del dashboard

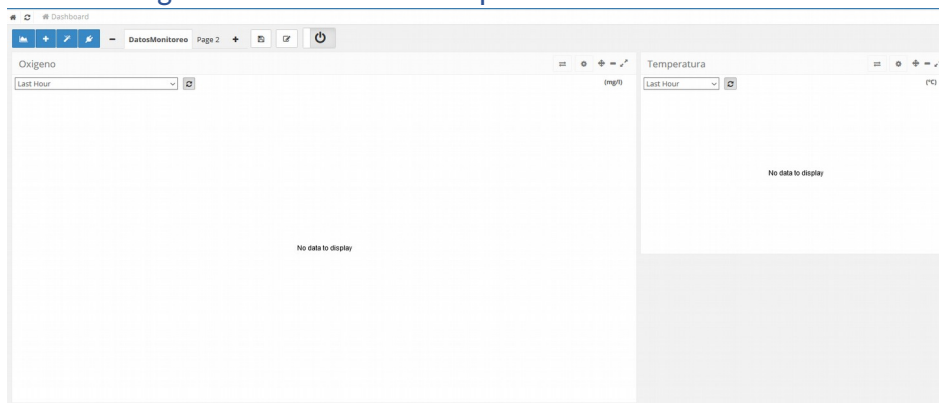


Figura 3. 11 Dashboards Creados, no se muestran datos hasta que sean recibidos.

sin embargo, para que los datos se muestren en el dashboard tienen que ser extraídos del paquete LoRaWAN que es recibido, esto es posible mediante scripts LUA. Para obtener los datos de monitoreo se desarrolló un código LUA, el código verifica que se trate del nodo de monitoreo y posteriormente extrae los bytes, debido a que se conoce en que posición del paquete LoRa se encuentran los bytes correspondientes a la temperatura y oxígeno disuelto, es posible reacomodar los bytes para obtener los valores, para evitar el punto decimal, los valores son multiplicados por 1000 y 100 para la temperatura y oxígeno disuelto respectivamente, por esta razón los valores recibidos son divididos entre sus respectivos valores para restaurar el punto decimal, posteriormente el valor resultante se grafica en los dashboards creados. La figura 3.8 muestra el código LUA desarrollado.

```

1  -----
2  ---// Programa LUA para el uso de 2 nodos //
3  ---// Se obtiene el ID del nodo, se obtienen los bytes del mensaje y se imprimen //
4  -----
5  TagTemp= "Temperatura"
6  TagDO = "Oxigeno"
7  ID = ""
8
9  deveui = resiot_comm_getparam("deveui")
10 appeui = resiot_comm_getparam("appeui")
11
12 payload, err = resiot_getlastpayload(appeui, deveui)
13 ArrByte, er = resiot_hexdecode(payload)
14
15 T = ArrByte[1] * 2 ^ 8 + ArrByte[2]
16 Tem = T/1000
17 Oxy= ArrByte[7] * 2 ^ 8 + ArrByte[8]
18 Oxygen=Oxy/100
19
20 worked, err = resiot_setnodevalue(appeui, deveui, TagTemp, Tem)
21
22 if err ~= "" then
23     resiot_globaldebug("Error Temp" .. ID)
24     resiot_globaldebug(err)
25 end
26
27 worked2, err2 = resiot_setnodevalue(appeui, deveui, TagDO, Oxygen)
28
29
30 if err2 ~= "" then
31     resiot_globaldebug("Error DO" .. ID)
32     resiot_globaldebug(err)
33 end
34
35 resiot_globaldebug("ID: " .. ID)
36 resiot_globaldebug("Temperatura (°C): " .. Tem )
37 resiot_globaldebug("Oxigeno Disuelto(mg/l): " .. Oxygen )

```

Figura 3. 12 Script LUA para la extracción de los datos y visualización en dashboard.

3.3.4 Sistema de Alimentación

El próximo paso en el desarrollo del nodo Gateway, es el desarrollo del sistema de alimentación, el Gateway debe funcionar las 24 horas del día, para realizar el cálculo del sistema fotovoltaico es necesario conocer el consumo energético del Gateway, según la hoja de datos el consumo energético del Gateway es de $I_G = 600\text{mA}$. Si se establece un voltaje deseado de 12 volts. Entonces la potencia del Gateway estará dada por:

$$P_G = (V_G)(I_G) = (12\text{ v})(600\text{ mA}) = 7.2\text{ W}$$

Dado que el Gateway debe estar encendido todo el día, el consumo diario del Gateway esta dado por:

$$W_{hG} = (P_G)(h) = (7.2\text{ W})(24\text{ h}) = 172.8\text{ Wh}$$

A partir de este resultado podemos obtener la capacidad de la batería:

$$Ah_G = \frac{W_{hG}}{V_G} = \frac{172.8\text{ Wh}}{12\text{ V}} = 14.4\text{ Ah}$$

Sin embargo, si escogemos una celda solar y una batería con los parámetros calculados

anteriormente asegurarían un día de energización del Gateway, sin considerar pérdidas de energía posibles en el sistema y sin considerar que las Horas de Sol Efectivas (HSE), las cuales varían en proporción al ángulo de ubicación, el mes del año y la latitud y longitud de nuestra ubicación. Por tal motivo se considera un Factor de Seguridad de 2 el cual aseguraría más de un día de energización. Reescribiendo los anteriores resultados, tenemos que:

$$Wh_N = (180 Wh)(2) = 360 Wh$$

Para elegir una celda solar que satisfaga la potencia deseada, es necesario conocer las HSE, y la eficiencia del controlador de carga, la cual estableceremos en un 80%, según datos del Laboratorio Nacional de Energías Renovables en su página web RE Explorer, las horas solares efectivas en Sinaloa son en promedio de 6 horas, por lo tanto, HSE = 6 Entonces la potencia de la celda solar deberá ser de:

$$P_{CS_G} = \frac{Wh_G}{\text{Eficiencia } C.C} = \frac{360 Wh}{0.8} = 450 Wh$$

$$P_{CS_G} = \frac{Wh_N}{HSE} = \frac{450 Wh}{6 h} = 75 W$$

3.3.5 Componentes seleccionados para el sistema de alimentación

3.3.5.1 Panel Solar



Figura 3. 13 Panel Solar Seleccionado de 85 Watts

Debido a disponibilidad comercial se eligió una celda solar de 85W. Se eligió una celda solar marca Epcos modelo Prose-8512 con las siguientes características:

Potencia máxima: $85W_p$

Voltaje máximo: 17,5V

Corriente máxima: 4,86A

Voltaje en circuito abierto: 21,5V

Corriente en corto circuito: 5,12A

3.3.5.2 Batería



Figura 3. 14 Batería de 12V 14A seleccionada

Debido a la disponibilidad comercial, la batería utilizada para el Gateway es una batería de 12V y 14 Ah. El controlador de cargar solar seleccionado tiene las siguientes características:



Figura 3. 15 Controlador de Carga Seleccionado.

Voltaje Batería: 12/24V

Corriente Carga/Descarga: 20A

Entrada solar máxima: < 50V

Carga flotante: 13,7V (ajustable)

Parada de descarga: 10,7A(ajustable)

Reconexión de descarga: 12,6V

Consumo del controlador: < 10mA

Eficiencia: > 80 %

3.3.5.3 Diagrama de conexión del sistema de alimentación

La celda solar debe ser conectada a la entrada del controlador de carga de 20 A. El controlador de carga permitirá regular el voltaje proveniente de la celda solar, además cargará la batería y proporcionará un voltaje de salida estable necesario para la alimentación del Gateway. Para ello, es necesario realizar la conexión mostrada.

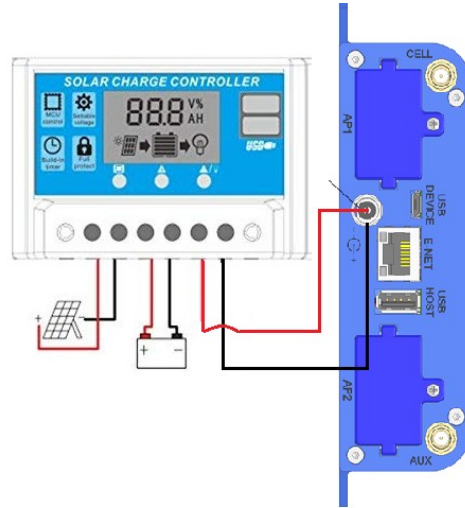


Figura 3. 16 Diagrama de Conexión del Sistema Fotovoltaico al Gateway.

La figura 3.13 muestra el resultado del ensamble del nodo Gateway.



Figura 3. 17 Ensamble Final del Nodo Gateway

3.4 Diseño y desarrollo del Nodo de monitoreo (End Node)

El objetivo del nodo de monitoreo es realizar mediciones frecuentes de oxígeno disuelto y temperatura, y enviar los datos recolectados a través de la red LoRaWAN establecida por el Gateway, el nodo de monitoreo dormirá la mayor parte del tiempo y solo despertará para realizar el proceso de medición, este proceso se repetirá cada 5 minutos, para lograrlo el nodo de monitoreo necesita de 4 partes esenciales; un microcontrolador, un Reloj de Tiempo Real (RTC), los sensores de temperatura y oxígeno disuelto y por último el módulo de Radiofrecuencia LoRa.

3.4.1 Módulo de Alarma

El módulo de alarma está conformado por un reloj de tiempo real (RTC), el cual tiene una precisión de +/- 2 minutos por año, y como principal característica es que cuenta con una alarma configurable, que, al momento de activarse, envía una señal de onda cuadrada por medio de un pin. Esta característica es utilizada para que el microcontrolador se despierte y realice las mediciones de calidad del agua, la alarma se activa cada 10 minutos, lo que permitirá un monitoreo constante del estanque.

3.4.2 Sonda de Temperatura

El módulo de medición de temperatura está conformado por un ADC y por el sensor de temperatura. El sensor fue seleccionado debido a que puede permanecer constantemente sumergido en agua salada y no requiere de mantenimiento a corto plazo, la calibración del sensor se debe realizar de 3 a 5 años y tiene un rango de medición de -200°C a 850°C con una precisión +/- $(0.15 + (0.002 * t))$ en donde t es la temperatura en Celsius.

El dispositivo lector se encarga de obtener los datos del sensor de temperatura y puede ser controlado mediante los protocolos de comunicación I2C y Serial por medio de comandos ASCII, las principales características es que cuenta con un ADC con resolución de 0.001v y una precisión de +/- $(0.10^{\circ}\text{C} + 0.0017 \times ^{\circ}\text{C})$, permite cambiar las escalas de temperatura ($^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{K}$ o $^{\circ}\text{F}$), guarda los datos de calibración y tiene una modalidad de sleep.

La tabla 2 muestra las características del sensor de temperatura:

| | |
|--------------------------|----------------------|
| Rango | -200°C a 850 °C |
| Precisión | +/- (0.15+(0.002*t)) |
| Tiempo de Respuesta | 90 % en 13 segundos |
| Tiempo hasta calibración | 3-5 años |
| Tiempo de vida | 15 años |
| Tiempo Sumergido | indefinidamente |

Tabla 2 Características Técnicas de la Sonda de Temperatura.

3.4.3 Sonda de Oxígeno Disuelto

El módulo de medición de oxígeno disuelto está conformado por un dispositivo lector y la sonda de oxígeno disuelto. La sonda de Oxígeno disuelto puede permanecer constantemente sumergido en agua salada, es de muy bajo mantenimiento (18 meses) y la calibración se debe realizar aproximadamente al año de uso.

Tiene una esperanza de vida de más de 5 años, soporta rangos de temperatura de 1°C a 50°C. El rango de lectura de la sonda va desde los 0 a 100 mg/l, tiene una precisión de +/- 0.05 mg/l. El dispositivo lector se encarga de obtener los datos de la sonda de oxígeno disuelto, puede ser controlado mediante los protocolos de comunicación I2C y UART, cuenta con un ADC con precisión de +/- 0.05 mg/l, y tiene una modalidad de sleep. El dispositivo lector admite compensaciones de presión, temperatura y salinidad, los niveles de oxígeno disuelto se reducen a medida que la presión, temperatura y salinidad incrementa, colocando los valores adecuados a estas compensaciones permite que se obtengan medidas más precisas de oxígeno disuelto. La tabla 3 muestra las características de la sonda de oxígeno disuelto.

| | |
|--------------------------|------------------|
| Rango | 0-100 mg/L |
| Precisión | (+/-) 0.005 mg/L |
| Tiempo de Respuesta | 0.3 mg/L/per sec |
| Rango de Temperatura | 1 - 50 °C |
| Presión Máxima | 500 PSI |
| Profundidad Máxima | 343 m |
| Tiempo hasta calibración | 1 año |
| Tiempo de vida | > 5 años |
| Mantenimiento | 18 meses |
| Tiempo Sumergido | indefinidamente |

Tabla 3 Características Técnicas de la Sonda de Oxígeno Disuelto

3.4.4 Modulo LoRa

Ya que el protocolo de conexión local elegido en el Gateway es LoRaWAN el dispositivo final también debe tener el mismo protocolo, el módulo de radiofrecuencia, está conformado por un módulo LoRa, el cual es un dispositivo que trabaja en las bandas de frecuencia libres ISM (Industrial, Scientific and Medic) para norte américa, que comprenden desde los 902 - 928 MHz, con una frecuencia central de 915 MHz. El módulo LoRa cuentan con un módem de largo alcance que proporciona una comunicación de espectro ensanchado de largo alcance y una alta inmunidad a las interferencias, a la vez que minimiza el consumo de corriente cuando está en modo sleep, de hasta 1uA.

