

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA**

AUTOR

DANIEL ALEJANDRO DELGADO ARCILA

DIRECTOR

DR. ING. JORGE IVAN SOFRONY ESMERAL

BOGOTÁ, COLOMBIA

2021 - 1S

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

Índice

Índice de figuras	2
1. Introducción	1
2. Antecedentes y contexto	2
3. Marco teórico	6
3.1. Principio de funcionamiento de sensores	6
3.1.1. Sensor de oxígeno disuelto (OD)	6
3.1.2. Sensor de temperatura NTC	8
3.1.3. Sensor de conductividad	8
3.1.4. Arquitectura de red LoRaWAN	9
4. Diseño e implementación de arquitectura LoRaWAN	12
4.1. Arquitectura	12
4.2. Nodo físico	13
4.3. Gateway	17
4.4. Servidor de red	19
4.5. Servidor de aplicaciones	21
4.6. Resultados	26
5. Conclusión	41
6. Anexos	42
6.1. Cálculos energéticos	42
6.2. Modelado físico	49
6.3. Comunicación RS485	51
6.3.1. Sensor de oxígeno disuelto	51
6.3.2. Sensor de conductividad	52
6.3.3. Función de bytes to float	54
6.4. Calibración y mantenimiento de sensores	55
6.4.1. Calibración y mantenimiento del sensor de oxígeno disuelto	56
6.4.2. Calibración y mantenimiento del sensor de conductividad	58
6.5. Código payload formatter	59
Referencias	61

Índice de figuras

1. Imagen de Google Earth del área de estudio con medidas	2
2. Puntos de lectura	3
3. Opciones para selección de sensores (imagen de <i>Microlink</i>)	4
4. Comparación protocolos IoT [1]	4
5. Principio de funcionamiento sensor óptico[2]	7
6. Comparativa de método óptico y método electroquímico [3]	7
7. Arquitectura de LoRaWAN (tomada de https://lora-alliance.org/)	9
8. Clases de dispositivos LoRa (tomada de https://kaizen8501.tistory.com/137)	10
9. Arquitectura LoRaWAN (Cond.=conductividad; OD=oxígeno disuelto, Modbus RTU=protocolo de comunicación industrial; TCP/IP=Protocolo de Control de Transmisión/protocolo de internet; SSL=Secure Sockets Layer)	12

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

10.	Arquitectura LoRaWAN	12
11.	Esquema del circuito para el nodo físico	14
12.	Microcontrolador TTGO T-Beam V1.1	15
13.	Boya con caja eléctrica	16
14.	Caja de protección eléctrica ZCEBOX	17
15.	Unión impermeable IP68 de 3 pines	17
16.	Gateway Kerlink iFemtoCell-evolution	18
17.	Interfaz web <i>Kerlink</i>	19
18.	Overview	19
19.	Interfaz del servidor de red TTN, “Overview” para visualizar el Gateway utilizado	20
20.	Interfaz de end device	21
21.	Arquitectura del SEMVA	22
22.	Pantalla de inicio	23
23.	Diagrama ejemplo de una finca con 2 HUBs y 6 estaciones de sensórica	23
24.	Dashboard del SEMVA	24
25.	Información de finca dashboard	24
26.	Espacio de trabajo dashboard del SEMVA	25
27.	Vista general SEMVA	25
28.	Gráfica de temperatura en el espacio de trabajo	26
29.	Resultados de medición del sensor de conductividad en agua de mar artificial desde monitor serial	27
30.	Resultados de medición del sensor de oxígeno disuelto en agua de mar artificial desde monitor serial	28
31.	Promedio de 15 mediciones de los sensores, resultado de concentración de oxígeno disuelto derivado del promedio de porcentaje de oxígeno disuelto, resultado de salinidad basado en la conductividad, medición de la carga de batería	29
32.	Trama recibida en la consola de TTN	29
33.	Montaje de medición antes de ensamblaje con el cuerpo de la boyta	30
34.	Refuerzo mediante sikaflex de los agujeros para evitar filtraciones	31
35.	Ensamble con bolsas de silice gel	31
36.	Circuito impreso	32
37.	Resultado de la impresión de la PCB	33
38.	Conexiones de las borneras del circuito	34
39.	Conexiones del módulo dual de relés (en la conexión de entrada hay cuatro cables, el naranja es Vcc, el verde es la tierra, el azul es el control del relé 1 (K1) y el amarillo es el control del relé 2 (K2))	34
40.	Interior de la caja ensamblada	35
41.	Detalle de LED indicadores de funcionamiento	36
42.	Numeración de las cajas indicando la boyta a la que acompañan y marcación de los conectores con color (azul para conductividad, amarillo para oxígeno disuelto y verde para el panel solar) y símbolo (S para conductividad y O_2 para oxígeno disuelto y PN para la conexión son el panel solar).	36
43.	Marcación de sensores mediante número (de uno a tres), indicando la boyta y la caja que acompañan, color y símbolo siguiendo la convención de la figura 42b	37
44.	Detalles de la caja y la boyta	38
45.	Montaje de gateway en el balcón de la discoteca	39
46.	Boya ensamblada flotando en la laguna	40
47.	Aproximación de potencia necesaria de las baterías	42
48.	Resultado horas potencia y horas de autonomía	42
49.	Consumo diario de la boyta	43

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

50.	Intensidad lumínica (lux) en superficie de la laguna La Escollera para fechas cercanas a los solsticios. Datos obtenidos con un registrador electrónico HOBO Pendant luz/temperatura 64k. Las caídas en intensidad hacia el medio día corresponden a la sombra que dan los árboles de manglar que rodean la laguna, debido a que el registrador se encuentra cerca a la orilla.	44
51.	Irradiancia máxima y mínima	45
52.	Irradiancia Santa Marta 2014	46
53.	Cálculo de potencia de panel solar	46
54.	Características panel solar	47
55.	Información adicional sobre conexión y controlador de carga	47
56.	Verificación de sistema energético	48
57.	Bosquejo inicial boyas	49
58.	Modelado de la boyas	50
59.	Diagrama de flujo sugerido para la operación <i>GetTemperatureAndDO</i>	51
60.	Ejemplo de trama de petición <i>GetTemperatureAndDO</i>	52
61.	Ejemplo de trama de respuesta <i>GetTemperatureAndDO</i>	52
62.	Ejemplo valores de respuesta <i>GetTemperatureAndDO</i>	52
63.	Diagrama de flujo sugerido para la operación <i>GetTemperatureAndConductivity</i>	53
64.	Ejemplo trama de petición <i>GetTemperatureAndConductivity</i>	53
65.	Ejemplo trama de respuesta <i>GetTemperatureAndConductivity</i>	54
66.	Ejemplo valores de respuesta <i>GetTemperatureAndConductivity</i>	54
67.	Diagrama ilustrativo de cómo se estructura la comunicación entre el microcontrolador y las sondas	55
68.	Interfaz de calibración del sensor de oxígeno disuelto del software que provee la compañía <i>Winmore</i>	57
69.	Tapa fluorescente y empaque (O-ring) del sensor de oxígeno disuelto (izquierda); conector entre el cable y el cuerpo del sensor (derecha)	58
70.	Interfaz de calibración del sensor de conductividad del software que provee la compañía <i>Winmore</i>	59

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

1. Introducción

El uso de nuevas tecnologías de la información y la comunicación, y la electrónica digital ha impactado diversos aspectos en el campo científico; uno de estos campos ha sido la investigación en ambientes marinos. En este campo se ha avanzado en facilitar soluciones más efectivas para la medición de variables en este tipo de ambientes. Una de estas tecnologías en desarrollo es el Internet de las Cosas (IOT por sus siglas en inglés) con protocolos novedosos y hardware de bajo costo y gran poder de computación. El presente trabajo es un caso particular para la aplicación de esta tecnología: una laguna costera artificial ubicada en el área de El Rodadero en Santa Marta, llamada La Escollera; una zona privada en donde instituciones como la Universidad Nacional y el Instituto de investigaciones marinas y costeras (INVERMAR) están interesados en hacer mediciones de variables de este ecosistema marino. Este trabajo se hace en conjunto con la empresa *Microlink S.A.S* teniendo no solo una intención de investigación sino también con el ánimo de acercar a la academia con la empresa privada.

La medición de variables involucra una red LoRaWAN en la que sensores envían información a un sistema embebido, el cuál transmite los datos mediante el protocolo Lora a un concentrador (Gateway); este concentrador envía la información a una aplicación web con la cual el usuario final puede consultar los valores de las variables de interés. Este proceso facilitaría la toma de información y por lo tanto fomenta la investigación multidisciplinaria en temas de biología marina y tecnología.

En este trabajo se buscará hacer una exposición detallada del diseño que se realizó de toda la red LoRaWAN: nodo físico, concentrador, servidor de red y servidor de aplicaciones. Para el nodo físico se expondrá todo el diseño electrónico del circuito, los cálculos energéticos para la selección de baterías y panel solar; el código utilizado por el microcontrolador para la conexión con los sensores, el tratamiento de datos y la conexión con el servidor de red.

2. Antecedentes y contexto

La laguna La Escollera ($11^{\circ}12'32,83''$ N, $74^{\circ}13'31,68''$ W) es una marina artificial privada localizada en el extremo norte de la ensenada de Gaira, en el sector turístico de El Rodadero, Santa Marta (Colombia), en el mar Caribe [4]. Este espacio se viene usando para investigación; específicamente en investigaciones previas se menciona que esta área se usa como un "laboratorio natural con propósitos académicos" desde 2015 [5].



Figura 1: Imagen de Google Earth del área de estudio con medidas

En dichas investigaciones se vienen midiendo variables de interés como salinidad, temperatura, nivel del mar, entre otras usando registradores electrónicos sumergibles autónomos (principalmente de la marca HOBO®). Un resumen de los datos obtenidos se muestra en el cuadro 1:

Variable	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Salinidad (PSU)	34,3	38,9	15,1	2,8
Temperatura (°C)	30,7	34,7	24,6	2,0
Nivel relativo del mar (m)	0,0	-0,31	+0,37	Range 0,68

Cuadro 1: Datos recabados de salinidad, temperatura y nivel relativo del mar [4]

La utilización de estos registradores electrónicos ha sido exitosa para la recopilación de datos desde finales de 2016, y continúa a la fecha, con registradores adicionales de oxígeno disuelto y pH. Pero también acarrea ciertas dificultades las cuales se quieren solucionar usando el paradigma de IOT. En particular los

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

registradores requieren recuperación periódica para descargar los datos, revisión de baterías, verificación del funcionamiento, recalibración, nueva programación y postura de regreso en el lugar. El sistema IOT planteado permite tener varios sistemas de sensores separados en el espacio y la comunicación directa con un servidor en el que se pueden examinar los datos en tiempo real. Sin embargo, todo sensor sumergido en agua, y especialmente en el mar, está sujeto a ensuciarse y a ser incrustado por organismos, lo que afecta su desempeño. Esto hace inevitable la limpieza y calibración periódica (quincenal en un sistema estuarino como La Escollera) [4], sea cual sea el sistema empleado.

En el trabajo previo de *Microlink S.A.S* con el profesor Sven Zea se determinó que se construirían 3 boyas distribuidas en la laguna como se muestra en la figura 2. Sumado a esto la empresa también realizó el trabajo de comparación de distintos sensores en el mercado tomando en cuenta los requerimientos para la medición de las variables junto con otras características, lo que se muestra en la figura 3, lo que llevó a elegir los sensores ofrecidos por la empresa *Winmore*.

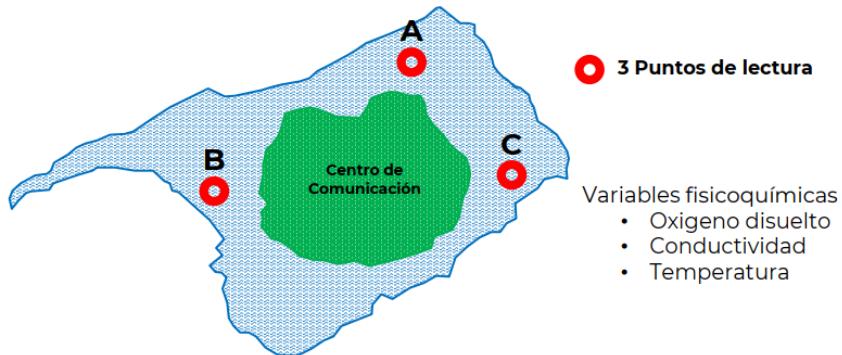


Figura 2: Puntos de lectura

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

Opción	A			B	C	D	
	ATLAS SCIENTIFIC			VERNIER	THERMOFISHER SCIENTIFIC	WINMORE	
Fabricante	Oxígeno disuelto	Conductividad	Temperatura	Oxígeno disuelto (óptico)	Oxígeno disuelto (óptico)	Oxígeno disuelto y Temperatura (óptico)	Conductividad
Variable	0 - 100 mg/L	10 $\mu\text{S}/\text{cm} - 1 \text{ S}/\text{cm}$	-200°C a 850°C	0 - 20 mg/L	0 - 20 mg/L	0 - 20 mg/L	1 $\mu\text{S}/\text{cm} - 200 \text{ mS}/\text{cm}$
Rango	+/- 0.05 mg/L	+/- 2%	+/- (0.15 + (0.002*t))	+/- 0.04 mg/L	+/- 0.03 mg/L	+/- 1% T(+/- 0.2 °C)	+/- 1%
Precisión							
Tiempo respuesta	~0.3 mg/L/per sec	90% in 1s	90% in 13s	~0.006 mg/L/per sec	95% in 37s	10 s	10 s
Rango temperatura	1 - 60 °C	1 - 110 °C		0 - 50 °C	-5 - 50 °C	0 - 50 °C	0 - 50 °C
Max presión	3,447 kPa (500PSI)	200 PSI		228 - 1519 mmHg (30PSI)	300 PSI		
Max profundidad	352m (1,157 ft)	141m (463 ft)					
Cable	1 m	1 m	81 cm			10 m	10 m
Recalibración	~1 año	~10 años				~1 año	
Vida útil	~4 años	~10 años	~15 años				
Mantenimiento	~18 Meses						~1 Mes
Precio	USD 1.543	USD 1.351	USD 394	USD 2.860	USD 11.817	USD 3.364	USD 2.168

Figura 3: Opciones para selección de sensores (imagen de *Microlink*)

Otro aspecto avanzado por los ingenieros de *Microlink S.A.S* fue la decisión del protocolo de comunicación que se utilizaría. Por las características de la aplicación y del espacio en donde se implementará, se evaluaron distintos protocolos y se concluyó que el que mejor se acoplaba a las necesidades del proyecto era el protocolo LoRa [4](#).

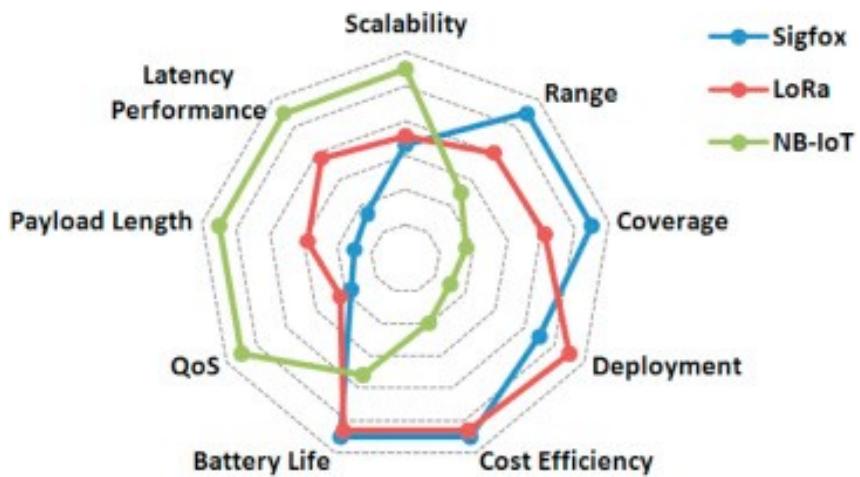


Figura 4: Comparación protocolos IoT [\[1\]](#)

En términos generales la solución que se propuso fue: "... el uso de un dispositivo flotante enérgicamente autónomo para medir las variables en puntos de la laguna más centrales; utilizando tecnología LoRa se transmiten los datos a un gateway ubicado en el centro de comunicación y de este se retransmiten a un

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

servidor de red y de este a un servidor de aplicaciones; con esto se facilitará ampliamente la recolección y tratamiento de datos.”

3. Marco teórico

3.1. Principio de funcionamiento de sensores

3.1.1. Sensor de oxígeno disuelto (OD)

Para la medición de oxígeno disuelto hay dos métodos usuales: sensores electroquímicos y sensores ópticos. La sonda de oxígeno disuelto en este caso utiliza el principio de luminiscencia dinámica de oxígeno, mediante la técnica denominada “quenching” o reducción. Este método es descrito de la siguiente manera en *The Dissolved Oxygen Handbook*:

“Este método se fundamenta en el bien documentado principio que el oxígeno disuelto reduce (quenches) tanto el tiempo de vida como la intensidad de la luminiscencia asociada con el químico colorante. Cuando no hay más oxígeno presente, el tiempo de vida y la intensidad de la señal están al máximo. A medida que oxígeno es introducido en el elemento sensor, tanto el tiempo de vida como la intensidad de la luminiscencia se hacen más pequeños. Por tanto, el tiempo de vida y la intensidad de la luminiscencia son inversamente proporcionales a la cantidad de oxígeno presente. La relación entre la presión de oxígeno externa al sensor y el tiempo de vida o la intensidad de la luminiscencia en la capa con el colorante del elemento sensor puede ser generalmente cuantificada por la ecuación Stern-Volmer (1)” [6]

$$\frac{I}{I_o} = 1 + k_q t_o * O_2 \quad (1)$$

donde:

I_o = Intensidad o tiempo de vida de la luminiscencia sin la molécula de reducción (quenching).

I = Intensidad o tiempo de vida de la luminiscencia con la molécula de reducción (O_2).

k_q = Coeficiente tasa del reductor (quencher).

t_o = Tiempo de vida de la luminiscencia del químico (el colorante) que será reducido (quenched).

O_2 = Concentración de oxígeno.

El funcionamiento del sensor se ve en la figura 5 y sigue los siguientes pasos: Se provoca un punto fluorescente activo (1) con una luz azul (2) y se detecta una luz roja luminiscente (3) mediante el diodo foto-detector (5). La presencia de oxígeno modifica el nivel de descomposición fluorescente y la fase cambia, lo que se relaciona directamente con la presión parcial de oxígeno. El LED de referencia (4) emite

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

impulsos de luz roja de características conocidas en el punto fluorescente (1), que se detectan mediante el diodo foto-detector (5) y se utiliza como señal de referencia. [2]

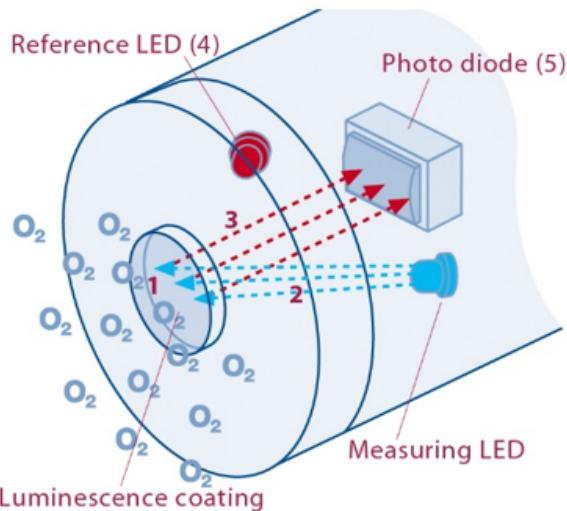


Figura 5: Principio de funcionamiento sensor óptico[2]

En la figura 6 se ve una tabla comparativa entre el método electroquímico y el método óptico:

Comparison between electrochemistry DO sensor and optical DO sensor		
	Polarography or galvanic DO sensor	Optical DO sensor
Measurement	Consume oxygen in measurement – Unstable measurements.	Adopts Fluorescence technologies, no oxygen being consumed during test – stable measurements
Calibration	Serious electrode polarization , frequent calibration is needed; calibration time is long	No polarization; no need to calibrate frequently; only 2 minutes to calibrate.
Performance	Slow response, bad repeatability, low accuracy	15 seconds response time, good repeatability, high accuracy.
Lifetime	electrode membrane need to be frequently replaced; electrolyte need to be refilled; short life time.	No electrode membrane; no electrolyte; Service life>8000hours

Figura 6: Comparativa de método óptico y método electroquímico [3]

Dada la aplicación se optó por el sensor óptico debido principalmente a la poca calibración que requieren en comparación a los sensores electroquímicos, su corto tiempo de respuesta y confiabilidad con pocos requisitos de mantenimiento.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

3.1.2. Sensor de temperatura NTC

Dentro de los tipos de sensores de temperatura, los termistores destacan por su funcionamiento. Y es que están compuestos de materiales semiconductores cuya resistencia a la temperatura varía dependiendo de los grados de la misma. Sus electrodos internos detectan el calor, midiéndolo por impulsos eléctricos.^[7]

El control de temperatura con termistor también presenta variantes según su funcionamiento. El termistor NTC está especialmente indicado en amplios rangos de temperatura. A mayor temperatura menor resistencia. Suelen estar hechos de magnesio, cobre, níquel o cobalto. La resistencia del termistor obedece la siguiente ecuación:

$$R_{NTC} = R_0 * e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (2)$$

donde:

T_0 : temperatura de referencia, expresada en Kelvin.

R_0 : resistencia de referencia, es decir, la resistencia del sensor de temperatura NTC cuando se encuentra a la temperatura de referencia.

β : constante del sensor de temperatura NTC.

T : temperatura que se está intentando medir, expresada en Kelvin.

Este es el tipo de sensor de temperatura que poseen los sensores escogidos por *Microlink S.A.S* de la marca *Winmore*.

3.1.3. Sensor de conductividad

Las sales disueltas en agua se descomponen en iones cargados positivamente y negativamente. La conductividad se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos. Los iones más positivos son sodio (Na^+), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{+2}). Los iones más negativos son cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}), carbonato (CO_3^{-2}), bicarbonato (HCO_3^{-2}). Los nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4^{-3}) no contribuyen de forma apreciable a la conductividad, aunque son muy importantes biológicamente. La salinidad es una medida de la cantidad de sales disueltas en agua. La salinidad y la conductividad están relacionadas porque la cantidad de iones disueltos aumentan los valores de ambas. Las sales en el agua de mar son principalmente de cloruro de sodio ($NaCl$). Sin embargo, otras aguas salinas, tales como las de Mono Lake, tienen una salinidad elevada debido a una

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

combinación de iones disueltos como sodio, cloruro, carbonato y sulfato. [8]

Tipo de agua	Conductividad
Agua ultra pura	$0,055 \mu S/cm$
Agua destilada	$0,5 \mu S/cm$
Agua de montaña	$1,0 \mu S/cm$
Agua doméstica	$500 \text{ a } 800 \mu S/cm$
Max. para agua potable	$1055 \mu S/cm$
Agua de mar	$56 mS/cm$
Agua salobre	$100 mS/cm$

Cuadro 2: Conductividades de agua. Recuperado septiembre 23, 2021 en (<http://www.reitec.es/Pdf/agua01.pdf>)

Entre los tipos de sensor de conductividad existen tres principales: sondas de dos electrodos, sondas de cuatro electrodos y sondas inductivas o de medición toroidal[9]. El sensor de conductividad de la compañía *Winmore* es de cuatro electrodos. Este tipo posee la ventaja de no verse afectado por efecto de polarización y también tiene un rango más amplio de valores (de $1 \mu S/cm$ a $200 mS/cm$ de acuerdo a la ficha de datos del sensor).

3.1.4. Arquitectura de red LoRaWAN

LoRaWAN es un tipo de red de bajo poder y área amplia (Low-power Wide-area Network por sus siglas en inglés). Su arquitectura consiste en nodos físicos con capacidad LoRa que envían datos a través de un concentrador (gateway) que a su vez permite direccionarlos a un servidor de red en donde, mediante alguna integración, los retransmite a un servidor de aplicaciones donde pueden visualizarse y almacenar en una base de datos:

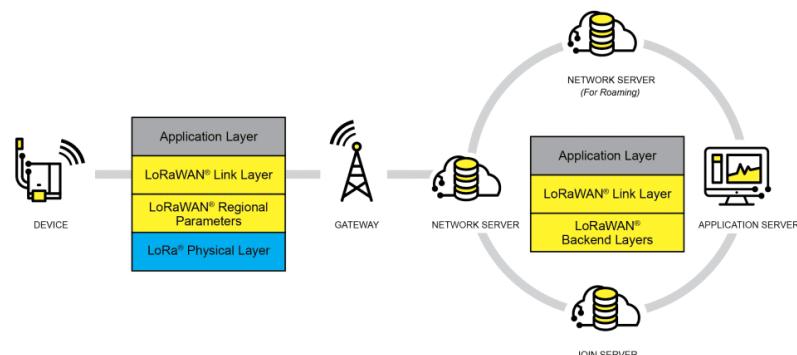


Figura 7: Arquitectura de LoRaWAN (tomada de <https://lora-alliance.org/>)

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

Un aspecto importante de los dispositivos LoRa es que de acuerdo con las capacidades que se usarán se clasifican de tres formas en que pueden configurarse:

Clase A: Esta clase está orientada a la transmisión de información desde sensores. Posee transmisión bidireccional, con pequeñas ventanas de recepción después de realizada la transmisión ascendente.

Clase B: Esta clase está orientada a dispositivos que requieran de comunicación bidireccional en cualquier instante creando ventanas de recepción sin necesidad de transmisión ascendente.

Clase C: En esta clase se encuentran dispositivos cuya función requiera una recepción permanente y solo cierran sus ventanas de recepción cuando transmiten.

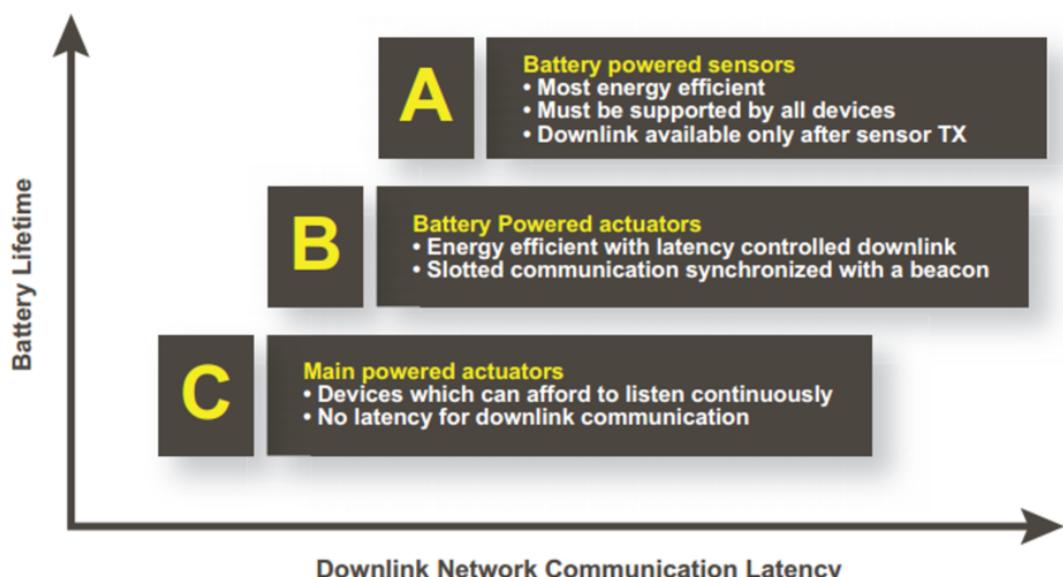


Figura 8: Clases de dispositivos LoRa (tomada de <https://kaizen8501.tistory.com/137>)

Otro rasgo de los dispositivos LoRa son los métodos de activación y registro, estos proporcionan la seguridad de la red evitando que dispositivos extraños se conecten a la red. Este proceso requiere el envío y almacenamiento de los parámetros:

- Dirección de dispositivo (DevAddr)
- Identificador de aplicación (AppEUI)
- Llave criptográfica de sesión (NwkSKey)
- Llave criptográfica de sesión de aplicación (AppSKey)

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

Con estos parámetros se debe decidir entre dos procedimientos: OTAA(Over-The-Air-Activation) y ABP(Activation-By-Personalization).

OTAA(Over-The-Air-Activation): Este procedimiento consiste en que el nodo envía una solicitud de unión al gateway (conteniendo DevAddr, AppEUI y AppKey), y este reenvía la trama al servidor de red. El servidor de red responde con un "join accept" el nodo descifra esta respuesta obteniendo: DevAddr, NwkSKey y AppSKey.

ABP(Activation-By-Personalization): En este segundo método los nodos poseen en su memoria toda la información requerida: DevAddr (Dirección de 32 bits única dentro de la red), NwkSKey (Clave de encriptación AES de 128 bits única para cada nodo) y AppSKey (Clave de encriptación AES de 128 bits única para cada dispositivo). Este método no es tan seguro como el OTAA.

4. Diseño e implementación de arquitectura LoRaWAN

4.1. Arquitectura

Para la aplicación se usó el diseño de una red LoRaWAN en la cual el nodo físico estaría integrado principalmente por los sensores y por el microcontrolador; por supuesto, el diseño físico incluye toda la parte estructural: la boya, la caja eléctrica, las baterías, el panel solar y todas las partes requeridas para su integración; pero lo relevante para la red es esencialmente lo que se observa en la figura 9:

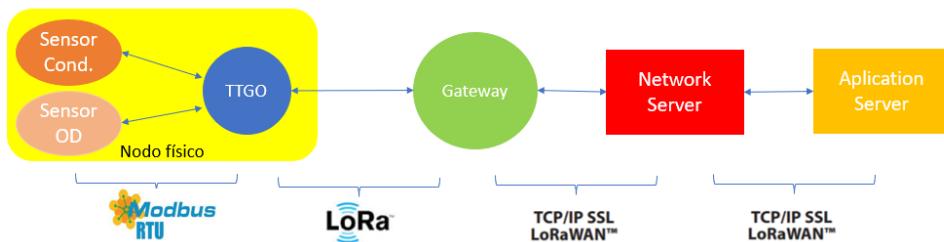


Figura 9: Arquitectura LoRaWAN (Cond.=conductividad; OD=oxígeno disuelto, Modbus RTU=protocolo de comunicación industrial; TCP/IP=Protocolo de Control de Transmisión/protocolo de internet; SSL=Secure Sockets Layer)

La propuesta de solución a la que se llegó considerando el trabajo previo de *Microlink S.A.S* se sintetiza en la figura 10 donde se observan los sensores de conductividad y oxígeno disuelto, el microcontrolador TTGO T-Beam, el gateway de la marca kerlink (facilitado por la empresa para pruebas) el servidor de red en *The Things Network* que se eligió por su capacidad y su bajo costo para realizar pruebas iniciales; y finalmente el servidor de aplicaciones SEMVA (Sistema Enlazado de Medición de Variables Ambientales):

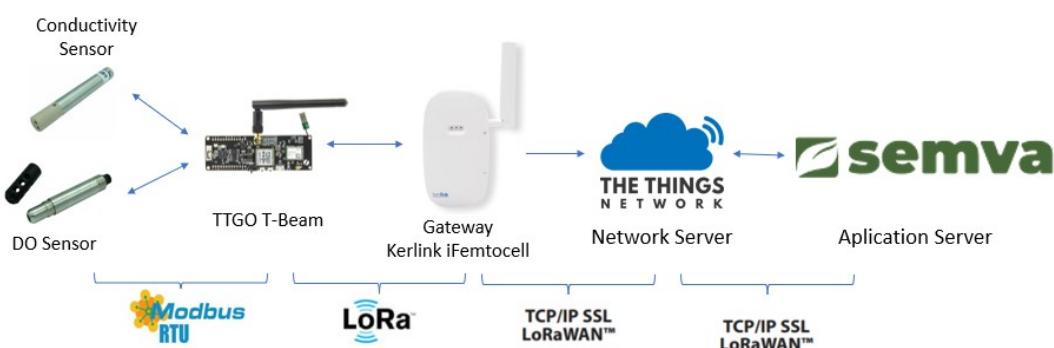


Figura 10: Arquitectura LoRaWAN

4.2. Nodo físico

Para el nodo físico se tomó en consideración las sondas que la empresa *Microlink S.A.S* evaluó (figura 3). La opción escogida fueron los sensores de la marca *Winmore*, específicamente el sensor de conductividad (**W520**) y el sensor de oxígeno disuelto (**W504**), estos sensores se comunican mediante el protocolo RS485 modbus RTU. Para la comunicación entre éste y el microcontrolador se usó el módulo MAX485 que convierte RS485 a TTL.