El nodo actúa como un dispositivo clase A, el cual es el modo más eficiente de energía, debido a que solo envía cuando se requiere y solo es capaz de recibir justo después de enviar la información por un tiempo limitado, a lo que se le llama ventana de recepción, cuando esta ventana se cierra, el dispositivo ya no es capaz de recibir información, si no, hasta que la próxima ventana de recepción se habrá, es decir cuando se envíe información de nueva cuenta. Si la aplicación necesitara de la capacidad de recepción en cualquier momento, existen otras clases más adecuadas como la clase B o C, sin embargo, para nuestro el presente proyecto, clase A es la más apropiada.



Figura 3. 18 Modulo de Radiofrecuencia LoRa

3.4.5 Módulo de Alimentación

El módulo de alimentación es la fuente de energía que alimenta al nodo de monitoreo, el desarrollo del módulo de alimentación se desarrolla más adelante en este documento.

3.4.6 Microcontrolador

Como unidad central de procesamiento se seleccionó un microcontrolador de 8 bits, los

entre sus características más importantes son, contiene una memoria flas de programa de 32 KB, memoria RAM 2KB, EEPROM de 1KB, 23 líneas de entrada/salida de propósito general, contiene 6 canales para conversión análogo a digital (ADC) de 10 bits, un puerto serie USART, una interface SPI, una interfaz I2C, opera con voltajes desde 2.7v a 5.5v y cuenta con algunas modalidades de ahorro de energía:

Idle mode: detiene la CPU mientras permite que la SRAM, el temporizador/contador, el USART, la interfaz serial de 2 cables, el puerto SPI y el sistema de interrupción continúa funcionando.

Power down mode: guarda el contenido del registro, pero congela el oscilador, desactivando todos los demás chips hasta la próxima interrupción o el restablecimiento del hardware.

Power save mode: el temporizador asíncrono sigue funcionando, permitiendo al usuario mantener una base de temporizadores mientras el resto del dispositivo está durmiendo.

ADC noise reduction mode: El modo de reducción de ruido ADC detiene la CPU y todos los módulos de E/S excepto el temporizador asíncrono y el ADC, para minimizar el ruido de conmutación durante las conversiones del ADC.

Standby mode: el oscilador de cristal/resonador está funcionando mientras el resto del dispositivo está durmiendo. Esto permite un arranque muy rápido combinado con un bajo consumo de energía.

El microcontrolador está basado en la arquitectura Harvard, lo que permite ejecutar las acciones de programa en cada ciclo de reloj.

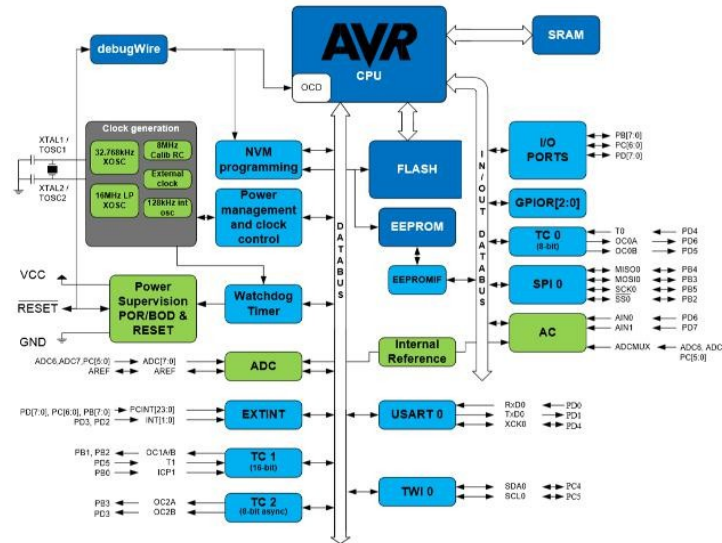


Figura 3. 19 Arquitectura del microcontrolador basado en una arquitectura Harvard El microcontrolador entonces soporta los protocolos de comunicación necesarios para interactuar con los módulos de alarma, medición y de radiofrecuencia. La figura 3.19 muestra como todos los elementos son conectados al microcontrolador aquí denominado nodo de monitoreo.

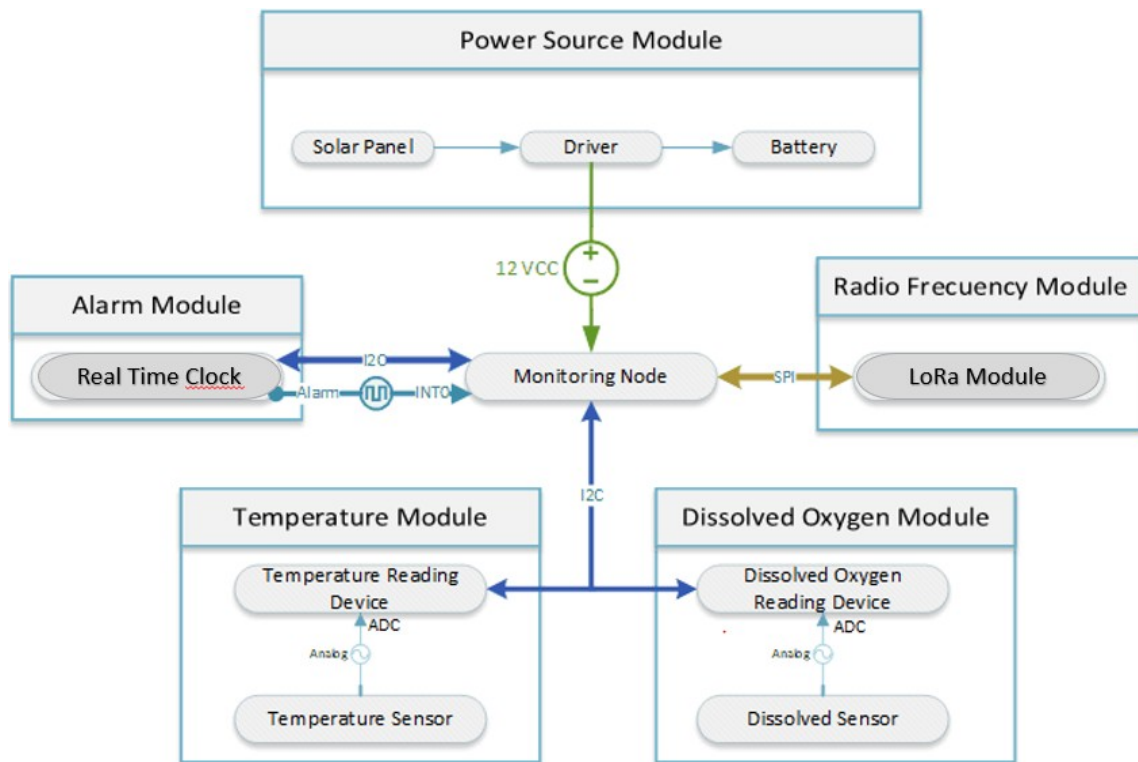


Figura 3. 20 Diagrama contextual de los elementos que componen al nodo de monitoreo.

Para realizar la interconexión de los elementos que componen al nodo de monitoreo, es necesario el diseño de una tarjeta de circuito impresa, a partir del diagrama contextual (figura 3.15) es posible realizar el diseño electrónico para desarrollar la PCB.

3.4.7 Diseño PCB

Como primer paso para el diseño electrónico, es necesario realizar en primera instancia el diseño esquemático de las interconexiones del nodo de monitoreo, a continuación, se presentan los diagramas esquemáticos resultantes realizados con ayuda del software Altium Designer.

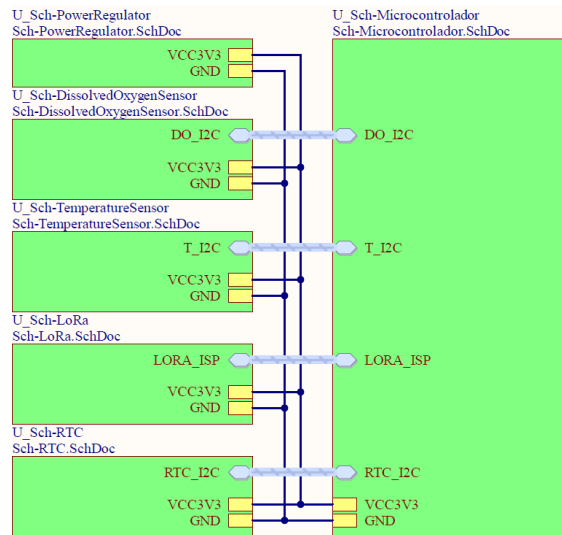


Figura 3. 21 Diagrama esquemático a bloques del nodo de monitoreo

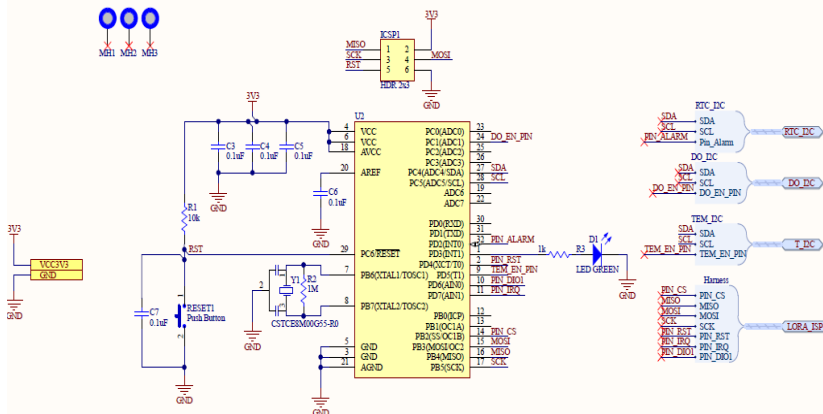


Figura 3. 22 Diagrama esquemático del microcontrolador

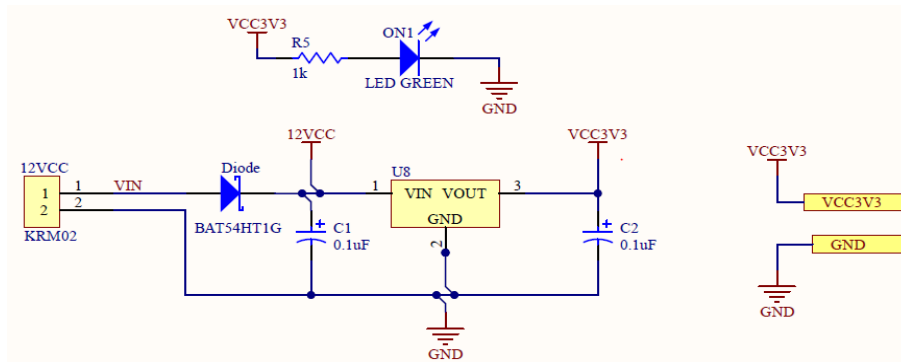


Figura 3. 23 Diagrama esquemático del regulador de voltaje

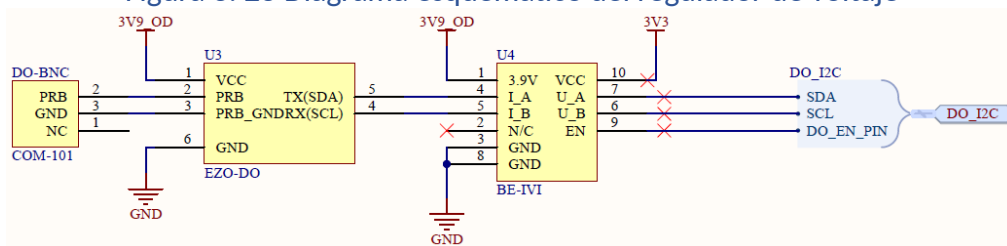


Figura 3. 24 Diagrama esquemático de la sonda de oxígeno disuelto y su ADC.

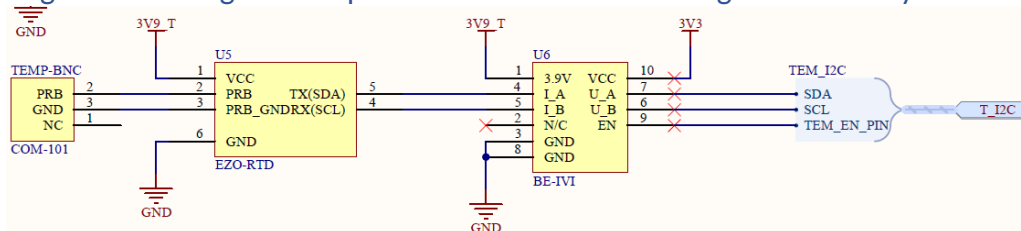


Figura 3. 25 Diagrama esquemático de la sonda de temperatura y su dispositivo ADC.