Respecto a la alimentación de los sensores se optó por 9 voltios de un rango dado por la ficha de datos ya que tanto para el microcontrolador como para el módulo MAX485 se requieren 5 voltios (un voltaje menor). Dado que se requiere una alimentación constante para evitar pérdida de datos y garantizar la autonomía se resolvió utilizar energía solar con baterías recargables de 12 voltios y 4 amperios-hora. Se usa un regulador de 9 voltios **LM7809** para la alimentación de los sensores y un regulador de 5 voltios (**LM7805**) para la alimentación del módulo MAX485, el microcontrolador y los relés. Debido a que se decidió realizar la transmisión de datos de los sensores cada 30 minutos se diseñó un sistema de interrupción de corriente para los sensores y el módulo MAX485 mediante relés. Los cálculos que sustentan la elección del panel solar y las baterías se encuentran en el anexo 6.1:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

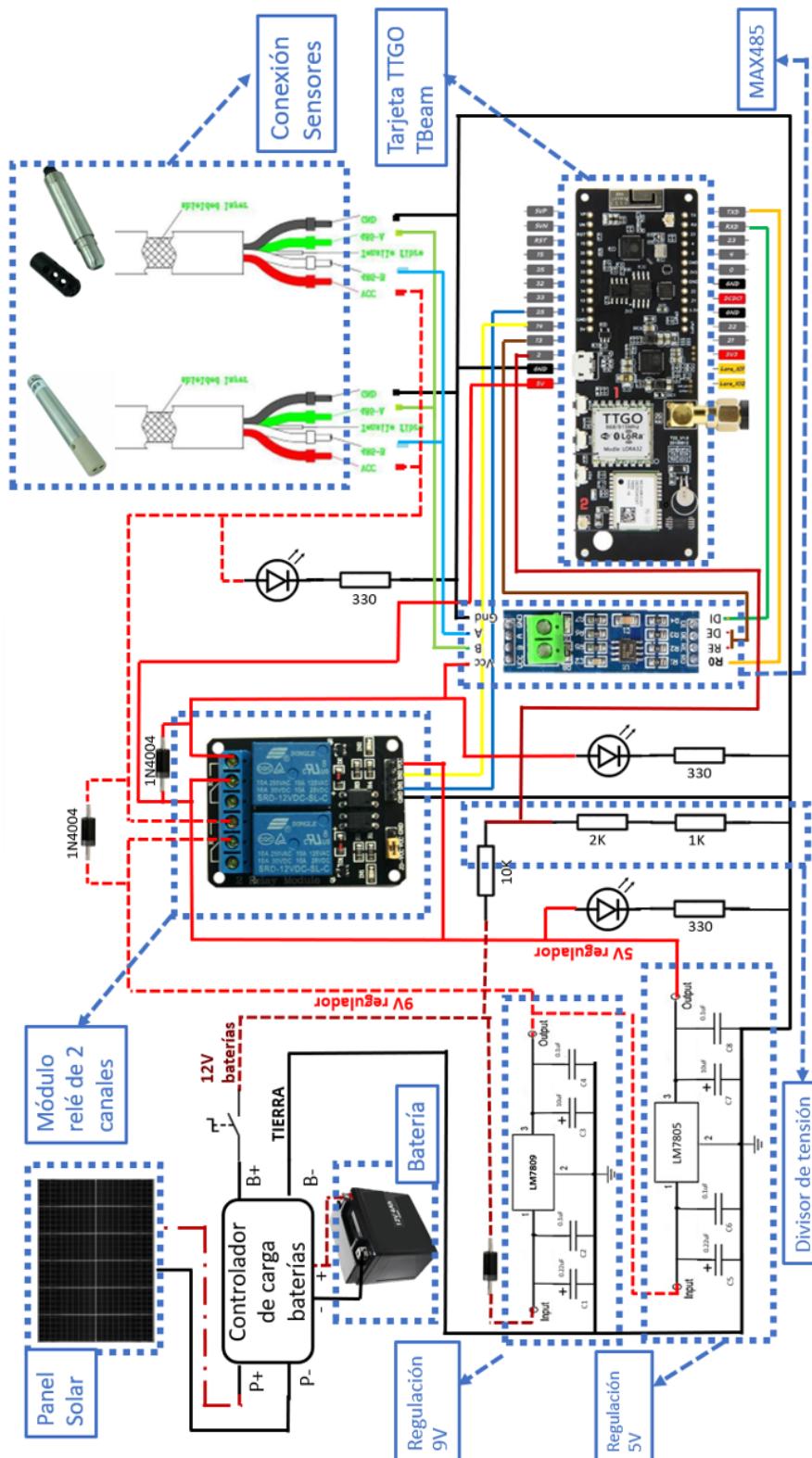


Figura 11: Esquema del circuito para el nodo físico

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

El microcontrolador usado fue la tarjeta TTGO T-Beam versión 1.1 SX1276 con frecuencia de 915Mhz, producida por *Lilygo®* (figura 12); esta tarjeta posee capacidades de Wi-Fi y de GPS, además del módulo y la antena SMD para la comunicación LoRa. Su arquitectura está basada en el microcontrolador ESP32, y para encontrar información de esta tarjeta se puede buscar en el [GitHub oficial](#), los pin outs se pueden encontrar en [doc.riot-os.org](#) y también fue útil la información proporcionada por los vendedores de [Aliexpress](#).



Figura 12: Microcontrolador TTGO T-Beam V1.1

La programación se llevó acabo mediante *Arduino IDE*, se usó la librería [ModbusMaster](#). Se intentó por un tiempo con la librería de [modbus para Arduino](#), pero no se logró la comunicación de manera satisfactoria. Después se tuvieron problemas particulares debido al microcontrolador usado, en particular dos: el problema de la muestra de datos y el problema de la subida del código al microcontrolador. El problema de la subida de código consistía en que el microcontrolador no permitía la subida del código debido a que este se debe subir cuando el microcontrolador tiene todos los pines al aire, de otra manera se interrumpe la subida del código (*Failed to connect: Timed out waiting for packet header*), por lo que se deben desconectar todos los pines, subir el código y ya puede probarse con los pines conectados. El problema de la muestra de datos consistía en que el monitor serial utilizado por el *Arduino IDE* no mostraba datos, esto se soluciona con la repetida conexión y desconexión del microcontrolador, el procedimiento que dió resultado fue: primero una conexión para subir el código (con los pines desconectados), una vez

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

subido se desconectaba el microcontrolador del computador (se conectaban los pines), a continuación se volvía a conectar dejándolo conectado unos segundos y luego se desconectaba y volvía a conectar; este procedimiento permitía visualizar los datos en el monitor serial de manera más o menos consistente.

Una vez resueltos los problemas anteriormente mencionados la implementación del código se realizó con la guía de instrucciones de modbus para cada sensor que provee la compañía *Winmore*, el procedimiento en detalle se analiza en el anexo [6.3](#).

Respecto a la estructura física de la boyas se tienen tres partes (figura [13](#): el cuerpo de la boyas en fibra de vidrio y rellena de poliuretano, de forma cuadrada de 40x40 cm de lado y 15 cm de altura, que permita la flotabilidad; la caja eléctrica IP68 (figura [14](#)) que protegerá el circuito y las baterías, y las uniones impermeables IP68 (figura [15](#) que permitirán remover las sondas para mantenimiento sin necesidad de abrir la caja. Adicionalmente la boyas tiene un techo que protege la caja y sirve para ubicar el panel solar; el cuerpo de la boyas tiene un orificio vertical lateral que la atraviesa, por donde bajan los cables de los sensores que quedan sumergidos unos 40 cm bajo la superficie; y en la parte inferior tiene un gancho de acero incrustado, del cual se asegura la boyas con una cadena a un muerto de cemento ubicado en el fondo de la laguna para restringir su movimiento.



Figura 13: Boya con caja eléctrica

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA



Figura 14: Caja de protección eléctrica ZCEBOX



Figura 15: Unión impermeable IP68 de 3 pines

4.3. Gateway

El dispositivo que se usó como gateway es el *Wirnet iFemtoCell-evolution* fabricada por la compañía *Kerlink*, es un dispositivo ideal para aplicaciones LoRaWAN en interiores; todos los detalles se pueden encontrar en la [página oficial](#).

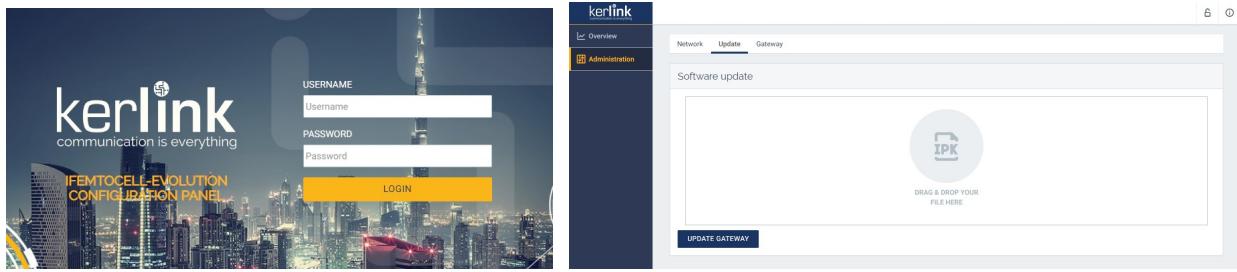
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA



Figura 16: Gateway Kerlink iFemtoCell-evolution

Para su [inicio rápido](#), primero se conectó el gateway a la fuente de alimentación y mediante un cable de Ethernet se conectó al computador, usando la interfaz web de *Kerlink* con la sintaxis “`http://klk-<typeofgateway>-<serialnumber>`” siendo el tipo del gateway *fevo* y el serial los últimos seis dígitos del EUI particular del dispositivo. Se accedió con el usuario y la contraseña por defecto (figura 17a), yendo a la pestaña de update (figure 17b) y se siguiendo la siguiente metodología: Primero se subió el programa *liveburner* con extensión *.ipk* que se encuentra en la documentación oficial de *Kerlink*; este se usa para retornar a valores por defecto los programas que tiene el gateway. Una vez este se sube se guarda y da la opción de reiniciar el gateway para hacer efectivos los cambio; cada vez que se hace esto se saldrá de la interfaz web automáticamente y una vez el gateway se haya reiniciado se podrá acceder nuevamente con las misma credenciales. Este proceso se hace para cada archivo que se desea subir y solo se puede subir uno a uno. Es necesario para realizar la conexión con *The Things Network (TTN)* subir tres archivos con extensión *.ipk* los cuales tienen nombre: *keros*, *lorad* y *lorafwd*; esto después de subir el *liveburner* para reiniciar la configuración.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA



(a) Entrada usuario y contraseña

(b) Pestaña update, donde se suben archivos

Figura 17: Interfaz web *Kerlink*

4.4. Servidor de red

Lo anterior fue la preparación para realizar la conexión con *TTN*. Ahora para realizar la conexión se accedió a la [página oficial de *TTN*](#) y se creó una cuenta, una vez ingresó al apartado de consola entrando por las frecuencias de Australia (au1) que en este caso son las frecuencias que mejor funcionan en Colombia. Se entró a la sección de gateways y se creó un gateway con las especificaciones de la iFemtoCell-evolution. Esto creó un gateway al que se debe acceder en la pestaña de *Overview*, y se descarga la configuración global de la frecuencias presionando en el botón *Download global_conf.json* (figura 18):

ifemtocell evolution Escollera
ID: gateway-escollera-2

↑ 1,027 ↓ 965 • Last activity 15 seconds ago

General information

Gateway ID	gateway-escollera-2
Gateway EUI	(redacted)
Gateway description	gateway for marine applications in Santa Marta
Created at	Aug 4, 2022 06:48:02
Last updated at	Aug 4, 2022 06:48:02
Gateway Server address	aui.cloud.thethings.network

LoRaWAN information

Frequency plan	AU_915_928_FSB_2
Global configuration	Download global_conf.json

Figura 18: Overview

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

Siguiendo la [documentación de TTN](#) sobre la instalación y configuración de los archivos pertinentes para que el gateway se conecte a TTN (la segunda sección *Connect to The Things Network*, la primera no es necesaria debido a pasos previos), para esto se accede mediante SSH al gateway (el computador debe estar conectado al gateway mediante cable ethernet) y ya sea mediante consola o mediante una herramienta como *WinSCP* se modificaron los archivos que se especifican en la guía y se agregó el archivo de configuración global de frecuencias.

Una vez realizado todo lo anterior y verificándose que el gateway aparezca como conectado en la sección *Overview* de TTN se procedió a crear la aplicación donde se crearán los nodos; en la pestaña de aplicaciones se crea la aplicación asignándole un ID:

The screenshot shows the 'control-escollera' application details on the TTN platform. The application ID is set to 'monitoreo-escollera'. It was created on Jun 7, 2022 at 12:28:29 and last updated on Aug 8, 2022 at 18:59:19. A note indicates the last activity was 22 seconds ago.

Figura 19: Interfaz del servidor de red TTN, “Overview” para visualizar el Gateway utilizado

Luego se creó un end device, para tener toda la información necesaria para conectarlo desde la programación del microcontrolador utilizando la [librería lmic](#). Es importante activar el *Reset frame counters* para visualizar en el *live data* los datos (figura 20):

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

The figure consists of two screenshots of a TTGO LoRaWAN device configuration interface.
 (a) Menu end device: Shows general device information like ID (ttgo-escollera-78262556942), last activity (23 hours ago), and various tabs for Overview, Live data, Messaging, Location, Payload formatters, and General settings. It also shows regional parameters (Australia 915-928 MHz, FSB 2), LoRaWAN version (Specification 1.0.3), and creation date (Aug 8, 2022 19:04:37).
 (b) Advenced MAC settings: Shows advanced MAC configuration options including Frame counter width (32 bit selected), Rx1 delay (1 sec), Desired Rx1 delay (5 sec), Rx1 data rate offset (0), Desired Rx1 data rate offset (0), Rx2 data rate index (8), Desired Rx2 data rate index (8), Rx2 frequency (923,3 MHz), Desired Rx2 frequency (923,3 MHz), Maximum duty cycle (100%), and Desired maximum duty cycle (100%).

Figura 20: Interfaz de end device

Una vez creado el end device se generaron los valores de NWKSKEY, APPSKEY y DEVADDR, estos se utilizaran en el código que será el firmware del microcontrolador TTGO; para esto se utilizó el ejemplo de la librería de lmic para LoRaWAN llamada *MCCI LoRaWAN LMIC* y el ejemplo llamado *ttn-abp*.

Se modificó la función *do_send*, en la sección del *else* se agregó el código que se quiere ejecutar cada vez que corre el programa, esto es cada vez que se envían datos a TTN. Estos datos se envían mediante la función *LMIC_setTxData2*; la función toma como entrada el puerto usado para la transmisión, el arreglo de datos que se enviará, el tamaño del arreglo y un dato que permite activar el ACK para cada paquete que se envía (0 significa ningún ACK y 1 significa que se utilizará el ACK). Entonces se creó un arreglo de tipo *uint8* declarado como *static*, y en este caso se le dio una dimensión de 10; dentro de la función *do_send*, a medida que se iban obteniendo los datos de las sondas, se iban transformando a formato *sflt16* que se usa para datos con punto flotante, y este datum se separó en *lowbyte* y *highbyte* y estos se fueron agregando al arreglo *payload*.

4.5. Servidor de aplicaciones

El servidor de aplicaciones utilizado es el sistema enlazado de medición de variables ambientales (SEMAVA), esta es, según su manual, “una de las soluciones tecnológicas que usan sensado y análisis de variables remotas a través del internet de las cosas, apuntando al aumento de competitividad de nuestros clientes”.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

El flujo de trabajo con esta plataforma se como sigue: “ Inicialmente, se definen las variables ambientales a medir cómo el suelo, aire y/o el agua, necesarios para que el proyecto sea óptimo. Luego se realiza la instalación del SEMVA para iniciar a recolectar la información en un sistema en la nube que indica los cambios en las variables. Finalmente con estos datos se envían alertas y notificaciones a nuestros clientes para así prevenir pérdidas, hacer cambios y así aumentar la productividad”. La arquitectura básica dle SEMVA se muestra en la figura 21.

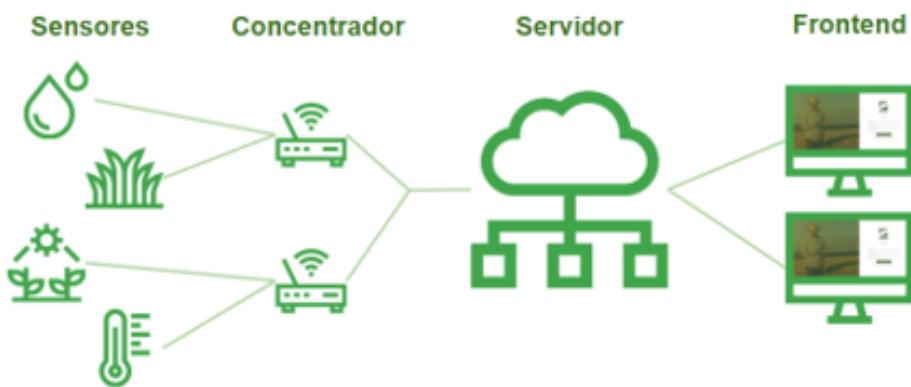


Figura 21: Arquitectura del SEMVA

El SEMVA permite: monitorear, configurar alertas, descargar reportes, modificar y crear usuarios. Dependiendo del rol del usuarios del sistema SEMVA se tiene capacidad de administrador (observar alertas, navegación general, modificación de usuario), analista (observar alertas, navegación genera) y notificado (observar alertas). La navegación general permite la creación de reportes, modificar, monitorear y administrar fincas, observar alertas, ver información de HUBs y de sensores junto con sus mediciones recientes. Cada un o de los usuarios tiene contraseña y usuario fijo (figura 22).