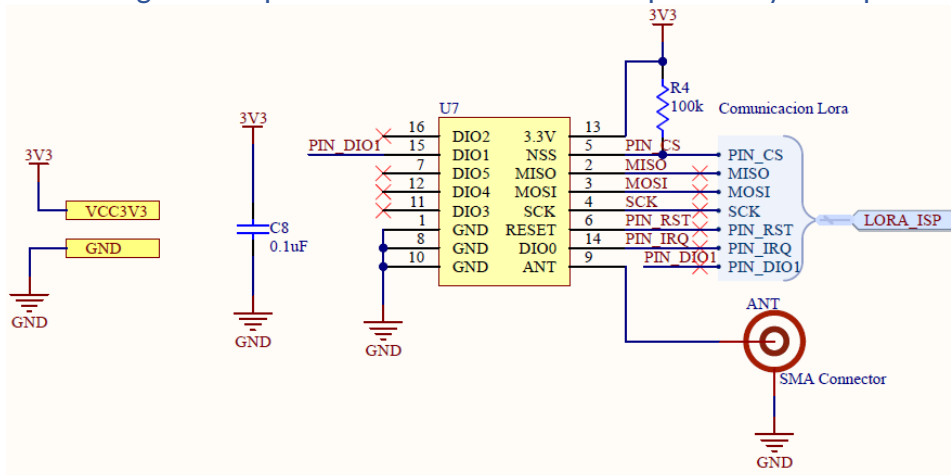


Figura 3. 26 Diagrama esquemático del módulo LoRa

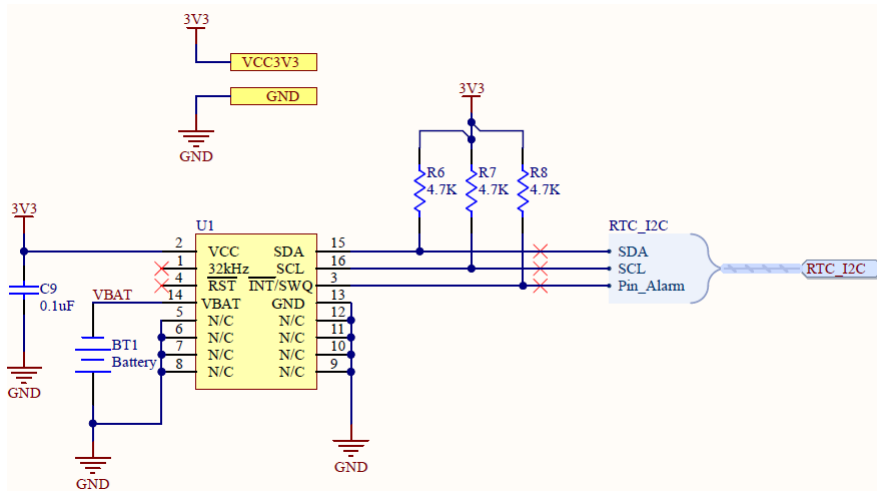


Figura 3. 27 Diagrama esquemático del módulo de alarma.

Una vez finalizados los diseños esquemáticos, el siguiente paso es realizar el diseño PCB, los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3.27 a la 3.33.

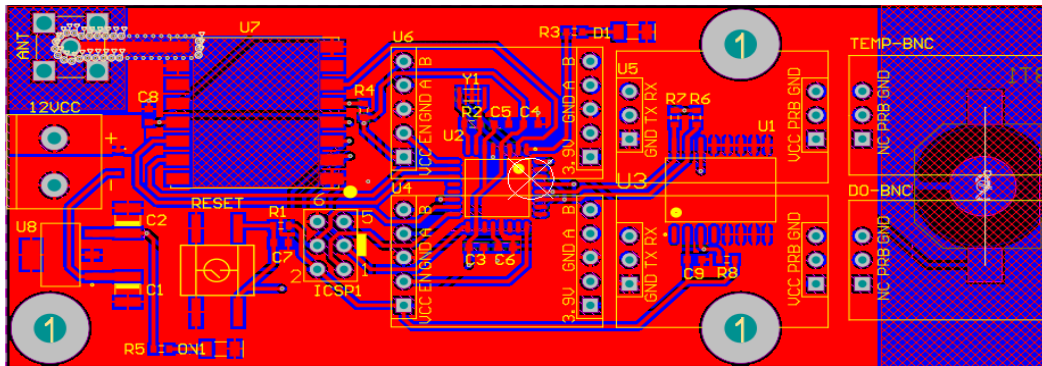


Figura 3. 28 Diseño PCB Todas las capas

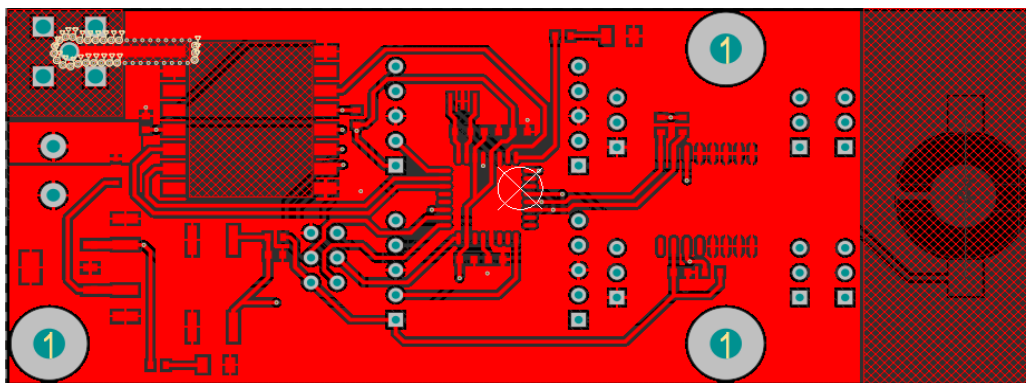


Figura 3. 29 Diseño PCB, capa superior (Top Layer)

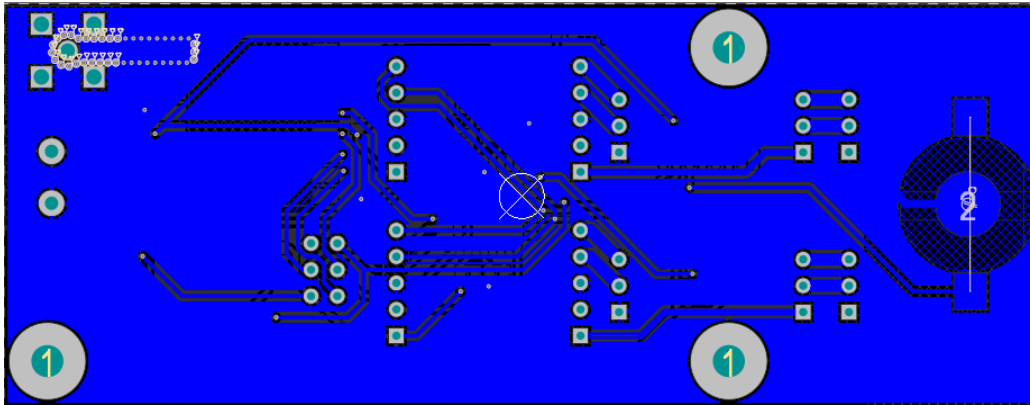


Figura 3. 30 Diseño PCB, capa inferior (Bottom Layer)

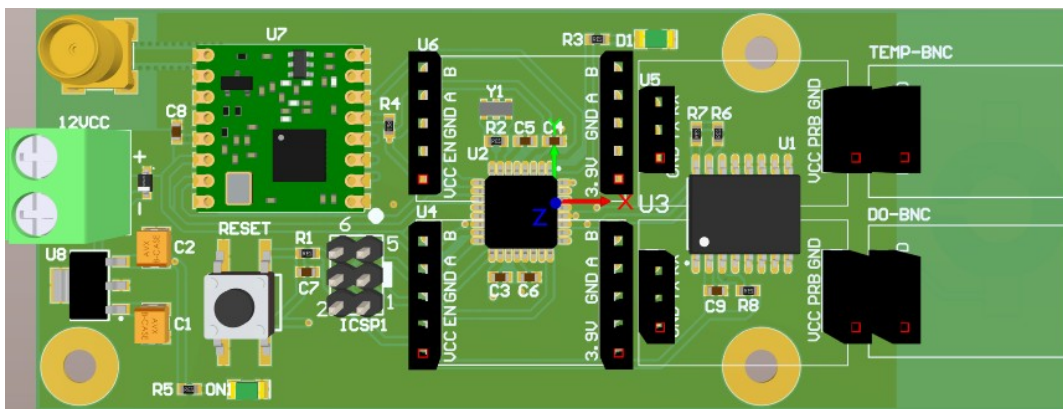


Figura 3. 31 Diseño PCB, vista superior 3D.

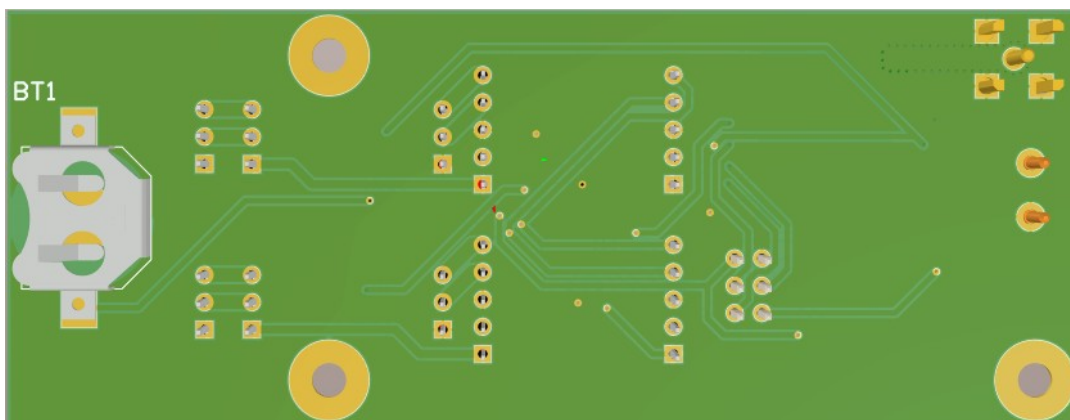


Figura 3. 32 Diseño PCB, Vista inferior 3D

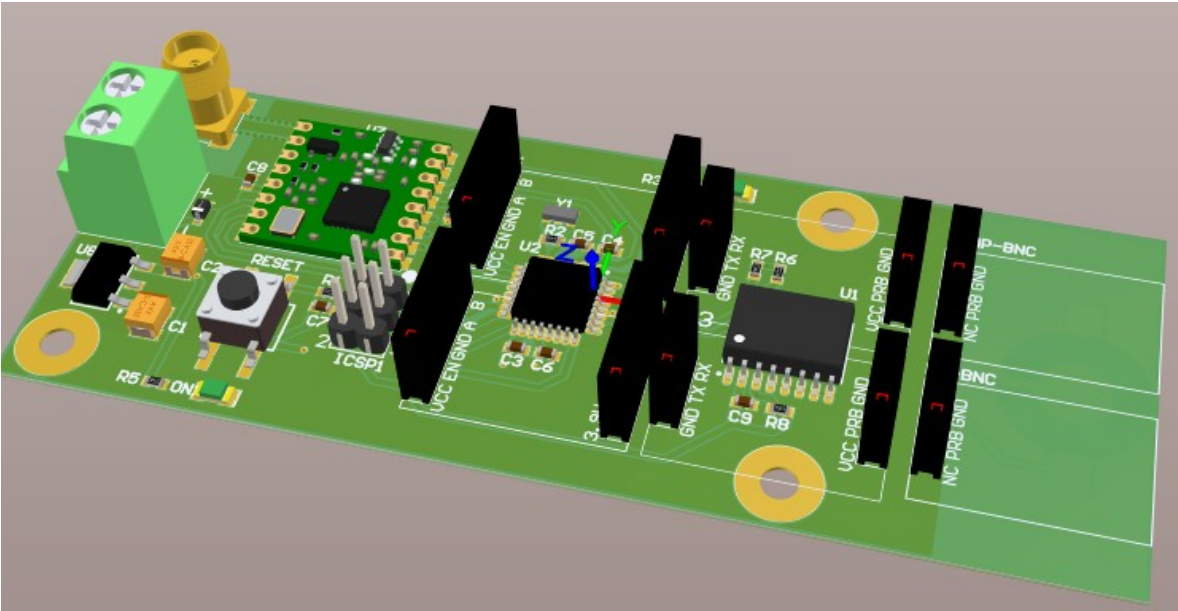


Figura 3. 33 Diseño PCB, vista isométrica 3D.



Figura 3. 34 Resultado de Fabricación y ensamble de PCB

3.4.8 Software Embebido

Para el desarrollo del software embebido se probaron dos flujos de programa, uno con método de confirmación, y el otro sin método de confirmación. El método de confirmación consiste en aprovechar la ventana de recepción que se abre momentáneamente en los dispositivos clase A cuando un paquete es enviado por red LoRaWAN, por medio de esta ventana de recepción podríamos confirmar la recepción de los datos por parte del Gateway el cual enviaría una respuesta de recepción de datos al nodo de monitoreo, sin embargo, si la ventana de recepción se cierra antes de que el Gateway conteste, el nodo no será capaz de escuchar la respuesta. Esto permitirá agregar calidad en el servicio al enlace LoRaWAN establecido.

3.4.8.1 Flujo del programa con método de confirmación

Mediante los siguientes diagramas se muestra el flujo del programa, el cual deberá ser utilizado como herramienta para la elaboración del software del nodo. El *Diagrama 1*, muestra de manera general el flujo del programa a seguir. El programa comenzará a realizar la función “setup” y terminará en la función “GetTemperatureSensorData”.