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

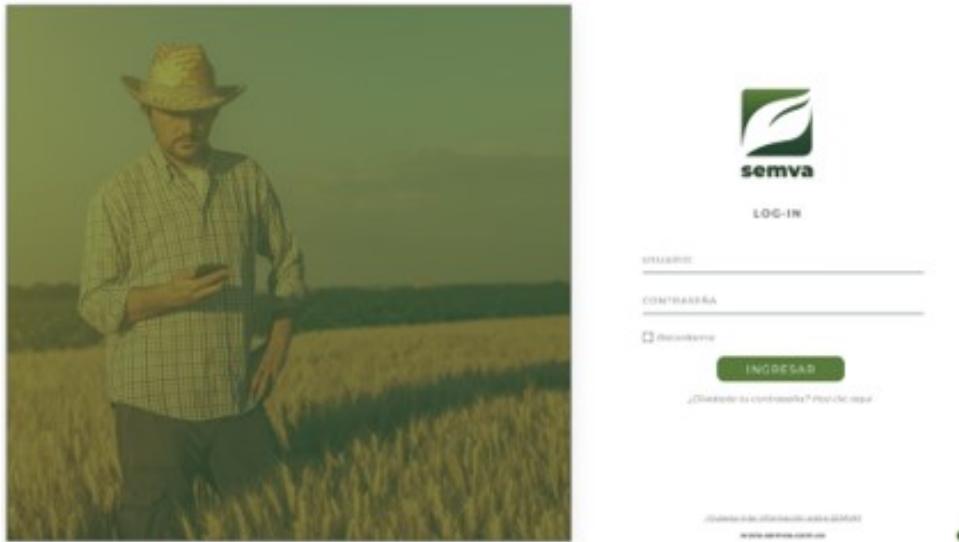


Figura 22: Pantalla de inicio

Las fincas son agrupaciones de estaciones de sensado, estas contienen HUBs los cuales se conectan a un conjunto de sensores. En la figura 23 se ve un ejemplo de lo que contendría esta agrupación.

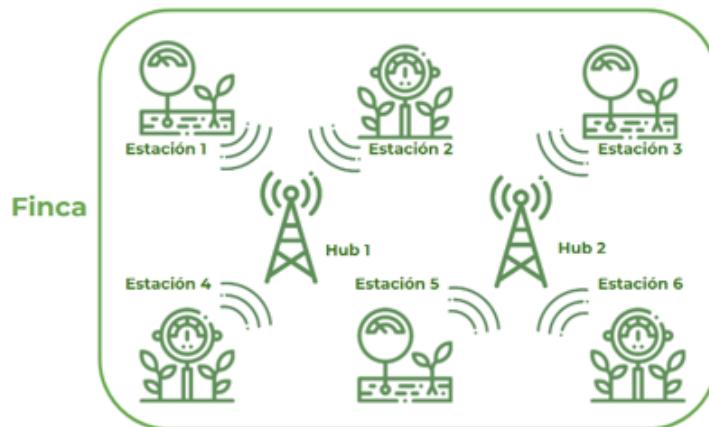


Figura 23: Diagrama ejemplo de una finca con 2 HUBs y 6 estaciones de sensórica

Al ingresar inicialmente se ven las fincas que se tienen (figura 24), la finca de la Escollera es “TTN Bogota”.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA



Figura 24: Dashboard del SEMVA

Los detalles de la finca se ve que solo se tiene un HUB y tres sensores (figura 25).



Figura 25: Información de finca dashboard

El dashboard de la finca al ingresar mediante el botón “IR” se muestra como en la figura 26.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA



Figura 26: Espacio de trabajo dashboard del SEMVA

La vista general en la finca “TTN Bogotaa” se ve como en la figura 27, se observan las tres variables en la cinta superior con un pequeño ícono para cada variable (temperatura, salinidad y oxígeno disuelto de izquierda a derecha). En la figura 28 se observa la gráfica de temperatura con datos tomados de *TTN* en el espacio de trabajo. La integración con *TTN* se hizo mediante el protocolo MQTT, para el cual *TTN* tiene un API para fácil integración.

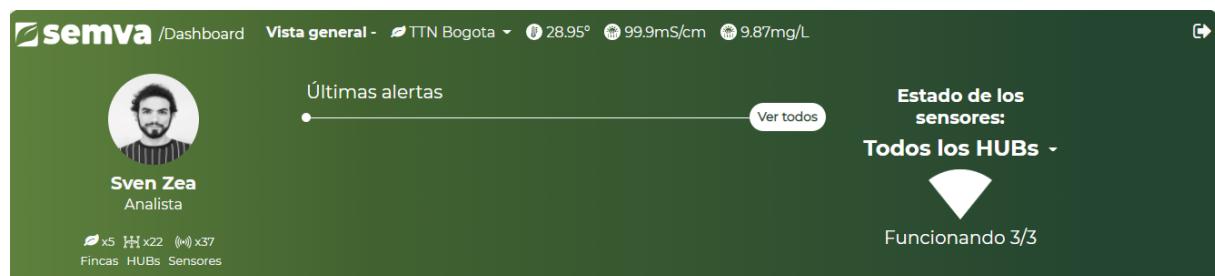


Figura 27: Vista general SEMVA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

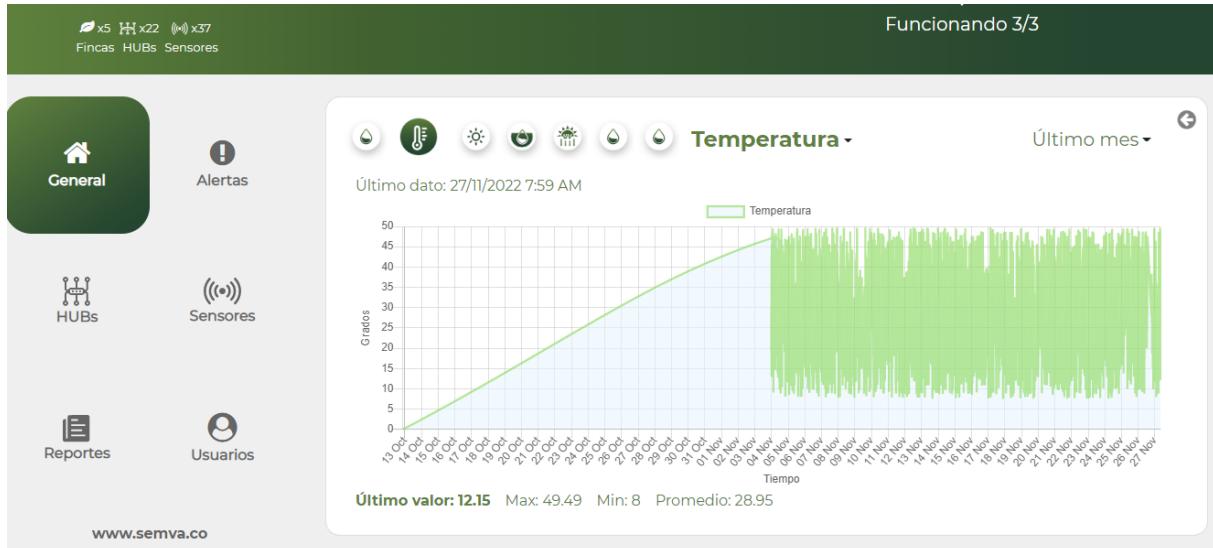


Figura 28: Gráfica de temperatura en el espacio de trabajo

4.6. Resultados

Los resultados iniciales que se obtuvieron de los sensores mediante el microcontrolador TTGO. Estas mediciones se realizaron poniendo cada sensor en un vaso separado con agua de la llave (no se ponen los sensores en un mismo recipiente) y luego variando las condiciones de cada vaso para ver la variación de los datos. El código usado puede encontrarse en el Github [Alianza-Escollera](#).

La lectura y transmisión de los datos que se tuvieron en el laboratorio con la versión 3 de la PCB se muestra en el monitor serial de *ArduinoIDE* como se ve en las figuras 29 y 30, y se ve el resumen de los promedios en la figura 31. Se puede observar el conteo (count) que numera cada medición, si la medida es muy pequeña (menor a 0,00001) entonces no se toma en cuenta y se sigue la medición restándole al total de los datos a la hora de realizar el promedio. Se observan también los valores en hexadecimal de los bytes que se reciben de los sensores (*dataDO[]* y *dataCond[]*); luego están los valores ya en un formato legible de las variables que se desean conocer del sensor.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

```
08:47:23.679 -> ----- DATA READING CONDUCTIVITY SENSOR #3 -----
08:47:23.727 -> 0x60\5\count 1 :
08:47:28.764 ->
08:47:28.764 -> too small of a reading
08:47:28.764 -> - FALSE READING -
08:47:28.764 -> 0x60\5\count 1 :
08:47:33.841 ->
08:47:33.841 -> too small of a reading
08:47:33.841 -> - FALSE READING -
08:47:33.841 -> 0x60\5\count 1 :
08:47:36.921 -> dataCond[0]: B019 dataCond[1]: BE41 dataCond[2]: 6F53 dataCond[3]: 6542 dataCond[4]: 2554 dataCond[5]: 0 dataCond[6]: 0
08:47:37.097 -> {"TemperaturaCond": "14.9579", "Conductividad": "41.3320"}
08:47:39.456 -> 0x60\5\count 2 :
08:47:42.580 -> dataCond[0]: B019 dataCond[1]: BE41 dataCond[2]: 8B56 dataCond[3]: 6542 dataCond[4]: 1756 dataCond[5]: 0 dataCond[6]: 0
08:47:42.720 -> {"TemperaturaCond": "17.4172", "Conductividad": "37.8340"}
08:47:45.082 -> 0x60\5\count 3 :
08:47:48.197 -> dataCond[0]: 201C dataCond[1]: BE41 dataCond[2]: 1941 dataCond[3]: 6542 dataCond[4]: B048 dataCond[5]: 0 dataCond[6]: 0
08:47:48.341 -> {"TemperaturaCond": "9.5795", "Conductividad": "88.1406"}
08:47:50.696 -> 0x60\5\count 4 :
08:47:53.813 -> dataCond[0]: 5012 dataCond[1]: BE41 dataCond[2]: FD55 dataCond[3]: 6542 dataCond[4]: BE55 dataCond[5]: 0 dataCond[6]: 0
08:47:53.951 -> {"TemperaturaCond": "31.6667", "Conductividad": "95.1660"}
08:47:56.302 -> 0x60\5\count 5 :
08:47:59.648 -> dataCond[0]: 201C dataCond[1]: BE41 dataCond[2]: 5946 dataCond[3]: 6542 dataCond[4]: F84B dataCond[5]: 0 dataCond[6]: 0
08:47:59.786 -> {"TemperaturaCond": "13.5797", "Conductividad": "124.1465"}
08:48:02.152 -> 0x60\5\count 6 :
08:48:05.299 -> dataCond[0]: 5012 dataCond[1]: BE41 dataCond[2]: A135 dataCond[3]: 6542 dataCond[4]: 8541 dataCond[5]: 0 dataCond[6]: 0
08:48:05.440 -> {"TemperaturaCond": "20.1511", "Conductividad": "66.6270"}
08:48:07.781 -> 0x60\5\count 7 :
08:48:10.995 -> dataCond[0]: 4017 dataCond[1]: BE41 dataCond[2]: 7E3B dataCond[3]: 6542 dataCond[4]: 2E45 dataCond[5]: 0 dataCond[6]: 0
08:48:11.089 -> {"TemperaturaCond": "15.8895", "Conductividad": "43.8174"}
08:48:13.492 -> 0x60\5\count 8 :
```

Figura 29: Resultados de medición del sensor de conductividad en agua de mar artificial desde monitor serial

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

```

08:48:58.788 -> ----- DATA READING DO SENSOR #3 -----
08:48:58.788 -> 0008p0$::0060RResultado escritura de salinidad226
08:49:02.051 -> count 1 :
08:49:02.051 -> data0[0]: D0C4 data0[1]: BA41 data0[2]: E418 data0[3]: 83F data0[4]: 826D data0[5]: 7940 data0[6]: 0 data0[7]: 0
08:49:02.179 -> {"Temperatura0": "28.5117", "Dopercentage": "101.8966"}
08:49:05.578 -> 0008p0$::0060RResultado escritura de salinidad226
08:49:08.837 -> count 2 :
08:49:08.837 -> data0[0]: F0CD data0[1]: BA41 data0[2]: 8615 data0[3]: 83F data0[4]: 5061 data0[5]: 7940 data0[6]: 0 data0[7]: 0
08:49:08.976 -> {"Temperatura0": "16.7603", "Dopercentage": "81.3987"}
08:49:12.378 -> 0008p0$::0060RResultado escritura de salinidad226
08:49:15.629 -> count 3 :
08:49:15.629 -> data0[0]: D1 data0[1]: BA41 data0[2]: 1F27 data0[3]: 83F data0[4]: AD80 data0[5]: 7940 data0[6]: 0 data0[7]: 0
08:49:15.769 -> {"Temperatura0": "9.9470", "Dopercentage": "135.5483"}
08:49:19.193 -> 0008p0$::0060RResultado escritura de salinidad226
08:49:22.428 -> count 4 :
08:49:22.428 -> data0[0]: 10D7 data0[1]: BA41 data0[2]: 711F data0[3]: 83F data0[4]: E26F data0[5]: 7940 data0[6]: 0 data0[7]: 0
08:49:22.569 -> {"Temperatura0": "15.0701", "Dopercentage": "176.9027"}
08:49:26.053 -> 0008p0$::0060RResultado escritura de salinidad226
08:49:29.225 -> count 5 :
08:49:29.225 -> data0[0]: 10DD data0[1]: BA41 data0[2]: B41A data0[3]: 83F data0[4]: A562 data0[5]: 7940 data0[6]: 0 data0[7]: 0
08:49:29.366 -> {"Temperatura0": "22.5127", "Dopercentage": "129.2068"}
08:49:32.765 -> 0008p0$::0060RResultado escritura de salinidad226
08:49:36.032 -> count 6 :
08:49:36.032 -> data0[0]: 10E0 data0[1]: BA41 data0[2]: 9410 data0[3]: 83F data0[4]: 624C data0[5]: 7940 data0[6]: 0 data0[7]: 0
08:49:36.187 -> {"Temperatura0": "18.5078", "Dopercentage": "88.3979"}
08:49:39.578 -> 0008p0$::0060RResultado escritura de salinidad226
08:49:42.829 -> count 7 :
08:49:42.829 -> data0[0]: 20E6 data0[1]: BA41 data0[2]: 611C data0[3]: 83F data0[4]: 2A60 data0[5]: 7940 data0[6]: 0 data0[7]: 0
08:49:42.969 -> {"Temperatura0": "14.0693", "Dopercentage": "66.5535"}
08:49:46.360 -> 0008p0$::0060RResultado escritura de salinidad226
08:49:49.626 -> count 8 :

```

Figura 30: Resultados de medición del sensor de oxígeno disuelto en agua de mar artificial desde monitor serial

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

```
08:50:40.705 -> ----- AVERAGES -----
08:50:40.798 -> ----- Conductiviry sensor results -----
08:50:40.845 -> Temperature of conductivity sensor average:17.6314 °C
08:50:40.892 -> Average of conductivity:68.9469 mS/cm
08:50:40.892 -> Average of salinity:56.1967 PPM
08:50:40.986 -> ----- SENSOR DE DO -----
08:50:41.033 -> Temperatute of DO sensor average:17.9564 °C
08:50:41.033 -> Average of percentage of DO with salinity cero:127.4500 %
08:50:41.127 -> Average of DO concentration caculated based on the percentage of DO measured:8.6527 mg/L
08:50:41.267 -> ----- OTHER MEASURES -----
08:50:41.314 -> Batery charge:12.0312 V
08:50:41.314 -> 63557407: EV_TXSTART
08:50:43.189 -> ----- END OF PROCESS -----
08:50:43.377 -> Time passed since the start of execution (end of do_send) [milliseconds]: 1019029
08:50:45.346 -> 63816655: EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)
```

Figura 31: Promedio de 15 mediciones de los sensores, resultado de concentración de oxígeno disuelto derivado del promedio de porcentaje de oxígeno disuelto, resultado de salinidad basado en la conductividad, medición de la carga de batería

En el servidor de red se observaron los datos recibidos y formateados (figura 32) para que sean legibles de acuerdo al código en el anexo 6.5.

The screenshot shows a TTN console interface with two columns. The left column lists received data frames with their DevAddr (26 0D E3 0C) and direction (downlink or uplink). The right column shows the JSON-decoded payload for each frame, with line numbers 35 to 47 on the left. The payload contains various environmental measurements.

35	"received_at": "2022-12-02T13:50:41.444611549Z",
36	"uplink_message": {
37	"f_port": 1,
38	"f_cnt": 2,
39	"frm_payload": "pG2EfX98h06KzbNnAA==",
40	"decoded_payload": {
41	"DO_mgPerLiter": 8.65478515625,
42	"DO_percentage": 1.274871826171875,
43	"batery_volts": 12.030029296875,
44	"cond_uSiemensPerCentimeter": 68.9453125,
45	"salinity_UPS": 56.201171875,
46	"temp_degreesC": 17.626953125
47	},

Figura 32: Trama recibida en la consola de TTN

El montaje en el que se realizaron estas pruebas se puede observar en la figura 33. Los conectores IP68 y la antena se aseguraron a la caja utilizando la masilla de sellado *Sikaflex* (figura 34). También para limitar la humedad dentro de la caja una vez se cierre se agregaron bolsas con silica gel (figura 35).

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

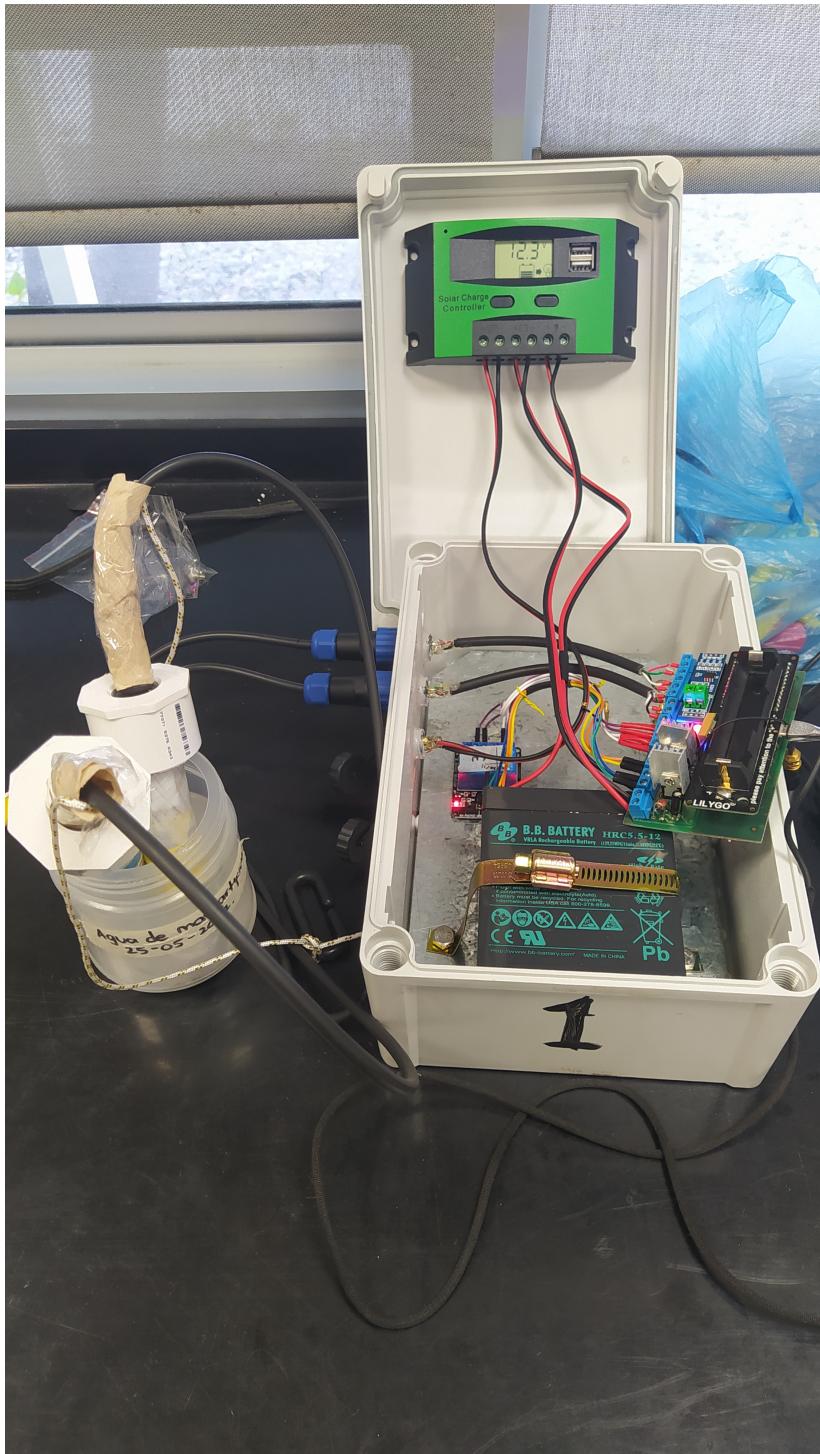


Figura 33: Montaje de medición antes de ensamblaje con el cuerpo de la boyas

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA



Figura 34: Refuerzo mediante sikaflex de los agujeros para evitar filtraciones



Figura 35: Ensamble con bolsas de silicea gel

Para el diseño de la PCB se utilizó el programa de código libre *KiCAD*. Tomando como referencia el diagrama de la figura 11 y modelando la huella del módulo MAX485 y la del microcontrolador. Se llegó al siguiente PCB:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

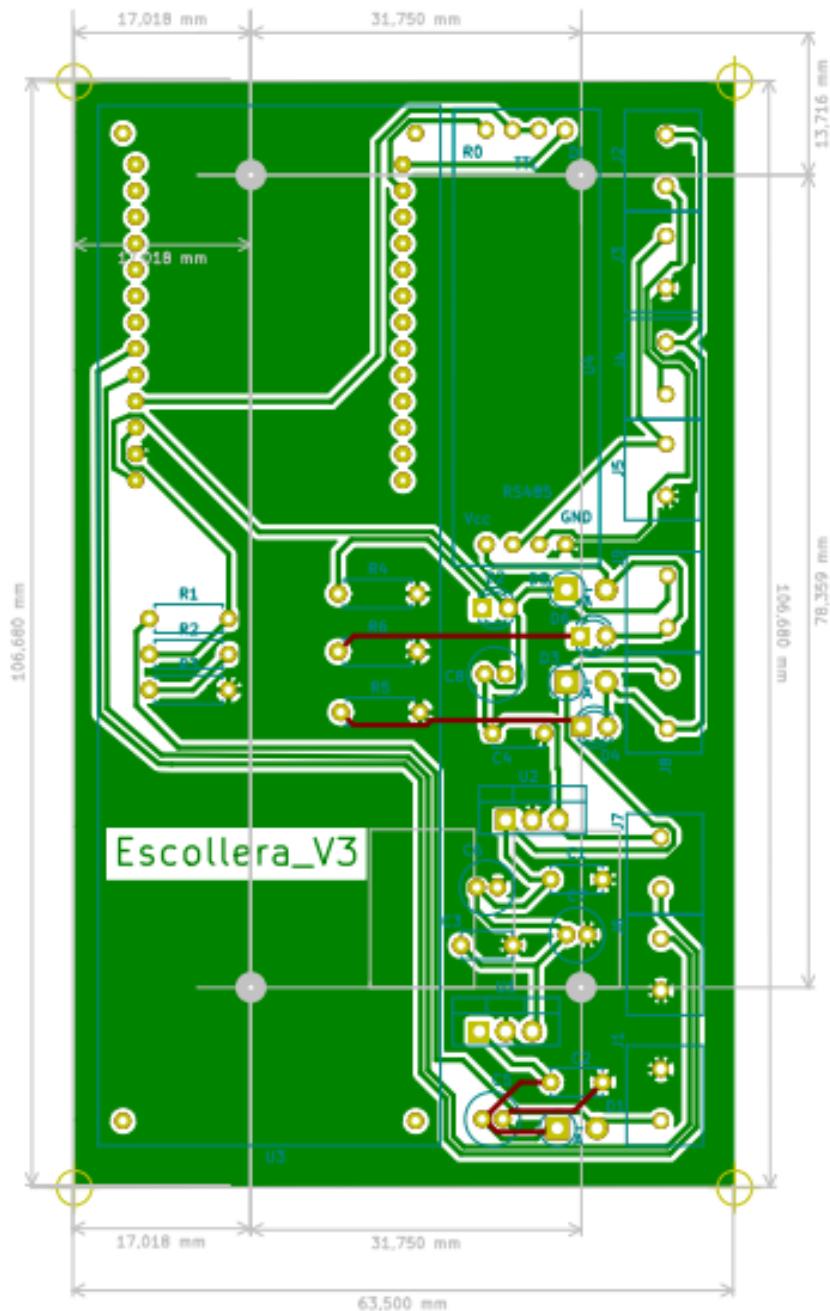


Figura 36: Circuito impreso

Cuando se mandó a imprimir la PCB los fabricantes consideraron que las pistas de cobre eran muy finas, por lo que optaron por rediseñar este aspecto de la PCB que se presentó en la figura 36, las medidas son iguales. La PCB es de tipo "Through-hole". Para soldarla soldaron en primer lugar los componentes

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

que requieren soldadura tanto en la cara inferior como la cara superior, estos serían: D1, C5, C2 C1, U2, D4, D6, D3, D5, D2. Después se procede con el resto. También se recalca que para los puntos en la capa superior que son bloqueado por borneras o por el socket para la TTGO se debió soldar quemando parte del componente para asegurar que se tuviera conducción. En la figura 38 se detalla la conexión con las borneras ya con los componente soldados.

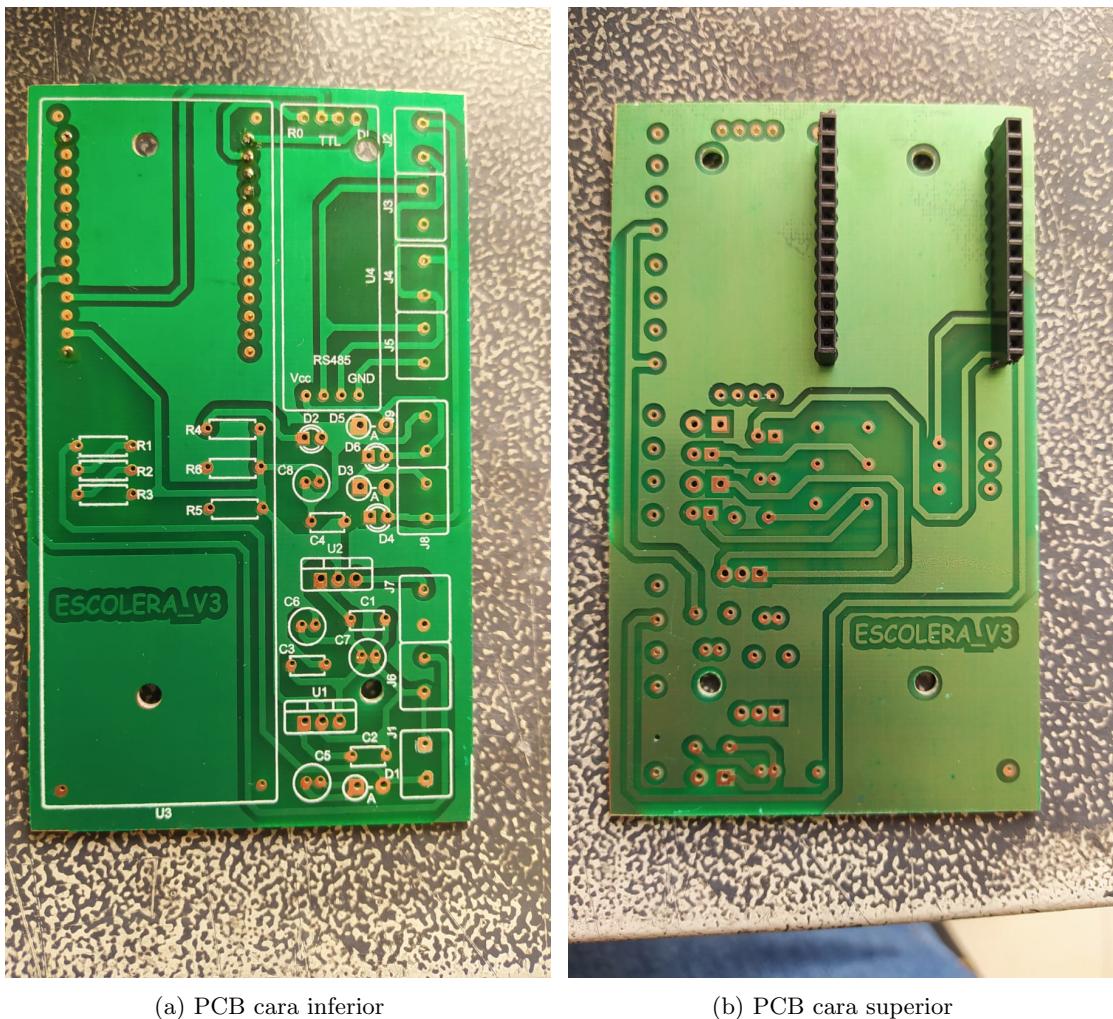


Figura 37: Resultado de la impresión de la PCB

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

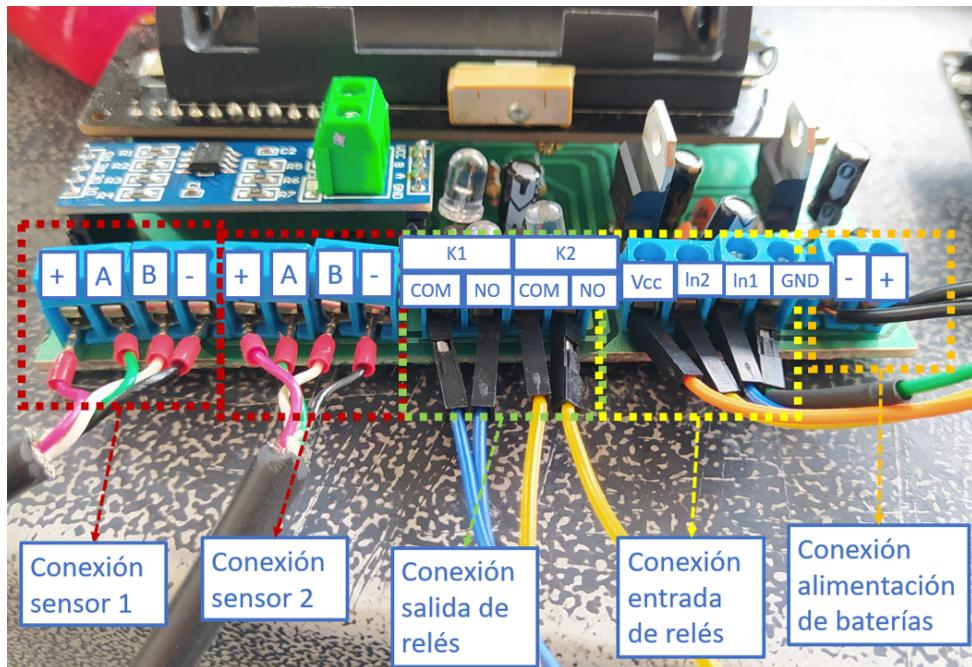


Figura 38: Conexiones de las borneras del circuito

Para el módulo de relés dual se soldaron cables en las conexiones de entrada (V_{cc} , bobina 1 (ln1), bobina 2 (ln2) y tierra (GND)) y se protegió cada pin con termo-encogible de 4mm. Para la conexión de la salida de los relés se utilizaron jumpers macho-macho, uno para el común (COM) y otro para la salida normalmente abierta (NO), esto se detalla en la figura 39.

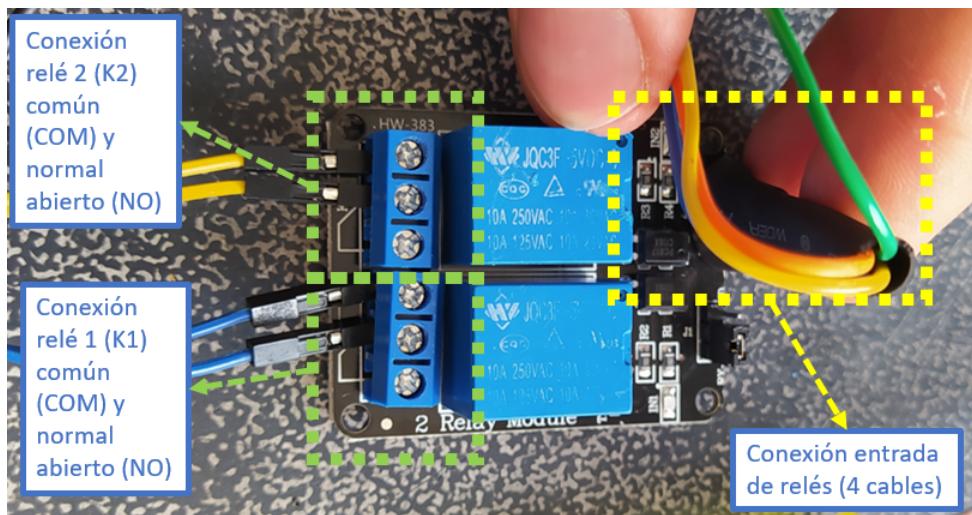


Figura 39: Conexiones del módulo dual de relés (en la conexión de entrada hay cuatro cables, el naranja es V_{cc} , el verde es la tierra, el azul es el control del relé 1 (K1) y el amarillo es el control del relé 2 (K2))

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

En la figura 40 se ve el circuito en funcionamiento, el módulo de relés dual se pegó a la placa con cinta doble faz de la marca 3M. En la figura 41 se ve el detalle de los LEDs indicadores del circuito.