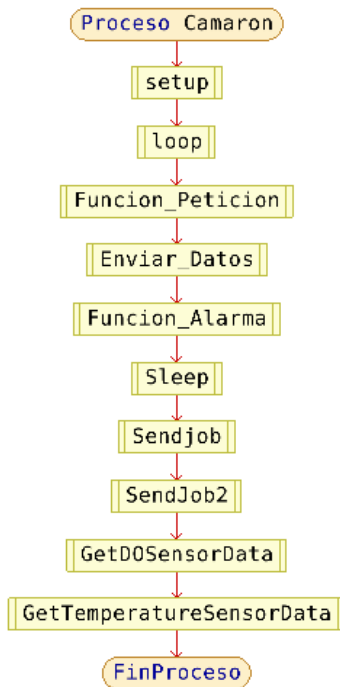


Diagrama 1 - Flujo de programa con confirmación.

Viendo el flujo general mostrado en el *Diagrama 1* se procederá a revisar el flujo seguido por cada una de las funciones.

3.4.8.1.1 Función setup

En el *Diagrama 2* se puede observar el flujo de la función setup, en la cual se deben programar las instrucciones necesarias para el uso de LoRaWAN, se configura el nombre del nodo, y las llaves, las cuales deben coincidir con las registradas en la network server/application server, de lo contrario el enlace no se logrará, se realizan las configuraciones necesarias para el uso de un reloj de tiempo real (RTC) y limpiar las alarmas pendientes de dicho reloj.

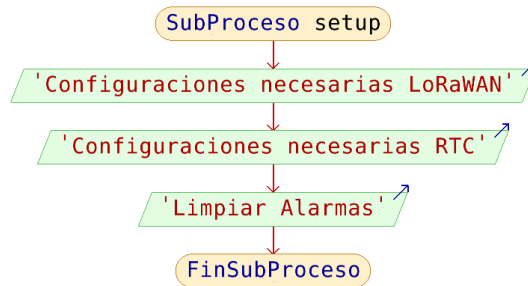


Diagrama 2 - Flujo de programa con confirmación - Función Setup

3.4.8.1.2 Función loop

En el *Diagrama 3* se puede observar el flujo de la función loop, en el cual se le asigna una bandera a cada estado para saber que ya fue realizada una acción y poder cambiar al siguiente estado. Básicamente la función loop es un manejador de una máquina de estados.

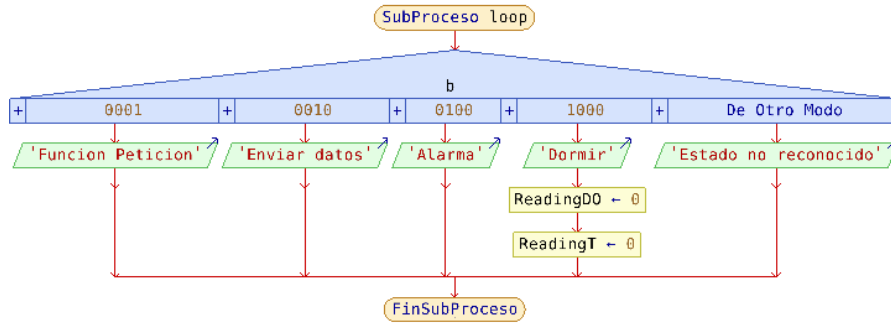


Diagrama 3 - Flujo de programa con confirmación - Función Loop

3.4.8.1.3 Función Petición

En el *Diagrama 4* se puede observar el flujo de la función Función Petición. Se envía un uplink llamado “GET_TIME” al gateway, el gateway responde con un downlink con la fecha y hora actual. Posteriormente se lee y almacena en variables dicha hora y fecha para a continuación utilizarlas para la configuración de hora del RTC y pasar al siguiente estado. Si no se recibe un downlink del gateway el programa se mantendrá en el mismo estado.

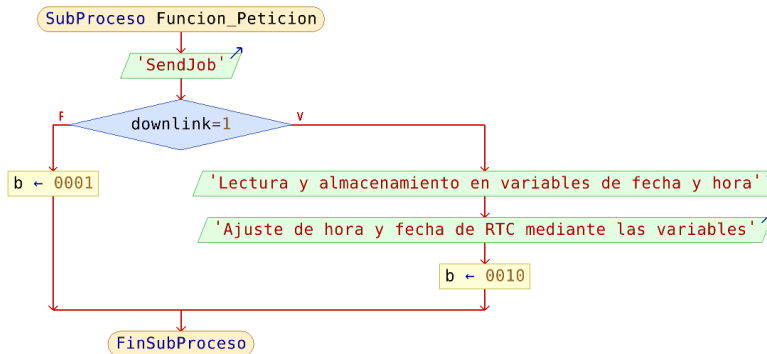


Diagrama 4- Flujo de programa con confirmación - Función Petición

3.4.8.1.4 Función Enviar Datos

En el *Diagrama 5* se puede observar el flujo de la función Enviar_Datos. Se da lectura al valor actual de los sensores y se envía un uplink de la concatenación de los datos de los sensores. El gateway responde con un “ACK”. Si el downlink llegó al nodo será confirmado. Si se ha realizado 24 veces el envío de datos el programa regresará a pedir la fecha y hora actual, sino el contador aumentará e irá al siguiente estado. Si el nodo no recibió un downlink del gateway se mantendrá en el mismo estado.

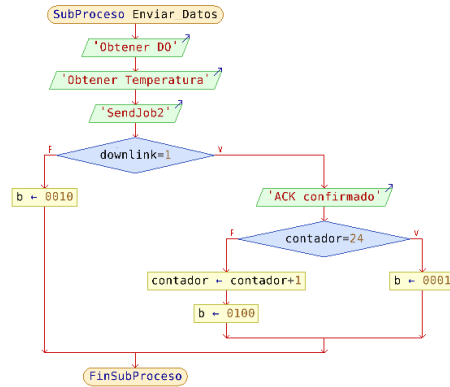


Diagrama 5 - Flujo de programa con confirmación - Función Enviar Datos

3.4.8.1.5 Función Alarma

En el *Diagrama 6* se puede observar el flujo de la función *Funcion_Alarma*. En este flujo se requiere dormir los sensores, así como leer la hora y minuto actual del RTC. Además, para evitar el minuto 60 y hora 24 se requieren dos condiciones. Si el minuto es mayor a 50 y la hora las 23:00, la siguiente alarma será asignada a las 00:00, si no son las 23:00 entonces la siguiente alarma será programada a la siguiente hora actual, si el minuto es menor a 50 entonces la siguiente alarma será programada 5 minutos después. Por último, se habilita la interrupción externa del RTC para continuar al siguiente estado.

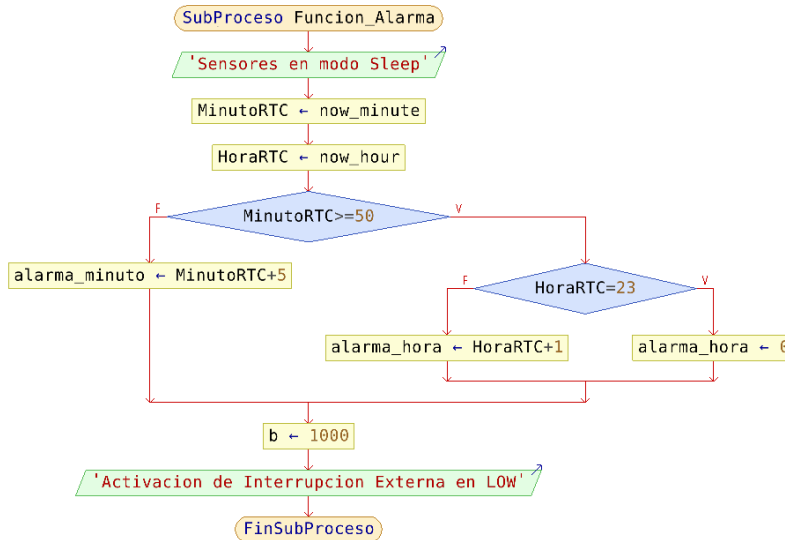


Diagrama 6- Flujo de programa con confirmación - Función Alarma

3.4.8.1.6 Función Sleep

En el *Diagrama 7* se puede observar el flujo de la función *Sleep*. El flujo muestra que el

microcontrolador ha de ser programado en modo sleep y será despertado únicamente con la interrupción externa del RTC. Se desactivan las banderas de promedio de los sensores para posteriormente regresar a la función “Enviar_Datos”.

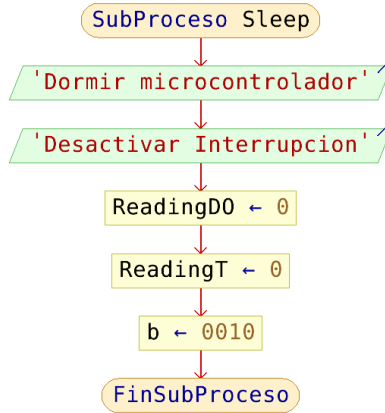


Diagrama 7- Flujo de programa con confirmación - Funcion Sleep

3.4.8.1.7 Funciones sendjob

En el *Diagrama 8* se pueden observar los flujos de las funciones sendjob, los cuales permiten el envío de datos a través de LoRa al gateway. La función sendjob únicamente manda un string “GET_TIME”, mientras que la función sendjob2 obtiene los datos de los sensores, los almacena en una variable y los transmite.

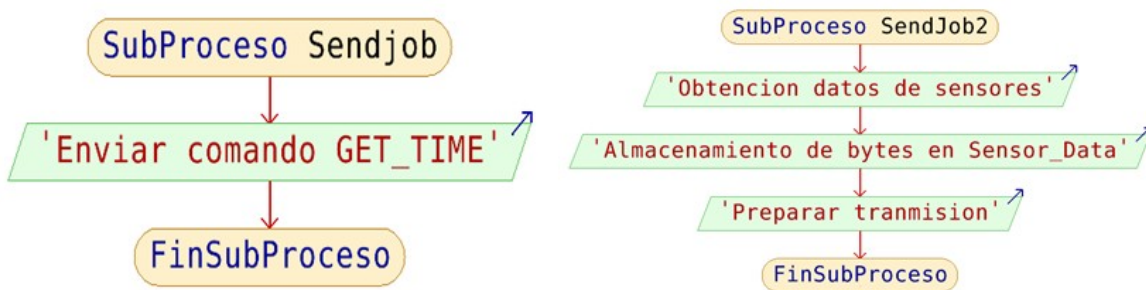


Diagrama 8- Flujo de programa con confirmación - Funciones Sendjob y sendjob2

3.4.8.1.8 Funciones GetSensorData

Por último, en el *Diagrama 9* se muestra el flujo de las funciones GetTemperatureSensorData y GetDOSensorData. En los dos flujos si la bandera es falsa entrará a un ciclo for por cinco veces donde dará lectura a los sensores y los almacenará y sumará en una variable. Posteriormente se realiza el promedio de las lecturas y se activa

la bandera. Las funciones regresan una función flotante utilizada a lo largo del flujo general para la lectura actual del valor de los sensores.

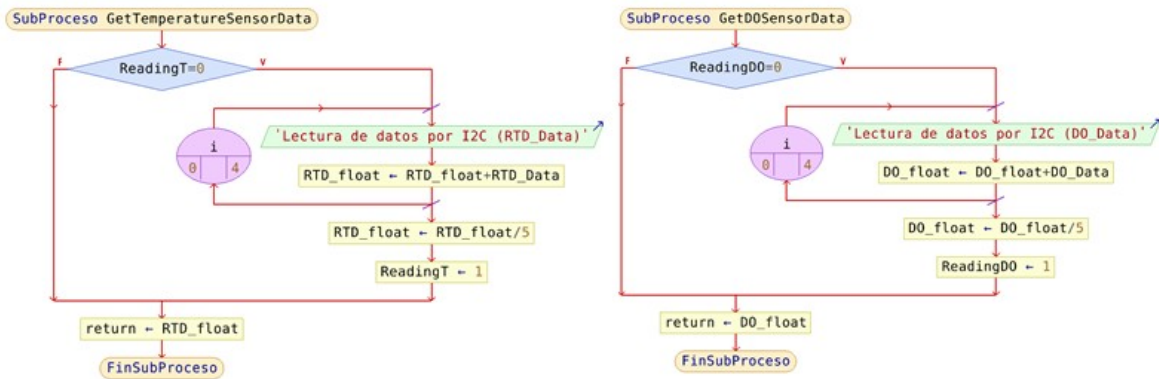


Diagrama 9 - Flujo de programa con confirmación - Funciones GetTemperatureSensorData y GetSensorData.

3.4.8.2 Flujo del programa sin método de confirmación

Mediante los siguientes diagramas se muestra el flujo del programa, el cual deberá ser utilizado como herramienta para la elaboración del software del nodo. El Diagrama 10, muestra de manera general el flujo del programa a seguir. El programa comenzará a realizar la función “setup” y terminará en la función “GetTemperatureSensorData”.