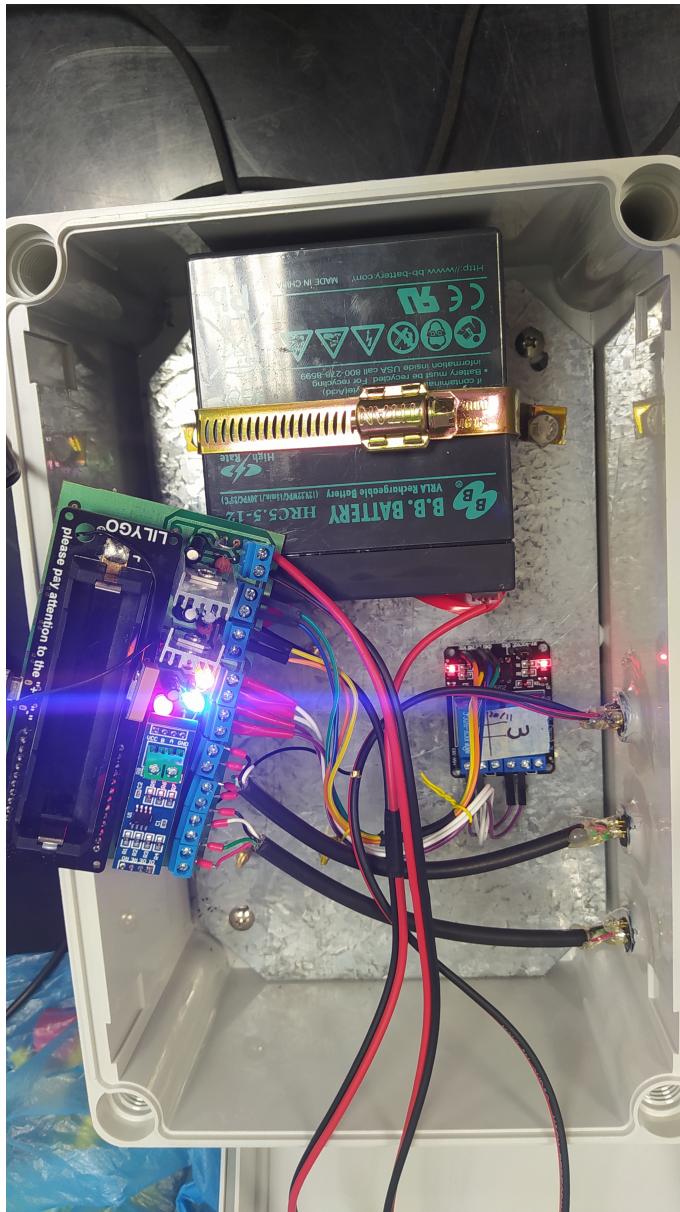


Figura 40: Interior de la caja ensamblada

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

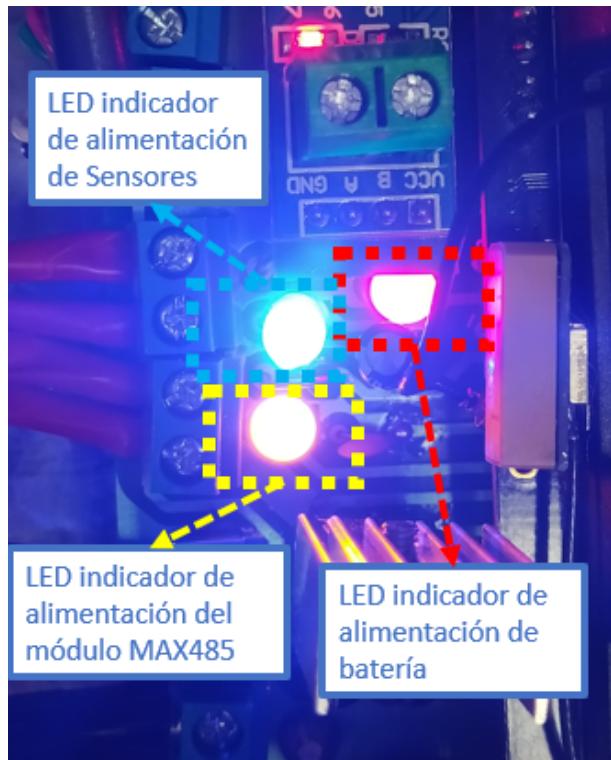


Figura 41: Detalle de LED indicadores de funcionamiento

Las cajas son marcadas con un número con pintura negra y se indica con una 'F' la dirección que se considera el frente (figura 42a), el frente es donde están los conectores (figura 42b) de los sensores y en la boya es donde está el agujero.



(a) Caja con número

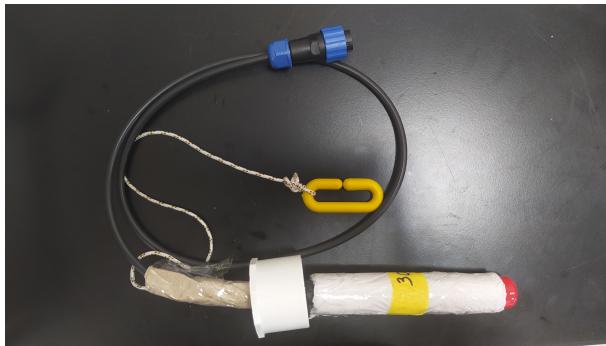
(b) Caja con marcas de conexión

Figura 42: Numeración de las cajas indicando la boya a la que acompañan y marcación de los conectores con color (azul para conductividad, amarillo para oxígeno disuelto y verde para el panel solar) y símbolo (S para conductividad y O₂ para oxígeno disuelto y PN para la conexión son el panel solar).

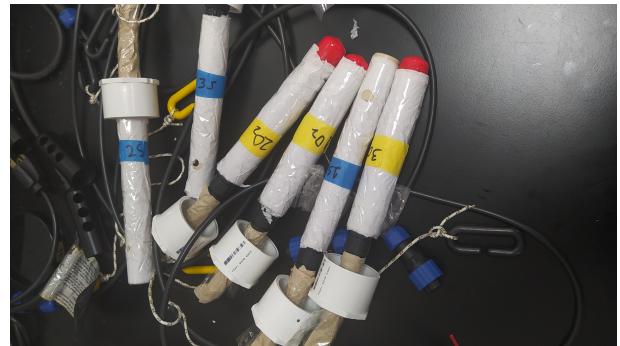
Se prepararon contenedores con tubos de PVC y se recubrieron con papel y cinta para limitar la

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

exposición de los sensores a los organismos. También se adaptó un gancho para evitar que todo el peso del sensor recayera en el cable, este gancho se engancha a uno de los perfiles que sostienen el techo.



(a) Sensor Marcado

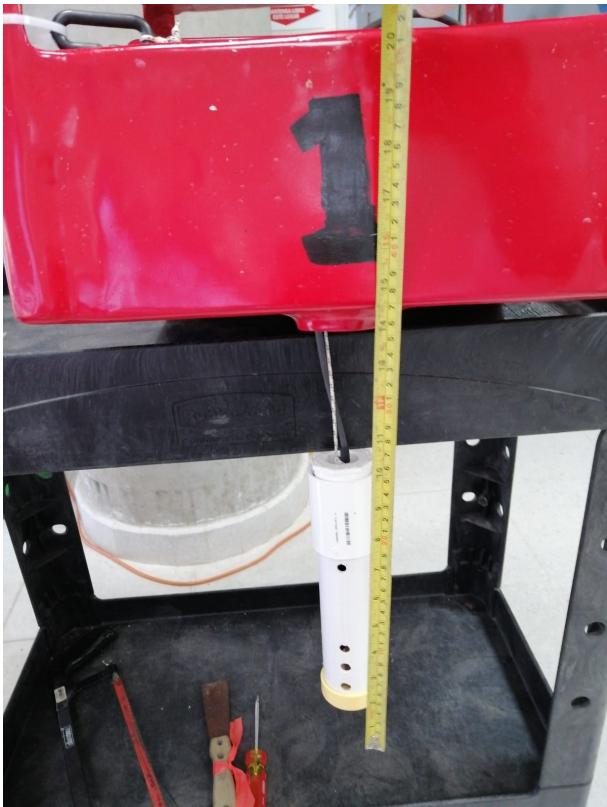


(b) Todos los sensores marcado

Figura 43: Marcación de sensores mediante número (de uno a tres), indicando la boya y la caja que acompañan, color y símbolo siguiendo la convención de la figura 42b

Algunas características del ensamblaje de la boya con la caja y los sensores fueron la consideración de una profundidad en el agua de 20cm de los sensores. A través del agujero se pasan los sensores con tapa (como en la figura 43a), una vez se hayan pasado ambos sensores se ajusta el cuerpo de la cubierta (como se observa en la figura 44a). También se utilizaron un par de correas ajustables las cuales se pasaban por unas ranuras en los rieles de la boya y ajustarla para evitar cualquier desleimiento (figura 44b).

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA



(a) Medida de profundidad del sensor colgando



(b) Aseguramiento de la caja a la boyta mediante correas

Figura 44: Detalles de la caja y la boyta

La instalación del gateway tuvo dificultades debido a que la primera ubicación en la que se pensaba emportar, cerca a un módem de Wi-Fi, dejaba muchos obstáculos entre el gateway y la boyta, sobretodo una viga que dificultaba la transmisión. Por lo que se optó por un lugar más elevado y con el menor número de obstáculos posibles, el balcón de la discoteca fue una ubicación ideal pues después de la instalación (figura 45a) no se detectaron perdida de datos. La dificultad del balcón era la conexión con internet que se resolvió utilizando una SIM card con un plan de datos. Otro problema que se resolvió fue la alimentación del gateway, se tuvo que pasar una extensión hasta la multitoma más cercana (figura 45b).

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA



(a) gateway empotrado (b) Conexión de alimentación para el gateway

Figura 45: Montaje de gateway en el balcón de la discoteca

Para poner la boyas en la ubicación de flotación se utilizó una balsa inflable pequeña, donde caben máximo dos personas junto con la boyas. Al estar en la ubicación se desliza con cuidado hasta sacarla completamente de la balsa, se sostiene mientras se estabiliza. Un problema que se tuvo fue desequilibrio debido al peso de la batería, se logró improvisar con unos pesos hasta que la boyas se estabilizó (figura 46).

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA



Figura 46: Boya ensamblada flotando en la laguna

5. Conclusión

Los resultado fueron parcialmente exitosos, en el sentido técnico, tanto del diseño electrónico como de la arquitectura de redes. Se obtuvo un sistema de transmisión de datos sustentable con energía solar estructurado en arquitectura LoRaWAN. La utilidad de este tipo de dispositivos de ratifico viendo las posibilidades que traía y el trabajo que ahorra en descarga y análisis de datos con el servidor de aplicaciones. Sin embargo se encontraron algunos problemas en los que se debe trabajar para asegurar la fiabilidad y utilidad del sistema. Entre los problemas encontrados el más relevante fue que la medición de las sondas mediante el microcontrolador resultaba con una variabilidad y poca exactitud que efectivamente las vuelve inútiles para mediciones reales del ambiente. Otro problema en el que se debe trabajar para un futuro desarrollo es que el sistema debe tener la capacidad de tener hora local para poder sincronizar las mediciones de manera apropiada, sin esta característica surgen dos problema: si varía mucho el tiempo entre mediciones en las distintas boyas las mediciones de cierta hora en distintos puntos de la laguna no podrían compararse; y, dado que la boya transmite cada 30 minutos, a medida que avance el tiempo de forma inconstante la hora en la lectura de los datos va a ser distinta lo cual dificulta la comparación entre medidas de distintos periodos de tiempo. Otro problema relavante fue la baja confiabilidad del hardware, las PCB que se probaron en Bogotá tuvieron varios problemas al probarlas en Santa Marta, esto generó problemas y no se lograron posicionar las 3 boyas, por lo que un futuro desarrollo debe resolver este problema de fiabilidad del hardware.

Respecto a la integración del sector privado y el sector académica se tuvieron éxitos y se encontraron problemas. Entre los éxitos que se obtuvieron fue que se logró un trabajo constante y ameno entre las partes con constantes reuniones y una búsqueda por lograr que el proyecto prosperara. Entre los problemas que ocurrieron es que la burocracia interna tanto del sector educativo y como del sector privado generaban retrasos en la compra de equipo. Otro problema fue la rotación del encargado desde el sector privado en las primeras etapas de proyecto, esto provoco que la planeación de los componentes y equipos fue hecho por una persona, luego retomada por otra persona que agregó otros componentes y equipos sin completo entendimiento de lo que ya se tenía, esto implicó rediseños más adelante en el panel solar y también la elección del microcontrolador TTGO que en retrospectiva pudo no ser la mejor elección para este proyecto debido a tiempos de importación y a problemas sin suficiente documentación del microcontrolador. Cabe decir que estos rediseños implicaron trabajo y también retrasos respecto al cronograma.

6. Anexos

6.1. Cálculos energéticos

Se parte de una aproximación de los valores de consumo de cada componente con los valores de tensión y corriente de consumo. También se asumen valores para una batería de 12 voltios y 4 amérios hora (figura 47). Se observa el resultado de horas de autonomía en la figura 48.

	voltaje[V]	corriente[Ah]	potencia[Wh]
$P_{batería}$	12	4	48
	voltaje[V]	corriente[A]	potencia[W]
P_{W520}	12	0,05	0,6
P_{W504}	12	0,05	0,6
P_{ttgo}	5	0,014	0,07
P_{max485}	5	0,0005	0,0025
P_{max485}	5	0,0005	0,0025
P_{7805}	7	0,005	0,035
P_{7812}	2,8	0,008	0,0224
Relé dual	5	0,14	0,7
TOTAL			2,0324

Figura 47: Aproximación de potencia necesaria de las baterías

Potencia batería[Wh]	48
Potencia consumida[W]	2,0324
Horas de autonomía	23,6174

Figura 48: Resultado horas potencia y horas de autonomía

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

Componente	Tensión de trabajo	Corriente de trabajo	Potencia de trabajo
W520	DC 5-12V +/-5 %	Current< 50mA	1 W
W504	DC 8-26V ±10 %	Current< 50mA	1 W
LoRa32 ttgo	5 V	10-14 mA	1 W
Módulo conversor TTL a RS485	5 V	500 μ A (máx)	830 mW
LM7805	7-25 V de entrada*	5 mA	0,035 W
LM7809	11-35 V de entrada**	8 mA***	0,0224 W
Relé 2 canales	5V	140 mA	0,7 W

Cuadro 3: Potencia consumida por componentes eléctricos

Después se realizó un cálculo más detallado (figura 49) en el se toma en consideración que no se mantendrán activados todos los componentes todo el tiempo, en particular los sensores y el módulo de comunicación MAX485 se activan 2 horas diarias, 5 minutos cada hora para realizar las mediciones y luego se desactivan para ahorrar energía. El módulo relé de 2 canales no tiene consumo mientras no esté activado por lo que estaría activado igual que los sensores y el MAX485.

	Cantidad	Potencia de trabajo[W]	Horas de uso diario	Consumo diario[Wh/dia]	Consumo por hora[Wh]
W520	1	1	1	2	0,083
W504	1	1	1	2	0,083
Lora32 ttgo	1	1	24	24	1
MAX485	2	0,83	2	3,32	0,138
LM7805	1	0,035	24	0,84	0,035
LM7812	1	0,022	24	0,538	0,022
Módulo relé 2 canales	1	0,7	2	1,4	0,058
TOTAL				34,098	1,421

Figura 49: Consumo diario de la boyas

La gráfica de la figura 50 que se obtuvo de valores, proporcionados por el profesor Sven Zea, de la intensidad lumínica incidente en la Escollera medida en lux de cuatro días de distintas estaciones del final del año de 2020 y del año 2021 (18 de diciembre de 2020, 26 de marzo de 2021, 13 de junio de 2021 y el 25 de septiembre de 2021).

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

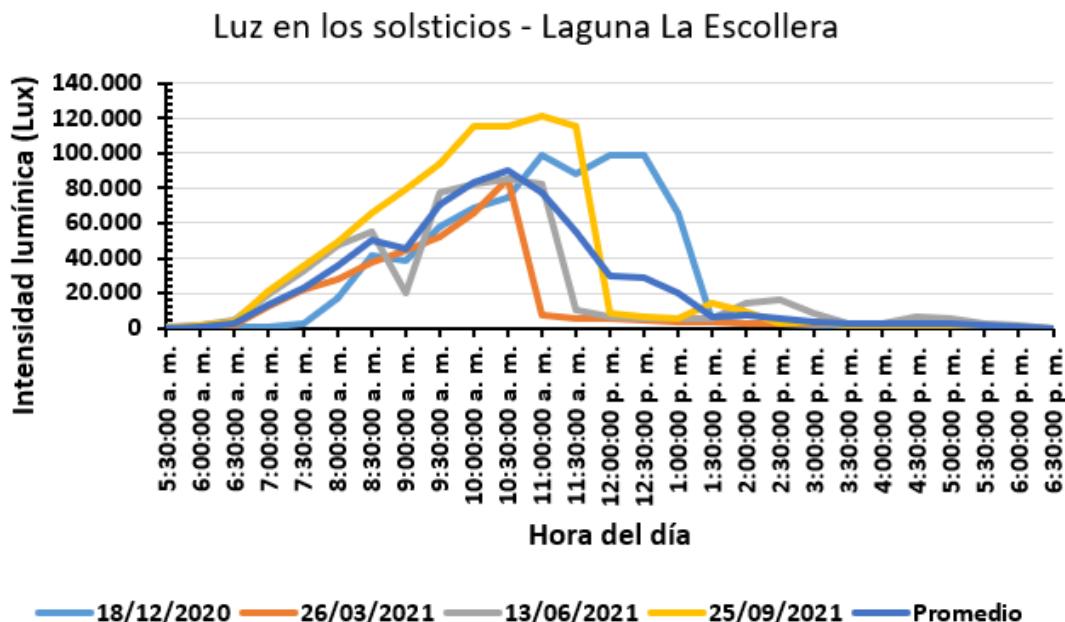


Figura 50: Intensidad lumínica (lux) en superficie de la laguna La Escollera para fechas cercanas a los solsticios. Datos obtenidos con un registrador electrónico HOBO Pendant luz/temperatura 64k. Las caídas en intensidad hacia el medio día corresponden a la sombra que dan los árboles de manglar que rodean la laguna, debido a que el registrador se encuentra cerca a la orilla.

Se encontró la época de menor incidencia de luz (26 de marzo del 2021) para considerar la situación más crítica. Se usó la equivalencia discutida en la guía de conversión entre irradiancia solar e iluminancia [10] en que 120 lux es equivalente a 1 Watt por metro cuadrado. En la figura 52 se ve la comparación entre el promedio de la irradiancia y el día con menor incidencia de irradiancia.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

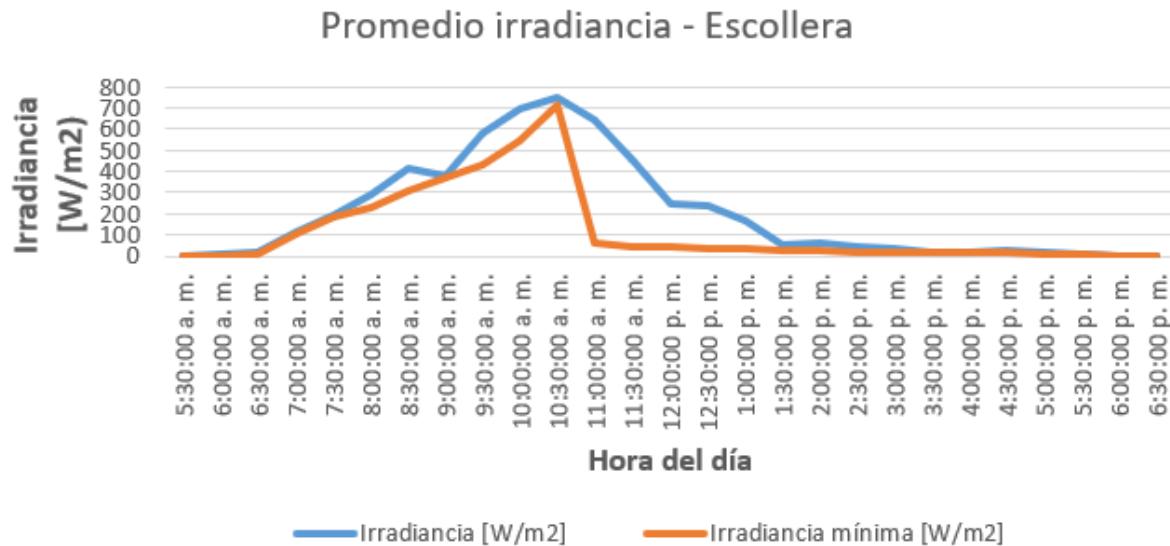


Figura 51: Irradiancia máxima y mínima

Considerando lo anterior se realizó el cálculo de la hora solar pico (HSP), dado que el panel solar no provee toda la energía en todo momento sino dependiendo de las condiciones solares se usa la HSP para relacionar irradiancia y tiempo, consiste en tomar la irradiancia total en un día (sumar todos los valores) y este dividirlo en el valor hipotético de 1000 W/m^2 . En este caso la irradiancia por día mínima es de $3292,8725 \text{ W/m}^2/\text{día}$, este valor se divide en el valor hipotético para obtener una HSP mínima de 3,3 horas. Cabe mencionar que se asume un factor de corrección atmosférico de 1 y un factor k, debido a una inclinación de 0 grados, de 1.

Esto se contrasta con los valores de irradiancia que proporciona el IDEAM en su informe: "Irradiación global horizontal medio diario anual del año 2014"

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

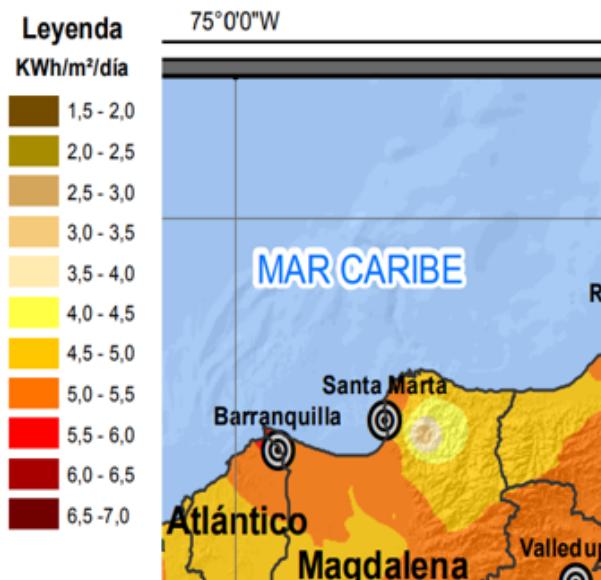


Figura 52: Irradiancia Santa Marta 2014

Lo que significa la HSP es la cantidad de horas en las que se tiene una hipotética irradiancia de 1000 W/m^2 , o sea un trabajo de 100 % del panel solar. Esto permite verificar restando hora a hora el consumo y asumiendo que durante esas horas (usualmente se asumen alrededor de medio día) de la HSP se recarga con el 100 % las baterías van a soportar sin descargarse. Esto se cumple con una batería de 12 voltios y 4 amperios hora y un panel solar de 20 W. El panel elegido posee las características detalladas en la figura 54 y la batería recargable usada es de referencia HRC5.5-12 , esto es de 12 voltios y 5.5 amperios hora, hay que tener en cuenta los efectos de la temperatura en la vida útil de la batería especificados en la hoja de datos, a 50°C se tiene un año de expectativa de vida.

Consumo diario boyas[Wh]	34,0976
Consumo por hora boyas[W]	1,42073333
Hora solar mínima[h]	3,3
Potencia fotovoltaica min[W]	10,35
Elección de panel[W]	20

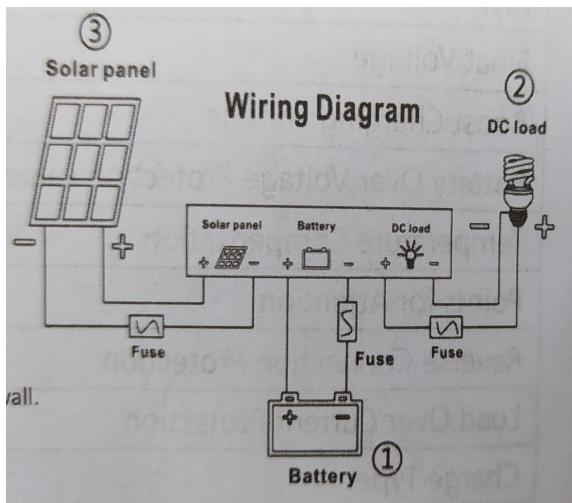
Figura 53: Cálculo de potencia de panel solar

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

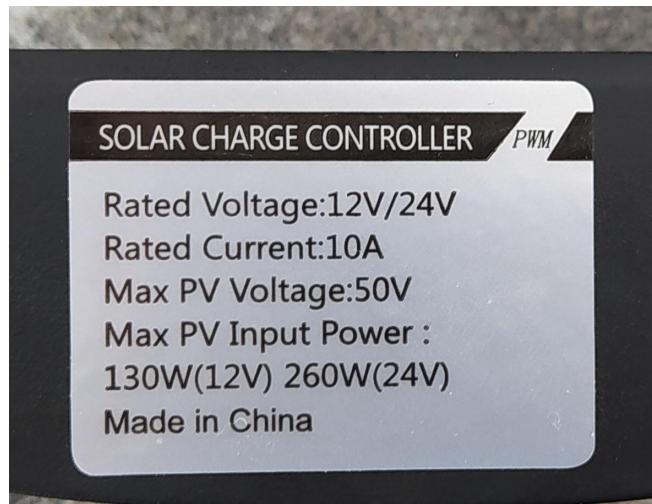
Restarsolar Quality Maker®
Restarsolar, power the life

Model Type	RTM020P
Electrical Characteristics	
Rated Maximum Power (Pmax)	20W
Power Tolerance Range	0~+5W
Open Circuit Voltage (Voc)	21.60V
Peak Voltage (Vmp)	18.20V
Short Circuit Current (Isc)	1.24A
Peak Current (Imp)	1.10A
Max. System Voltage	1000V
Max.Series Fuse Rating	15A
Module Application	Class A
Dimension	450*350*25mm
All technical data at standard test condition: Am1.5 , E=1000W/m ² , Tc=25C	

Figura 54: Características panel solar



(a) Diagrama de conexión sistema fotovoltaico



(b) Especificaciones de controlador de carga solar PWM

Figura 55: Información adicional sobre conexión y controlador de carga

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

Hora	Energía de batería		
	dia 1	dia 2	dia 3
12:00:00 a. m.	48,00	32,37	32,37
12:30:00 a. m.	47,29	31,66	31,66157
1:00:00 a. m.	46,58	30,95	30,9512
1:30:00 a. m.	45,87	30,24	30,24083
2:00:00 a. m.	45,16	29,53	29,53047
2:30:00 a. m.	44,45	28,82	28,8201
3:00:00 a. m.	43,74	28,11	28,10973
3:30:00 a. m.	43,03	27,40	27,39937
4:00:00 a. m.	42,32	26,69	26,689
4:30:00 a. m.	41,61	25,98	25,97863
5:00:00 a. m.	40,90	25,27	25,26827
5:30:00 a. m.	40,19	24,56	24,5579
6:00:00 a. m.	39,48	23,85	23,84753
6:30:00 a. m.	38,77	23,14	23,13717
7:00:00 a. m.	38,05	22,43	22,4268
7:30:00 a. m.	37,34	21,72	21,71643
8:00:00 a. m.	36,63	21,01	21,00607
8:30:00 a. m.	35,92	20,30	20,2957
9:00:00 a. m.	35,21	19,59	19,58533
9:30:00 a. m.	34,50	18,87	18,87497
10:00:00 a. m.	48,00	38,16	38,16
10:30:00 a. m.	48,00	48,00	48,00
11:00:00 a. m.	48,00	48,00	48,00
11:30:00 a. m.	48,00	48,00	48,00
12:00:00 p. m.	48,00	48,00	48,00
12:30:00 p. m.	48,00	48,00	48,00
1:00:00 p. m.	48,00	48,00	48,00
1:30:00 p. m.	47,29	47,29	47,28963
2:00:00 p. m.	46,58	46,58	46,57927
2:30:00 p. m.	45,87	45,87	45,8689
3:00:00 p. m.	45,16	45,16	45,15853
3:30:00 p. m.	44,45	44,45	44,44817
4:00:00 p. m.	43,74	43,74	43,7378
4:30:00 p. m.	43,03	43,03	43,02743
5:00:00 p. m.	42,32	42,32	42,31707
5:30:00 p. m.	41,61	41,61	41,6067
6:00:00 p. m.	40,90	40,90	40,89633
6:30:00 p. m.	40,19	40,19	40,18597
7:00:00 p. m.	39,48	39,48	39,4756
7:30:00 p. m.	38,77	38,77	38,76523
8:00:00 p. m.	38,05	38,05	38,05487
8:30:00 p. m.	37,34	37,34	37,3445
9:00:00 p. m.	36,63	36,63	36,63413
9:30:00 p. m.	35,92	35,92	35,92377
10:00:00 p. m.	35,21	35,21	35,2134
10:30:00 p. m.	34,50	34,50	34,50303
11:00:00 p. m.	33,79	33,79	33,79267
11:30:00 p. m.	33,08	33,08	33,0823

Figura 56: Verificación de sistema energético

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

6.2. Modelado físico

Se realizó un modelado en *inventor Autodesk* para tener claridad sobre la relación espacial entre componentes y tener la seguridad de que las dimensiones no sobrepasan ciertos límites, especialmente con los componentes eléctricos y electrónicos (panel solar, PCB, batería, controlador de carga,) y tener seguridad de cómo se posicionarán y ensamblaran los componentes.

Se consultó con el experto para hacer un bosquejo preliminar de la boyá:

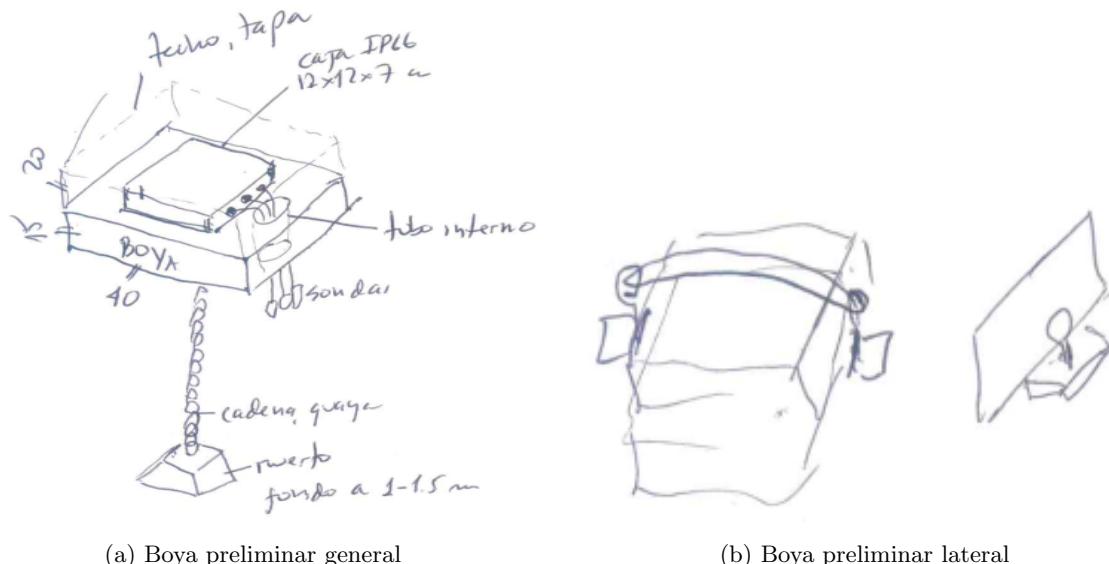


Figura 57: Bosquejo inicial boyá

Las imágenes que se anexan son versiones desactualizadas pero que mantienen la organización de los componentes más voluminosos (panel solar, caja eléctrica, boyas y sondas)

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

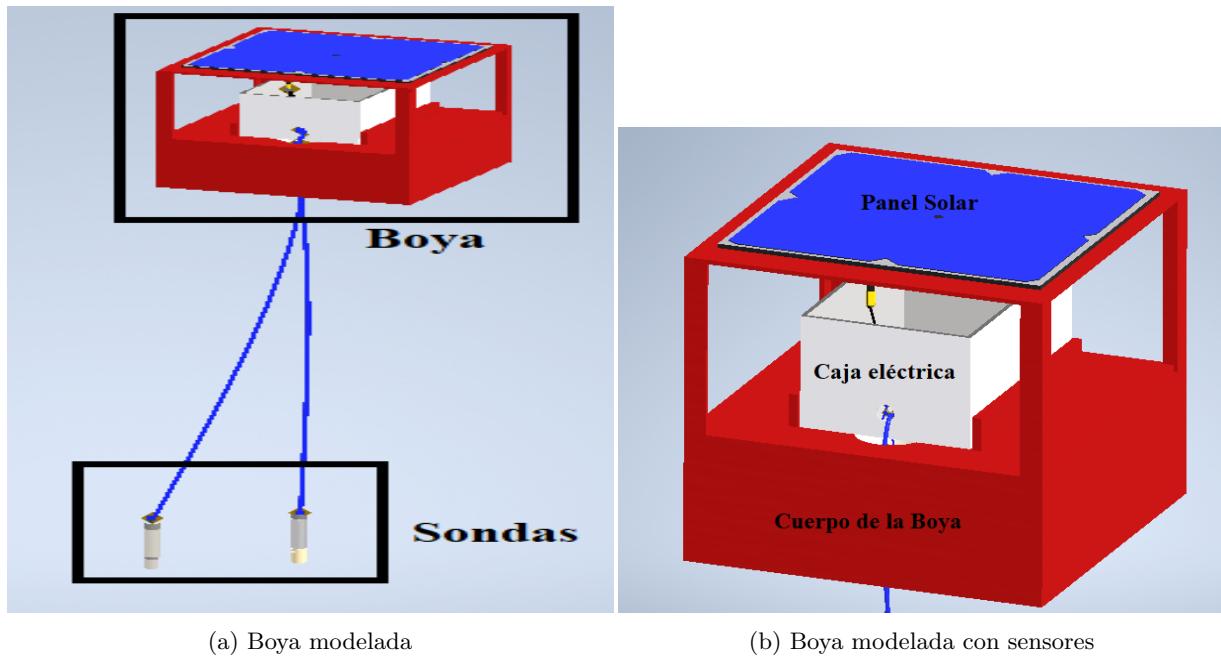


Figura 58: Modelado de la boyas

6.3. Comunicación RS485

Para el código se usó la librería para modbus *ModbusMaster* y los detallados manuales que proveyó la compañía *Winmore* sobre la comunicación de las sondas mediante el protocolo de modbus RTU de los cuales se tomaron imágenes de ejemplos mostrados en los instructivos con las operaciones más relevantes para la aplicación y se insertan en este anexo para mayor comprensión.