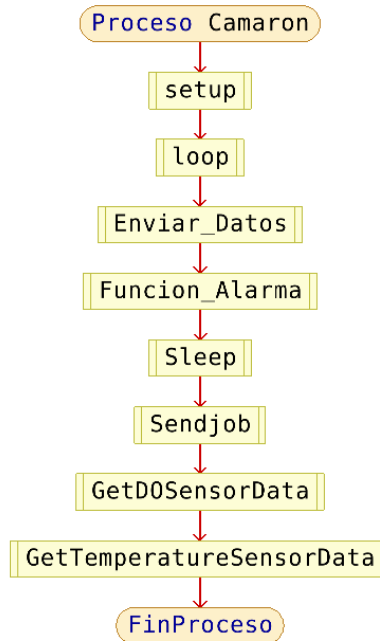


Diagrama 10 - Flujo general del programa sin método de confirmación

3.4.8.2.1 Función setup

En el *Diagrama 11* se puede observar el flujo de la función setup, en la cual se deben programar las instrucciones necesarias para el uso de LoRaWAN, así como de las configuraciones necesarias para el uso de un reloj de tiempo real (RTC) y limpiar las alarmas pendientes de dicho reloj. Además, se configura la hora y fecha actual al RTC.

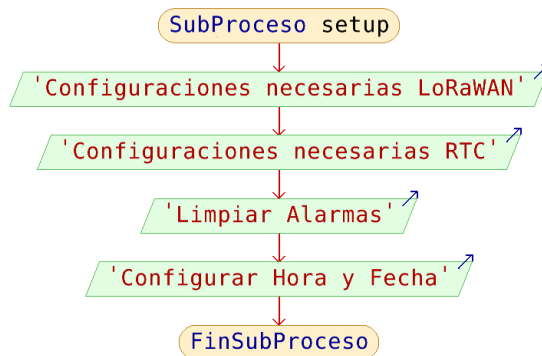


Diagrama 11 - Flujo general del programa sin confirmación - Función Setup

3.4.8.2.2 Función loop

En el *Diagrama 12* se puede observar el flujo de la función loop, en el cual se le asigna una bandera a cada estado para saber que ya fue realizada una acción y poder cambiar al

siguiente estado.

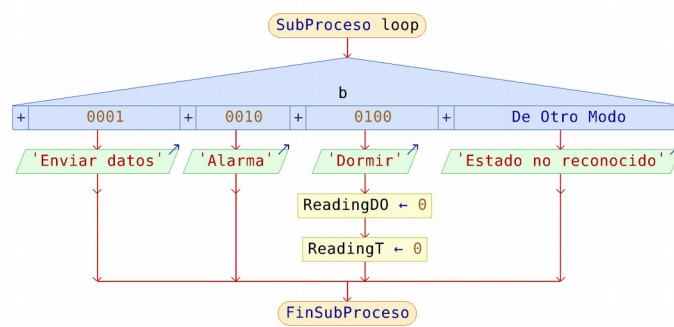


Diagrama 12- Flujo general del programa sin confirmación - Función loop

3.4.8.2.3 Función Enviar Datos

En el *Diagrama 13* se puede observar el flujo de la función Enviar_Datos. Se da lectura al valor actual de los sensores y se envía un dato de la concatenación de los datos de los sensores, para posteriormente continuar al siguiente estado.

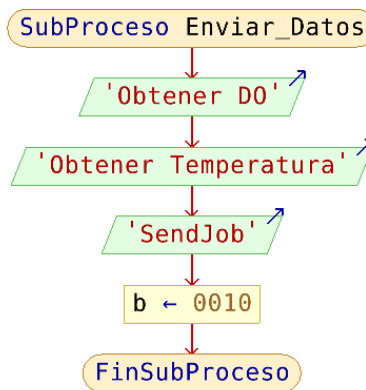


Diagrama 13 - Flujo general del programa sin confirmación - Función Enviar Datos

3.4.8.2.4 Función Alarma

En el *Diagrama 14* se puede observar el flujo de la función Funcion_Alarma. En este flujo se requiere dormir los sensores, así como leer la hora y minuto actual del RTC. Además, para evitar el minuto 60 y hora 24 se requieren dos condiciones. Si el minuto es mayor a 50 y la hora las 23:00, la siguiente alarma será asignada a las 00:00, si no son las 23:00 entonces la siguiente alarma será programada a la siguiente hora actual, si el minuto es menor a 50 entonces la siguiente alarma será programada 5 minutos después. Por último, se habilita la interrupción externa del RTC para continuar al siguiente estado.

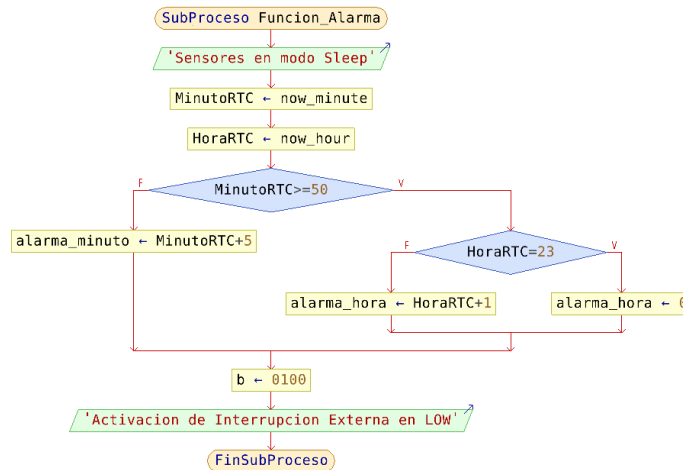


Diagrama 14 - Flujo general del programa sin confirmación - Función alarma

3.4.8.2.5 Función Sleep

En el *Diagrama 15* se puede observar el flujo de la función Sleep. El flujo muestra que el microcontrolador ha de ser programado en modo sleep y será despertado únicamente con la interrupción externa del RTC. Se desactivan las banderas de promedio de los sensores para posteriormente regresar a la función “Enviar_Datos”.

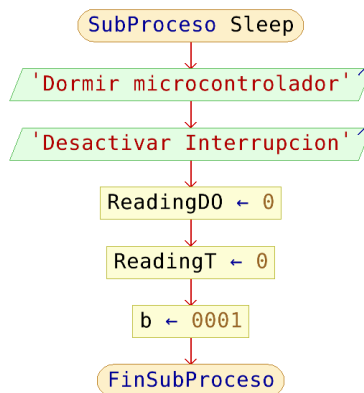


Diagrama 15 - Flujo general del programa sin confirmación - Función sleep

3.4.8.2.6 Función Sendjob

En el *Diagrama 16* se puede observar el flujo de la función Sendjob, el cual permite el envío de uplinks al gateway. La función Sendjob obtiene los datos de los sensores, los almacena en una variable y los transmite.

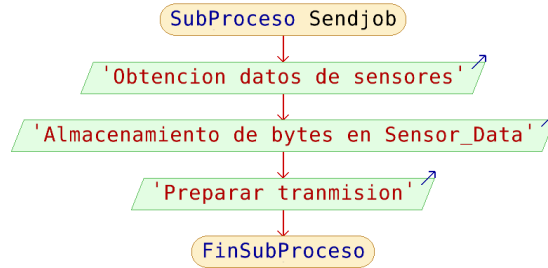


Diagrama 16 - Flujo general del programa sin confirmación - - Función sendjob

3.4.8.2.7 Funciones GetSensorData

Por último, en el *Diagrama 17* se muestra el flujo de las funciones GetTemperatureSensorData y GetDOSensorData. En los dos flujos si la bandera es falsa entrará a un ciclo for por cinco veces donde dará lectura a los sensores y los almacenará y sumará en una variable. Posteriormente se realiza el promedio de las lecturas y se activa la bandera. Las funciones regresan una función flotante utilizada a lo largo del flujo general para la lectura actual del valor de los sensores.

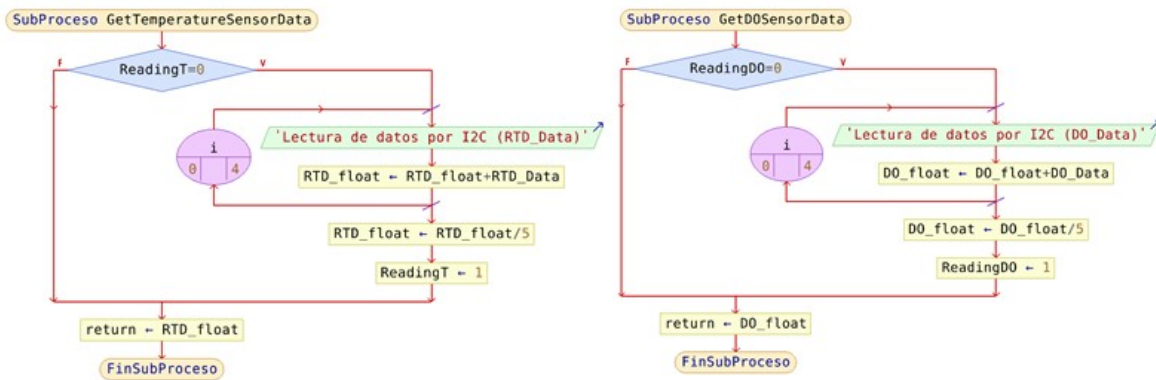


Diagrama 17- Flujo general del programa sin confirmación -GetSensorData

3.4.9 Medición de Consumo Energético

La medición del consumo energético permitirá establecer el criterio para las especificaciones que el sistema fotovoltaico necesitará para mantener una fuente de alimentación estable en el nodo de monitoreo. El current ranger nos permite obtener tal medición, para esto, se realizó la siguiente conexión

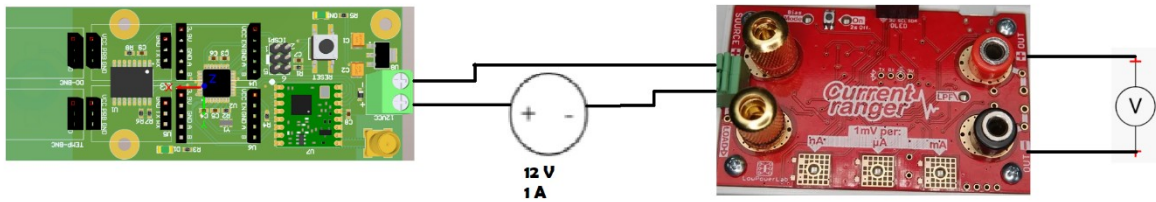


Figura 3. 35 Diagrama de conexión del nodo de monitoreo con el current ranger para la determinación de consumo energético.

El circuito ejecuta las instrucciones descritas en software embebido, mientras se mide la corriente consumida por el circuito, la cual se muestra de forma equivalente en el voltímetro, el cual mostro una corriente de consumo máxima de 168mA antes de entrar en modo sleep.

3.4.10 Sistema de Alimentacion del nodo de monitoreo

El consumo energético del Nodo medido fue de $A_N = 168\text{mA}$. Si se establece un voltaje de salida deseado a la salida del controlador de carga solar de $V_G = 12\text{V}$. Entonces la potencia del Nodo estará dada por:

$$P_N = (V_N)(I_N) = (12\text{V})(168\text{mA}) = 2.016\text{W}$$

El Nodo está configurado para enviar datos y después dormir por 10 minutos, donde solamente consume 49.9 mA. Sin embargo, los cálculos deben ser analizados en el caso de que el Nodo esté prendido un día completo. Por lo tanto, el consumo diario del nodo estará dado por:

$$Wh_N = (P_N)(h) = (2.016\text{W})(24\text{h}) = 48.384\text{Wh}$$

A partir de ello, el requerimiento de capacidad de la batería deberá ser de:

$$Ah_N = \frac{W_N}{V_N} = \frac{48.384\text{Wh}}{12\text{V}} = 4.032\text{Ah}$$

Por lo que una batería de 12v a 4.032 Ah nos dará un tiempo de:

$$\text{Horas} = \frac{(12\text{ v})(4.032\text{ Ah})}{2.016\text{ W}} = \frac{48.384\text{ Wh}}{2.016\text{ W}} = 24\text{ horas}$$

si agregamos un factor de seguridad $FS = 1.6$, a lo anteriormente calculado, tenemos que:

$$Wh_N = (48.384\text{ Wh})(1.6) = 77.41\text{ Wh}$$

$$Ah_N = (4.032\text{ Ah})(1.6) = 6.45\text{ Ah}$$

Con el factor de seguridad tenemos que la carga de la batería nos durará un estimado de:

$$\text{Horas} = \frac{(12\text{ v})(6.45\text{ Ah})}{2.016\text{ W}} = \frac{77.4\text{ Wh}}{2.016\text{ W}} = 38\text{ horas}$$

Para elegir una celda solar que satisfaga la potencia deseada, sabiendo que $HSE = 6$ horas y el consumo diario es de $Wh_N = 120,96\text{Wh}$. Entonces la potencia de la celda solar deberá ser de:

$$P_{CS_N} = \frac{Wh_N}{\text{Eficiencia C.C}} = \frac{77.41\text{ Wh}}{0.8} = 96.76\text{ Wh}$$

$$P_{CS_N} = \frac{Wh_N}{HSE} = \frac{96.76\text{ Wh}}{6\text{ h}} = 16.127\text{ W}$$

3.4.11 Componentes seleccionados para el sistema de alimentación

3.4.11.1 Panel Solar



Figura 3. 36 Panel solar seleccionado para el nodo de monitoreo

Debido a disponibilidad comercial se eligió una celda solar de 25W. Se eligió una celda solar con las siguientes características:

- Potencia máxima: 25W
- Voltaje máximo: 17,8V
- Corriente máxima: 1,41A
- Voltaje en circuito abierto: 22,4V
- Corriente en corto circuito: 1,47 A

3.4.11.2 Controlador de carga



Figura 3. 37 Controlador de carga seleccionado para el nodo de monitoreo.

El controlador de cargar solar seleccionado fue el controlador con las siguientes características:

- Voltaje Batería: 12/24V
- Corriente Carga/Descarga:
- 20A Entrada solar máxima: < 50V
- Carga flotante: 13,7V (ajustable)
- Parada de descarga: 10,7A (ajustable)
- Reconexión de descarga: 12,6V

- Consumo del controlador: < 10mA
- Eficiencia:>80%

3.4.11.3 Batería



Figura 3. 38 Batería seleccionada para el nodo de monitoreo.

La batería utilizada es una batería Steren BR-1207 de 12V y 7Ah, la cual cumple con el factor de seguridad calculado. Haciendo el cálculo de la duración de la batería tenemos que:

$$h_{BAT} = \frac{Ah_N}{Ah_{calculado}} = \frac{(12\text{ v})(7\text{ Ah})}{2.016\text{ W}} = \frac{84\text{ Wh}}{2.016\text{ W}} = 41.6\text{ horas}$$

3.4.11.4 Diagrama de Conexión del sistema de alimentación.

La celda solar debe ser conectada a la entrada del controlador de carga de 20 A. El controlador de carga permitirá regular el voltaje proveniente de la celda solar, además cargará la batería y proporcionará un voltaje de salida estable necesario para la alimentación del nodo. Para ello, es necesario realizar la conexión mostrada en la figura 3.32.

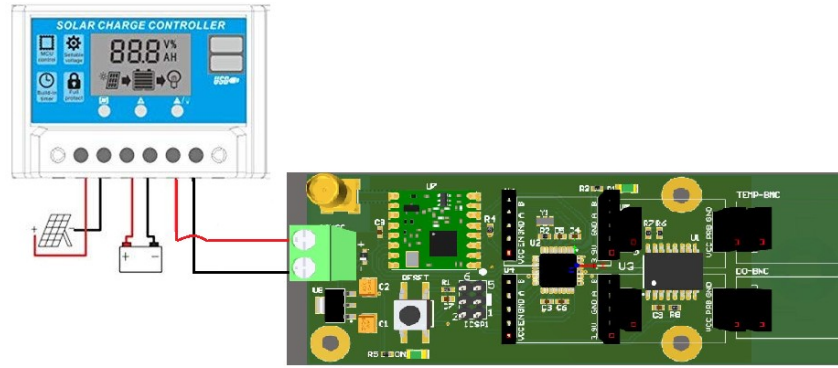


Figura 3. 39 Diagrama de conexión del sistema de alimentación y el PCB del nodo de monitoreo.

Los elementos electrónicos fueron ensamblados dentro de un contenedor especial para exteriores, ya que cuenta con un grado de protección IP67, el cual no permite entrada de polvo bajo ninguna circunstancia, ni agua, mientras este no se encuentre sumergido en el agua. La figura 3.33 muestra el resultado del ensamble final del nodo de monitoreo.

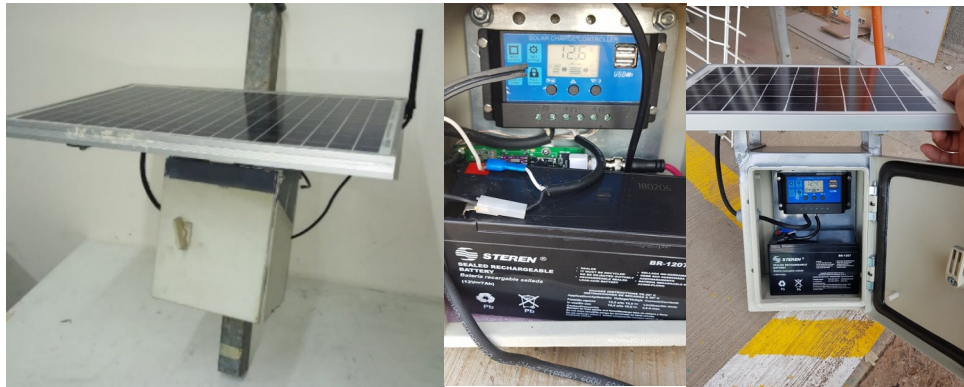


Figura 3. 40 Ensamble final del nodo de monitoreo.

3.5 Implementación del sistema

La implementación se realizó en dos granjas acuícolas, una ubicada en el municipio de San Jerónimo en el estado de Zacatecas, en donde están orientados a la producción de tilapia, la granja de San Jerónimo sirvió como un laboratorio en donde pulimos algunos aspectos de desarrollo, esto nos proporcionó la seguridad para su posterior implementación final

en la granja acuícola Maria Esperanza ubicada en localidad de Eldorado, Sinaloa.



Figura 3. 41 Granja Acuícola de San Jerónimo

Las granjas acuícolas de la cooperativa Maria Esperanza cuentan con 11 estanques dedicados a la cosecha de camarón repartidos en alrededor de 1 hectárea. Las pruebas de funcionamiento se llevarán a cabo solo en un estanque de la elección del acuicultor.



Figura 3. 42 Granjas Acuicolas en Eldorado, Sinaloa

3.5.1 Instalación en San Jerónimo

El Gateway se instaló en la zona industrial en Guadalupe, zacatecas, se colocó una antena de 12db de ganancia a una altura de 17 metros a nivel del suelo (2242 metros sobre el nivel del mar). La granja acuícola de San Gerónimo está a unos 10 km aproximadamente con respecto al Gateway, lo que nos permitirá además corroborar el alcance de la red LoRaWAN. Se implementó una torre de comunicación con un Gateway LoRaWAN en la

Zona Industrial de Guadalupe, Zacatecas con una antena de frecuencia 915 MHz y 12db de ganancia a una altura de 17 metros del nivel del suelo (2242 metros sobre el nivel del mar).



Figura 3. 43 Instalación del sistema de monitoreo en la granja de san jerónimo.

Como se mencionó anteriormente, la implementación en San Jerónimo nos permitió desarrollar algunas pruebas preliminares antes de su implementación final en Eldorado, Sinaloa. Las pruebas realizadas en la granja se presentan a continuación.

3.5.2 Pruebas preliminares

La primera prueba preliminar consiste en verificar que el gateway se encuentre conectado a la network server y a la red LoRaWAN, para ello se hace uso de un puerto SSH en donde se puede visualizar el estado del gateway, como resultado podemos visualizar el estado de las comunicaciones del gateway, conectándose sin problemas a la network server.

Como se explicó en “Software Embebido”, se desarrollaron dos programas diferentes, uno con confirmación de recepción y el otro sin confirmación. Esta prueba nos permitirá definir que software es el más adecuado para el funcionamiento del nodo en su implementación final. Para ello se programaron los dos softwares embebidos enviando 100 datos desde la granja y observando el comportamiento del nodo de monitoreo.

El programa con método de confirmación presento algunos problemas, esto debido a que la ventana de recepción del nodo de monitoreo se cerraba antes de recibir la confirmación de recepción del Gateway, a pesar de que de 100 mensajes enviados no se registraron pérdidas, debido al comportamiento del programa el sistema se mantenía encendido por más tiempo, esperando la confirmación, esto afecta en el ahorro de energía.

El flujo del programa sin método de confirmación presento un mejor comportamiento, al igual que con el método de confirmación, él envió de datos no supuso un problema, de 100 datos enviados no se registraron pérdidas, debido al comportamiento del programa, el nodo envía la información y se duerme de inmediato, ahorrando energía. **Es por esta razón que se eligió al software sin confirmación de recepción como el indicado para la implementación del sistema.** Los datos de oxígeno fueron transmitidos a una distancia lineal de **8.11km cada 10 minutos sin pérdida de información por lo que el enlace a esa distancia fue exitoso. Por lo que la red LoRaWan se presentó estable a esa distancia.**

Por último, realizaron diversas pruebas con dos sensores comerciales (YSI Pro 20 y Hanna HI98193) donde se registraron datos de oxígeno y temperatura para observar el comportamiento de un estanque de San Jerónimo. La granja acuícola de San Jerónimo como parte de sus procesos de monitoreo de calidad del agua, registra en un formato específico, parámetros de temperatura, oxígeno disuelto y porcentaje de saturación, este proceso se repite 5 veces al día.

| Registro de Parámetros Físico-Químicos del agua | | | | | | |
|---|-------|--|--------------------|--------------|------------------|-------------|
| No. de estanque: P1 | | Especie: Tilapia nilótica (<i>Oreochromis niloticus</i>) | | | Mes: Abril | |
| Fecha | Hora | Temp. °C | Oxígeno Disuelto % | Saturación % | Observaciones | Responsable |
| 31-mar | 03:00 | 23.2 | 2.62 | 70.8 | | |
| | 07:00 | 24.0 | 2.20 | 66.9 | | |
| | 12:00 | 25.5 | 3.26 | 87.7 | | |
| | 17:00 | 26.2 | 4.05 | 99.2 | | |
| | 22:00 | 25.2 | 1.85 | 49.2 | | |
| 01-abr | 03:00 | 24.2 | 2.61 | 70.0 | | |
| | 07:00 | 22.9 | 2.76 | 73.2 | | |
| | 12:00 | 24.7 | 3.49 | 83.3 | Soleado | JOSE |
| | 17:00 | 26.1 | 3.07 | 78.3 | // | |
| | 22:00 | 25.9 | 3.50 | 87.1 | // | |
| 02-abr | 03:00 | 24.3 | 4.67 | 82.1 | despejado viento | Sergio |
| | 07:00 | 23.3 | 4.40 | 83.6 | viento despejado | Sergio |
| | 12:00 | 24.0 | 3.62 | 83.0 | despejado | Sergio |
| | 17:00 | 25.8 | 3.99 | 82.4 | Soleado | JOSE |
| | 22:00 | 25.3 | 3.51 | 84.1 | // | |
| 03-abr | 03:00 | 24.5 | 4.67 | 82.0 | despejado viento | Sergio |
| | 07:00 | 23.8 | 4.00 | 82.8 | despejado | Sergio |
| | 12:00 | | | | despejado | Sergio |
| | 17:00 | | | | | |
| | 22:00 | | | | | |
| 04-abr | 03:00 | | | | | |
| | 07:00 | | | | | |
| | 12:00 | | | | | |
| | 17:00 | | | | | |
| | 03:00 | | | | | |

Figura 3. 44 Formato de registro de parámetros Físico-Químicos del Agua.

Gracias a este registro podemos comparar los datos medidos por estos dos sensores con los del nodo de monitoreo. Esta prueba nos permite corroborar que las sondas de temperatura y oxígeno disuelto están midiendo correctamente, lo que nos proporciona seguridad a la hora de su implementación final en el estado de Sinaloa.

3.6 Implementación Final en Eldorado, Sinaloa

El nodo de monitoreo se colocó en un estanque de la elección del acuicultor, a aproximadamente la mitad del estanque sobre un soporte, se orientó el dispositivo, de tal forma que se aprovechara al máximo la radiación solar, los sensores de temperatura y oxígeno disuelto se colocaron en contacto con el agua, estos siempre se encuentran sumergidos y solo serán extraídos cuando sea necesario su mantenimiento, posteriormente se procedió a encender el nodo de monitoreo para la ejecución de las tareas programadas.



Figura 3. 45 Poste Colocado para la instalación del sistema.

El Gateway se colocó en un poste con la altura suficiente para recibir información de los estanques y orientado de tal forma que pueda recibir la mayor cantidad de radiación solar durante el día para la carga de la batería. El Gateway se colocó en una zona cercana a las instalaciones del personal de vigilancia, a una altura de unos 10 metros, esta altura es suficiente, ya que no hay ningún edificio u obstáculo que pueda afectar a la señal además del puesto de vigilancia, es decir, toda el área se encuentra bajo línea de vista para el Gateway.



Figura 3. 46 implementación del Sistema de Monitoreo en Eldorado, Sinaloa

La distancia de separación entre el Gateway y el nodo de monitoreo es de aproximadamente 30 metros, por lo que no debe suponer algún problema la distancia para la red LoRa. Para comprobar el funcionamiento del sistema se realizaron algunas pruebas.

3.7 Pruebas de Funcionamiento

3.7.1 Prueba de Mediciones Físicoquímicas

Esta prueba consiste en registrar mediciones con los dispositivos de medición manual, más específicamente con un oxímetro de la marca YSI y Hanna Instruments, una persona se encargó de registrar las mediciones a diferentes horas del día (3hrs,7hrs,12hrs,17hrs, y 22hrs), para posteriormente compararlos con los del sistema implementado y verificar que se están midiendo datos similares a los reales. Esta prueba se realizó previo a la instalación del dispositivo en los estanques de camarón, en un invernadero con estanques de cosecha de tilapia, esto debido a la disponibilidad y cercanía del invernadero.

3.7.2 Prueba de Monitoreo Continuo

Esta prueba consiste en verificar que las mediciones se realicen cada 10 minutos como fue especificado en los requerimientos y en el software embebido.

3.7.3 Prueba de Conexión a internet

Para esta prueba se debe confirmar que el gateway está conectado a la Network Server, para ello, la Network server envía un ping al Gateway cada 30 segundos, mediante una terminal es posible visualizar un mensaje "gwalive", este mensaje indica que el gateway está conectado a la network server. Por lo que esta prueba consiste en esperar este mensaje a la hora de su implementación.

3.7.4 Pruebas de Cobertura de la Zona de Cosecha

Esta prueba se realizó desde la base de operaciones de la empresa, ubicada en la comunidad de Eldorado, Culiacán, Sinaloa a una distancia cercana a los 10 Km, el objetivo es enviar un dato desde las oficinas hasta la zona de cosecha en donde se encuentra el nodo Gateway y posteriormente revisar si dicho dato fue re direccionado a la network

server.

El círculo representa el área de cobertura de LoRa de aproximadamente 10 Km, podemos observar que la oficina se encuentra dentro del área, por lo que teóricamente la información debería llegar al Gateway.



Figura 3. 47 Ubicación ente el nodo Gateway y las oficinas de operación.

3.7.5 Pruebas de Suministro Energético

El suministro de energía está planeado para que los equipos no se apaguen en ningún momento, esto puede visualizarse mediante la plataforma de IoT ResloT, el Gateway cada minuto envía un mensaje "Gateway alive" vía red celular a la plataforma en la nube, esto significa que el dispositivo esta encendido, si el nodo Gateway recibe información continuamente significa que el nodo de monitoreo también esta encendido, esta prueba consiste en estar al tanto de que el sistema este continuamente conectado, esto se podrá visualizar en los "dashboards" de ResloT. Con esto también podremos visualizar la estabilidad de la conexión de internet por medio de la red celular en la zona.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Resultado de la prueba de mediciones fisicoquímicas

Los resultados se muestran en la siguiente gráfica, en azul se muestra el sistema desarrollado, en amarillo las lecturas realizadas con el sensor de la marca YSI, y por último en gris, se muestran los registros realizados por el sensor Hanna Instruments. Si bien las lecturas no son idénticas, se aprecia una precisión en las medidas entre los 3 sensores utilizados, lo que nos indica que el sistema propuesto está haciendo lecturas aproximadas a los valores fisicoquímicos reales.

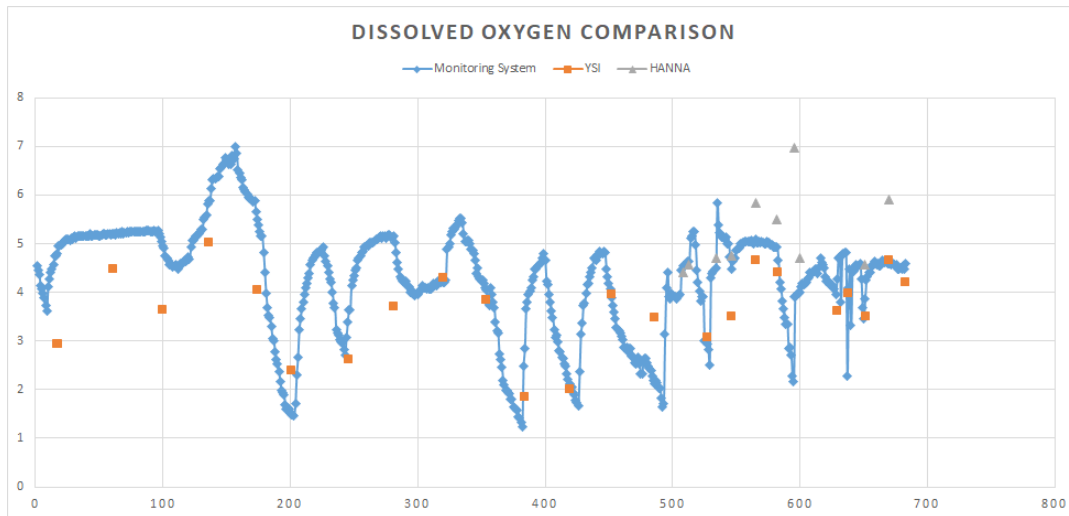


Figura 4. 1 Comparativa entre sensores, Hanna instruments (gris), YSI (Naranja) y el sistema propuesto (azul).

Posteriormente, mediciones fueron realizadas en el estanque acuícola de cosecha de camarón, con similares resultados entre el sensor de los acuicultores y el sistema propuesto. La diferencia entre los datos medidos en el sensor de temperatura es de 0.5 °C y el de oxígeno disuelto es de 0.5 mg/l por arriba del propuesto.



Figura 4. 2 Comparación de los datos de oxígeno disuelto entre el oxímetro y el nodo de monitoreo.

4.2 Resultado de las pruebas de monitoreo continuo y conexión a Internet

La plataforma permite visualizar los datos de oxígeno disuelto y temperatura con una

frecuencia de 10 minutos entre lectura, de esta forma el acuicultor puede estar al tanto de sus estanques. En la figura 3.46 se puede apreciar el dashboard de la temperatura, así como la fecha y hora cuando se recibió el dato.

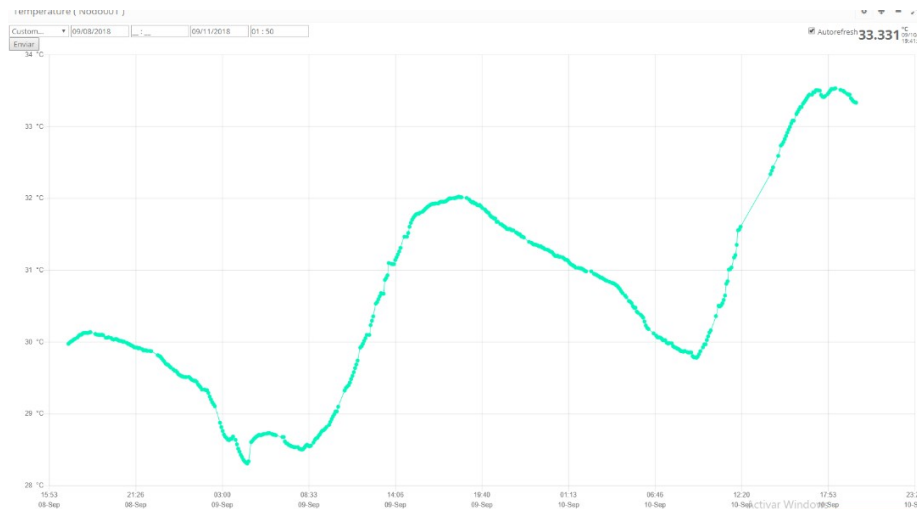


Figura 4. 3 Dashboard de Temperatura



Figura 4. 4 Dashboard para el oxígeno disuelto.

En la siguiente imagen se puede apreciar el resultado de 8 días de monitoreo en el estanque acuicola, la informacion puede ser descargada en formato de hoja de datos CSV, sin embargo al ser una version de prueba, los servidores de la Network server solo permiten guardar un maximo 5 dias, por lo que, de forma que no se pierda información, los datos tienen que ser exportados cada 5 dias.

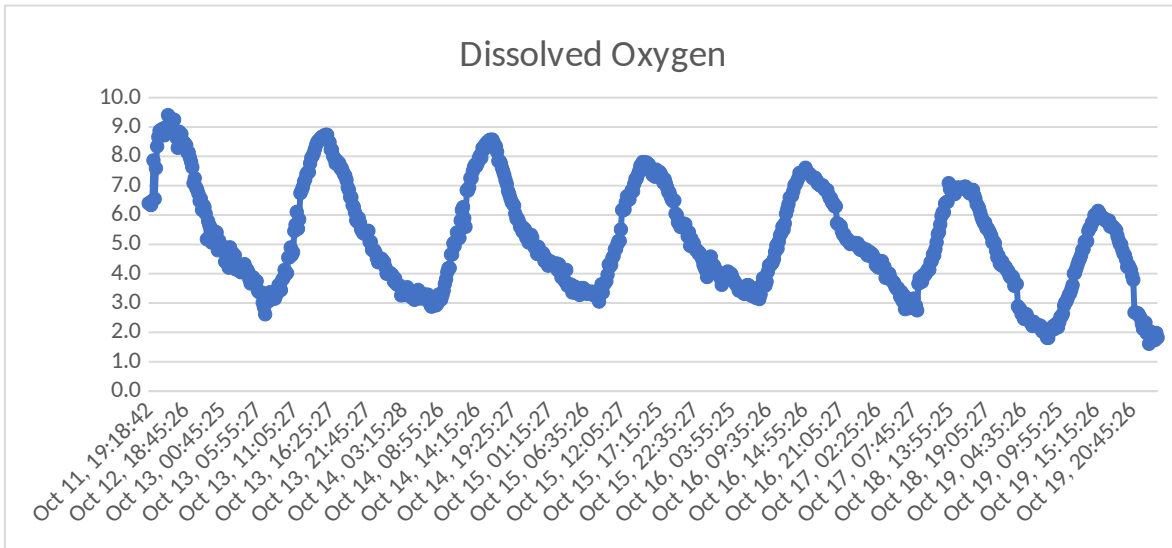


Figura 4. 5 Resultado de 8 días de monitoreo de oxígeno disuelto.

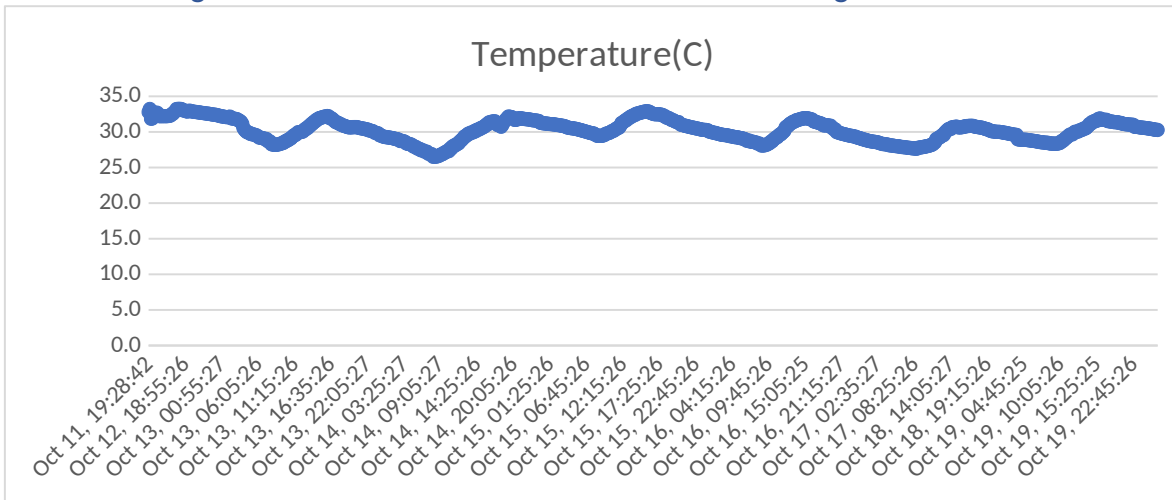


Figura 4. 6 Resultado de 8 días de monitoreo de Temperatura

4.3 Resultado de Pruebas de Cobertura de la Zona de Cosecha

El resultado de la prueba de alcance fue positivo, se enviaron datos desde las oficinas centrales hasta la zona de cosecha, la información se visualizó satisfactoriamente en la plataforma, lo que confirma que la red LoRaWAN cubre la zona de cosecha.

```
sceneglobaldebug AppEUI: 70B3D50000000000
sceneglobaldebug DevEUI: 0402030104020301
sceneglobaldebug Payload: 508000021ac601c07f
sceneglobaldebug [80 128 0 2 26 198 1 192 127]
nodevaluechanged AppEUI -> 70B3D50000000000 :: DevEUI: 0402030104020301 :: Temperatura -> 20.608
```

Figura 4. 7 Dato recibido desde las oficinas de operación, ubicadas a unos 10 km de distancia

4.4 Problemas detectados en las pruebas

Sin embargo, la conexión de la red celular ha presentado problemas, aunque pocas veces, existen desconexiones de la red, la desconexión más larga ha sido de 2 horas, sin embargo, estas desconexiones no pasan regularmente. Esto puede observarse a través de la Network Server/Application Server en la figura 3.51, en donde se aprecia que después del último dato registrado pasaron aproximadamente dos horas hasta el nuevo dato. Se confirma que el Gateway se desconecta cuando en la terminal no se aprecia el mensaje de “gateway_alive” que es enviado cada 30 segundo.

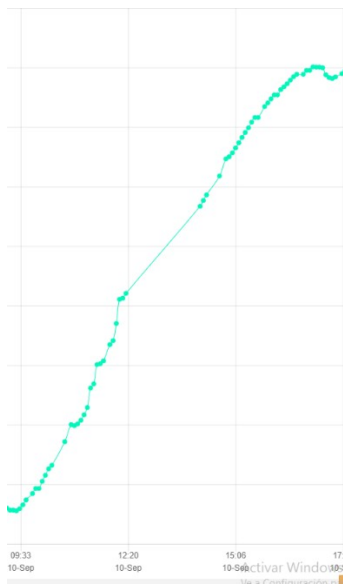


Figura 4. 8 Desconexión del Gateway

Sin embargo, cuando la señal celular se restablece, el Gateway se vuelve a conectar automáticamente para realizar sus funciones. Analizando, esto no supone un problema mayor, ya que, si se compara con el actual método de monitoreo, en donde la personal toma medidas de los estanques manualmente tres veces por día, podría decirse que

nuestro sistema mantiene un monitoreo continuo del estanque, y el acuicultor podrá realizar acciones preventivas.

En los gráficos de las figuras 3.48 y 3.49 se puede apreciar como a pesar de que la temperatura mantuvo un rango constante, el oxígeno disuelto presento algunas variaciones, esto se debe a que en acuicultura semi intensiva existe una gran cantidad de residuos en el agua, ocasionando que rápidamente se genere una capa de lama en el sensor de oxígeno disuelto, por ello es necesario dar labor de mantenimiento por lo menos cada semana para remover la lama de la membrana.

Capítulo 5

Conclusiones

En el presente documento, se describe el diseño e implementación de un sistema de monitoreo autónomo inalámbrico basado en enlaces LPWAN para IoT. La implementación permite a los acuicultores observar la información desde sus dispositivos móviles, así como por sus computadoras, de esta forma pueden ver el estado actual de su estanque, el sistema utiliza el suministro de energía renovable mediante el uso de paneles solares y baterías recargables, el sistema puede ser aplicado en sistemas de acuicultura, en donde sea de gran importancia mantener un monitoreo continuo de oxígeno disuelto y temperatura. La implementación del sistema nos permitió visualizar el gran potencial de desarrollo posible en el área de la acuicultura, las pruebas de alcance nos permitieron conocer que es posible realizar un enlace desde las oficinas de operación, en donde el Gateway podrá contar con un internet estable e incluso podríamos colocar un servidor local para no depender solamente de la conexión a internet, la información podría ser recopilada también en el servidor local de forma de evitar pérdidas de información debido a las telecomunicaciones inestables, además, la inclusión de los servicios de AWS nos abrirán una brecha tecnológica que podemos aplicar en el sistema, como puede ser el caso de realidad aumentada, inteligencia artificial, control automático, análisis de datos, entre otras más, sin duda existe un gran campo de mejora para el sistema propuesto.

Capítulo 5

Referencias Bibliográficas

- [1] FAO, "Acuicultura: principales conceptos y definiciones," Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2003. [Online]. Available: <http://www.fao.org/spanish/newsroom/focus/2003/aquaculture-defs.htm>. [Accessed: 10-Jun-2020].
- [2] FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "FAO Fisheries & Aquaculture - Visión general del sector acuícola nacional - Colombia." 2014.
- [3] P. Guzmán Amaya and D. F. Fuentes Castellanos, *Pesca, Acuicultura, e Investigación en México*, Primera Ed. 2006.
- [4] CEDRSSA, "La acuicultura," *Cent. Estud. para el Desarro. Rural y Sustentable y la Soberanía Aliment.*, pp. 1-16, 2015.
- [5] L. A. Acuicultura, M. Potencialidad, R. Y. Á. De, and R. R. Ad, "La Acuicultura Mexicana: Potencialidad, Retos Y Áreas De Oportunidad," *Rev. Mex. Agronegocios*, vol. 18, no. 35, pp. 1065-1071, 2014.
- [6] I. y C. A. Servicio Nacional de Sanidad, "Panorama acuícola de Sinaloa," 2019. [Online]. Available: https://dj.senasica.gob.mx/AtlasSanitario/storymaps/infotem_c/index.html. [Accessed: 14-Jun-2020].
- [7] G. De la Lanza, S. Hernández, and J. Carbajal, "Organismos Indicadores de la Calidad del Agua y de la Contaminación (Bioindicadores).," *Univ. Nac. Autónoma México*, p. 2000, 2000.
- [8] C. E. Boyd and C. S. (Craig S. . Tucker, *Pond aquaculture water quality management*. Kluwer Academic, 1998.
- [9] C. E. Boyd and F. Lichtkoppler, *Water Quality for Pond Aquaculture*. Auburn, Alabama, 1998.
- [10] L. D. Moreno-Figueroa, J. Naranjo-Páramo, A. Hernández-Llamas, M. Vargas-Mendieta, J. A.

- Hernández-Gurrola, and H. Villarreal-Colmenares, "Performance of a photo-heterotrophic, hypersaline system for intensive cultivation of white leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) with minimal water replacement in lined ponds using a stochastic approach," *Aquac. Res.*, vol. 49, no. 1, pp. 57–67, 2018.
- [11] J. M. J. Ruiz-Velazco, M. Estrada-Pérez, A. Hernández-Llamas, J. T. Nieto-Navarro, and E. Peña-Messina, "Stock model and multivariate analysis for prediction of semi-intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* as a function of water quality and management variables: A stochastic approach," *Aquac. Eng.*, vol. 56, pp. 34–41, 2013.
- [12] A. Estrada-Pérez, J. M. J. Ruiz-Velazco, A. Hernández-Llamas, I. Zavala-Leal, and L. Martínez-Cárdenas, "Deterministic and stochastic models for analysis of partial harvesting strategies and improvement of intensive commercial production of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*)," *Aquac. Eng.*, vol. 70, pp. 56–62, 2016.
- [13] P. Britz, "Sustainable Aquaculture: Global Perspectives," *African J. Aquat. Sci.*, vol. 29, no. 1, pp. 123–124, 2004.
- [14] *Aquaculture and the Environment - A Shared Destiny*. InTech.
- [15] R. W. Hardy, "Feed management in intensive aquaculture," *Aquaculture*, vol. 149, no. 1–2, pp. 163–164, 1997.
- [16] A. A. Rojas, J. A. Cabanillas, and M. C. Haws, *Buenas Prácticas de Manejo para el Cultivo de Camarón*. 2005.
- [17] R. A. Rodríguez, P. F. Osuna, and G. I. Lizarrága, *El fitoplancton en la Camaronicultura y Larvicultura Importancia de un buen Manejo*, no. June. Comité Estatal de Sanidad Acuícola de Sinaloa, 2014.
- [18] A. Calderer Reig, "EFECTOS DE LA TEMPERATURA Y LA SALINIDAD SOBRE EL CRECIMIENTO Y CONSUMO DE OXÍGENO DE LA DORADA (*Sparus aurata* L.)," *Dep. Biol. Anim.*, p. 64, 2001.
- [19] T. Wang, S. Lefevre, D. T. Thanh Huong, N. van Cong, and M. Bayley, "Chapter 8 The Effects of Hypoxia On Growth and Digestion," *Fish Physiol.*, vol. 27, no. C, pp. 361–396, 2009.
- [20] D. Li and S. Liu, "Water Quality Monitoring in Aquaculture," pp. 303–328, 2019.
- [21] C. E. Boyd, *Consideraciones sobre la calidad del agua y del suelo en cultivos de camarón*. Auburn University, Alabama 36849 USA, 2001.
- [22] R. R. Stickney, "Aquaculture: An Introductory Text," *N. Am. J. Aquac.*, vol. 74, no. 1, pp. 118–119, 2012.
- [23] S. Goddard, *Feed Management in Intensive Aquaculture*. Springer US, 1996.
- [24] L. Cárcamo-Arechiga, Nora; Hernández-López, Jorgr; Grijalva-Chon, Jose; Varela-Romero, Alejandro; López-Torres, Marco; Medina-Juárez and ., "Efecto de la temperatura sobre la actividad de los mecanismos del sistema inmune en *Litopenaeus*," *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 1, no. 5, pp. 151–164, 2014.

- [25] M. Briggs, S. Funge Smith, R. P. Subasinghe, and M. Phillips, "Introductions and movement of two penaeid shrimp species in Asia and the Pacific," Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.
- [26] B. Hazeltine and C. Bull, *Field Guide to Appropriate Technology*. Academic Press, 2003.
- [27] K. Vidalis and C. Nathanailides, "Environmental issues of Aquaculture development," *Egypt. J. Aquat. Biol. Fish.*, vol. 24, no. 2, pp. 441-450, 2020.
- [28] M. Saberioon, A. Gholizadeh, P. Cisar, A. Pautsina, and J. Urban, "Application of machine vision systems in aquaculture with emphasis on fish: state-of-the-art and key issues," *Rev. Aquac.*, vol. 9, no. 4, pp. 369-387, 2017.
- [29] Z. Zainuddin, R. Idris, and A. Azis, "Water Quality Monitoring System for Vannamae Shrimp Cultivation Based on Wireless Sensor Network In Taipa, Mappakasunggu District, Takalar," vol. 165, no. ICMEMe 2018, pp. 89-92, 2019.
- [30] Z. Shareef, "Design and wireless sensor Network Analysis of Water Quality Monitoring System for Aquaculture," 2019 3rd Int. Conf. Comput. Methodol. Commun., no. lccmc, pp. 405-408, 2019.
- [31] M. Botto-Tobar, J. Barzola-Monteses, E. Santos-Baquerizo, M. Espinoza-Andaluz, and W. Yáñez-Pazmiño, "Preface," *Communications in Computer and Information Science*, vol. 959, p. VI, 2019.
- [32] A. Y. Desarrollo and V. Referencias, "México Características , estructura y recursos del sector," 2005.
- [33] C. Borbón-morales and M. Arvizu Armenta, "Análisis de la productividad del camarón mexicano en acuicultura : comparación de los índices parcial y total de los factores y la mancha blanca como externalidad .," *Equilibrio Económico, Rev. Econ. Polit. y Soc.*, vol. 9, no. 1, pp. 99-125, 2013.
- [34] Ashton K., "That 'Internet of Things' Thing," *RFID J.*, p. 4986, 2009.
- [35] P. C. Mugauri, K. Aravind, A. Deshmukh, F. Vhansure, and B. R. Kavitha, "A survey on applications of internet of things in healthcare domain," *Res. J. Pharm. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 93-96, 2018.
- [36] T. Ojha, S. Misra, and N. S. Raghuwanshi, "Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 118. Elsevier B.V., pp. 66-84, 2015.
- [37] M. C. Vuran, A. Salam, R. Wong, and S. Irmak, "Internet of underground things in precision agriculture: Architecture and technology aspects," *Ad Hoc Networks*, vol. 81, pp. 160-173, 2018.
- [38] D. Li and S. Liu, *Wireless Sensor Networks in Water Quality Monitoring*. 2018.
- [39] N. T. K. Duy, T. T. Hieu, and L. H. D. Khanh, "A versatile, low power on monitoring and control system for shrimp farms based on NI myRIO and ZigBee network," in 4th IEEE Sponsored International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, ICCPEIC 2015, 2015, pp. 282-287.
- [40] S. Geetha and S. Gouthami, "Internet of things enabled real time water quality monitoring system," pp. 1-19, 2017.

- [41] B. Shi, V. Sreeram, D. Zhao, S. Duan, and J. Jiang, "A wireless sensor network-based monitoring system for freshwater fishpond aquaculture," *Biosyst. Eng.*, vol. 172, pp. 57–66, 2018.
- [42] K. R. S. R. Raju and G. H. K. Varma, "Knowledge based real time monitoring system for aquaculture Using IoT," in *Proceedings - 7th IEEE International Advanced Computing Conference, IACC 2017, 2017*, pp. 318–321.
- [43] L. Parra, S. Sendra, L. García, and J. Lloret, "Design and deployment of low-cost sensors for monitoring the water quality and fish behavior in aquaculture tanks during the feeding process," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 3, 2018.
- [44] F. Ponds, M. Data, V. I. A. Internet, and O. F. Things, "Development of embedded system for ph measurement in fish ponds and monitoring data via internet of things," vol. 8, no. May, pp. 247–259, 2018.
- [45] M. Kumar Jha, R. Kumari Sah, M. S. Rashmitha, R. Sinha, B. Sujatha, and K. V Suma, "Smart Water Monitoring System for Real-Time Water Quality and Usage Monitoring," in *Proceedings of the International Conference on Inventive Research in Computing Applications, ICIRCA 2018, 2018*, no. Icirca, pp. 617–621.
- [46] C. Lin, K. Yang, and C. Wei, "Aquaculture Monitoring System Based on Internet of Things by Mesh Wi-Fi Access," pp. 2–6, 2016.
- [47] I. Syamsu and D. Mahmudin, "An Application for Shrimp Aquaculture Data Collection and Automation," pp. 111–115, 2015.
- [48] M. Saravanan, A. Das, and V. Iyer, "Smart water grid management using LPWAN IoT technology," in *GloTS 2017 - Global Internet of Things Summit, Proceedings, 2017*.
- [49] Y. T. Liu et al., "A solar powered long range real-time water quality monitoring system by LoRaWAN," *2018 27th Wirel. Opt. Commun. Conf. WOCC 2018*, pp. 1–2, 2018.
- [50] Institute of Electrical and Electronics Engineers, "2018 IST-Africa Week Conference : 09-11 May 2018, Gaborone, Botswana.," in *2018 IST-Africa Week Conference (IST-Africa), 2018*, p. Page 1 of 8-Page 8 of 8.
- [51] J. Park and C. Kim, "System Using LoRaWAN," *2019 Int. Conf. Inf. Netw.*, pp. 439–441, 2019.
- [52] "Sensores y Actuadores - Leonel Germán Corona Ramírez, Griselda Stephany Abarca Jiménez, Jesús Mares Carreño - Google Libros." [Online]. Available: https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=wMm3BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=que+es+un+sensor&ots=6NallCa4Xw&sig=1KL8GKVzbfPgPnBeeDOao1leAe6s&redir_esc=y#v=onepage&q=sensor&f=false. [Accessed: 22-Jun-2020].
- [53] D. Mislov, M. Cifrek, I. Krois, and H. Dzapo, "Measurement of dissolved hydrogen concentration with clark electrode," *SAS 2015 - 2015 IEEE Sensors Appl. Symp. Proc.*, 2015.
- [54] LoRa Alliance, "Whitepaper: LoRaWAN," no. November, 2015.