6.3.1. Sensor de oxígeno disuelto

Se procedió aplicando la recomendación de la guía tomando 10 medidas consecutivas con una pausa de un segundo entre medidas y tomando el promedio como el dato a entregar (figura 59). La sonda entrega datos de porcentaje de saturación de oxígeno:

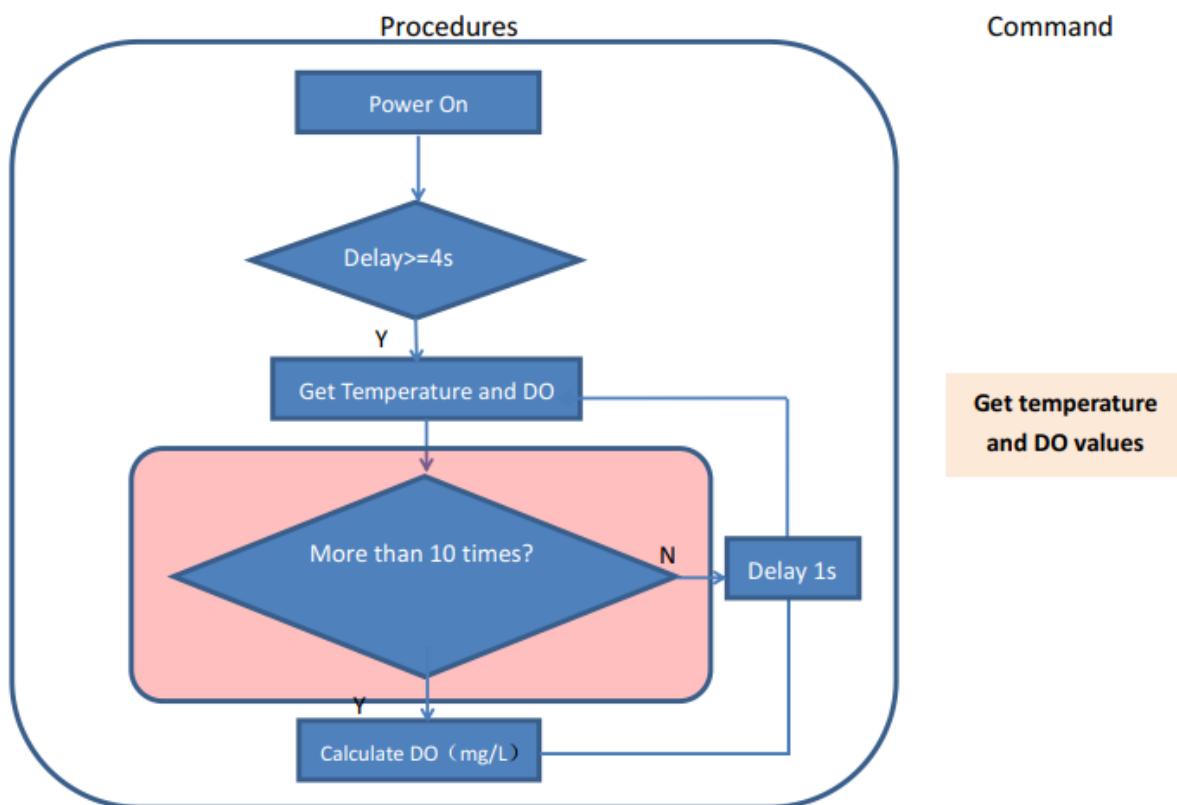


Figura 59: Diagrama de flujo sugerido para la operación *GetTemperatureAndDO*

Para comunicarse se envía uno a uno los bytes en hexadecimal mediante el protocolo modbus en que primero se tiene el ID del esclavo, luego el código de función, en este caso se va a leer un dato del sensor por lo que se usa el código 3. Se prosigue con la dirección en que se iniciará la lectura, luego el número de

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

registro que se va a leer y, finalmente, se envía un código de verificación CRC. En esto consiste la trama de petición que se envía del microcontrolador al sensor:

Definition	Device address	Function code	Start address		Number of registers		CRC	
Byte	0	1	2	3	4	5	6	7
Value	0x01	0x03	0x26	0x00	0x00	0x06	0xce	0x80
	0x01	0x03	0x26	0x02	0x00	0x02	0x6e	0x83

Figura 60: Ejemplo de trama de petición *GetTemperatureAndDO*

La trama que se recibe consiste en el ID del esclavo, el código de función que se usó en la petición, el número de bytes que se reciben como respuesta y el valor de los registros que se solicitaron. En el caso del sensor de oxígeno disuelto son tres valores cada uno compuesto por 4 bytes y el código de verificación CRC:

Definition	Device address	Function code	Number of bytes	Register value			CRC	
Byte	0	1	2	3-6	7-10	11-14	15	16
Value	0x01	0x03	0x0C	17.625	0.958	8.72	0x12	0x65
	0x01	0x03	0x04	0.958				

Figura 61: Ejemplo de trama de respuesta *GetTemperatureAndDO*

Estos serían los valores en sistema decimal para la trama de respuesta del ejemplo (figura 62):

Temperature(17.625)				DO Value(0.958)				DO Value(8.72)			
0x00	0x00	0x8D	0x41	0x83	0x5B	0x75	0x3F	E8	88	0B	41

Figura 62: Ejemplo valores de respuesta *GetTemperatureAndDO*

6.3.2. Sensor de conductividad

De manera similar al anterior sensor, se repite la medición 10 veces con una pausa de un segundo entre medidas y se calcula el promedio como respuesta. El sensor entrega el dato en microsiemens por centímetro (figura 63):

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

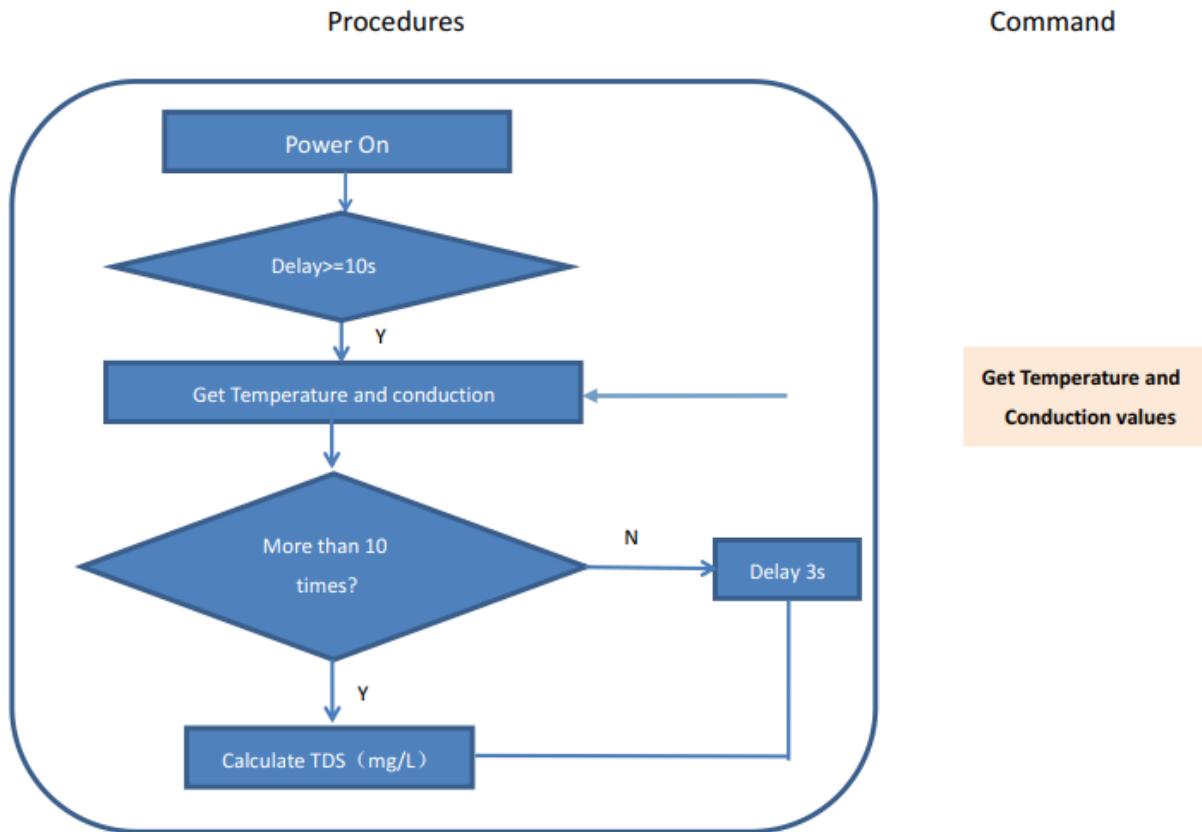


Figura 63: Diagrama de flujo sugerido para la operación *GetTemperatureAndConductivity*

La trama de petición es igual a la del sensor de oxígeno disuelto, para la aplicación concretamente se usa el sensor de conductividad con un ID de 2 (figura 64):

Definition	Device address	Function code	Start address		Number of registers		CRC	
Byte	0	1	2	3	4	5	6	7
Value	0x01	0x03	0x26	0x00	0x00	0x05	0x8E	0x81

Figura 64: Ejemplo trama de petición *GetTemperatureAndConductivity*

La trama de respuesta es similar al otro sensor (figuras 65 y 66):

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

Definition	Device address	Function code	Number of bytes	Register value					CRC	
Byte	0	1	2	3-6	7-10	11	12	13	14	
Value	0x01	0x03	0x0A	17.625	7.625	0x00	0x00	0Xc7	0x33	

Figura 65: Ejemplo trama de respuesta *GetTemperatureAndConductivity*

Temperature(17.625)				Conductivity/Salinity(7.625)				Error flag(11)	Reserved (12)
0x00	0x00	0x8D	0x41	0x00	0x00	0x8D	0x41	0x00	0x00

Figura 66: Ejemplo valores de respuesta *GetTemperatureAndConductivity*

6.3.3. Función de bytes to float

Se adjunta el código usado para obtener el valor de la respuesta en variable tipo *float* con base en la respuesta en bytes, esta función se ofrece en el instructivo de *Winmore* y se le hacen una leves modificaciones en las variables de entrada de la función para que se acoplaran a la manera en que se recibían los datos:

```

1 float bytesToFloat(long int byte3, long int byte2, long int byte1, long int byte0)
2 {
3     long int realbyte0, realbyte1, realbyte2, realbyte3;
4     char S;
5     long int E, M;
6     float D;
7     realbyte0 = byte3;
8     realbyte1 = byte2;
9     realbyte2 = byte1;
10    realbyte3 = byte0;
11    if ((realbyte0 & 0x80) == 0) {
12        S = 0; //Positive
13    }
14    else {
15        S = 1; //Negative
16    }
17    E = ((realbyte0 << 1) | (realbyte1 & 0x80) >> 7) - 127;
18    M = ((realbyte1 & 0x7f) << 16) | (realbyte2 << 8) | realbyte3;
19    D = pow(-1, S) * (1.0 + M / pow(2, 23)) * pow(2, E);
20    return D;

```

Listing 1: Código de ejemplo de bytes a float

A continuación se agrega un diagrama donde se ilustra la comunicación entre los sensores y el microcontrolador TTGO (figura 67):

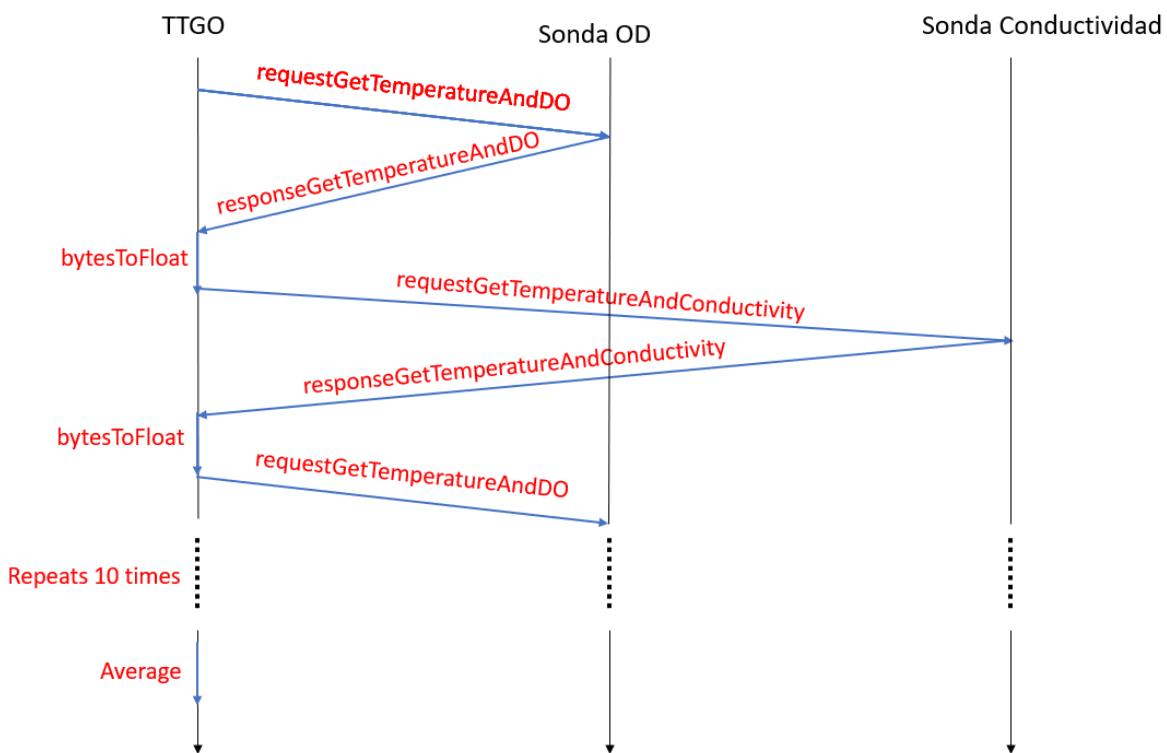


Figura 67: Diagrama ilustrativo de cómo se estructura la comunicación entre el microcontrolador y las sondas

Para el cálculo de concentración de oxígeno disuelto con base al porcentaje de oxígeno disuelto medido por la sonda se usó la fórmula que provee el fabricante en la hoja de datos. Para la salinidad en unidades prácticas se usó la información proveída en la página salinometry.com.

6.4. Calibración y mantenimiento de sensores

La calibración de los sensores lleva acabo mediante el software que proporciona *Winmore*. Para ello se utiliza una conexión RS485 a USB, para el proyecto se utilizó un conversor USB a RS485 disponible comercialmente, se realizó una conexión entre los pines (pin de 5 voltios y pin de tierra) al interior de

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

este módulo con pines (positivo y negativo respectivamente) en un módulo step-up de voltaje ajustable (XL6009) para obtener una salida de 9 voltios; de esa manera se puede conectar las sondas al computador sin necesidad de alimentación externa para realizar el proceso de calibración desde el software que provee el fabricante, usando condiciones y soluciones estándar de valor conocido en las que se ubican los sensores. El firmware del sensor incorpora las constantes de calibración, de tal manera que, una vez reconectados al sistema de la caja, permanecerán con dicha calibración. Se utilizará la calibración de un punto para ambos sensores. Esto es, 100 % de saturación de oxígeno para oxígeno disuelto, y la solución estándar comercial de 50 mS/cm de conductividad a 25 °C (YSI 3169, hecha de cloruro de potasio, KCl, al 3,30 %). Para oxígeno está la opción de añadir un segundo punto de calibración si se tiene una solución de sulfito de sodio (1 g/L) para el valor de 0 % de saturación).

6.4.1. Calibración y mantenimiento del sensor de oxígeno disuelto

Para el sensor de oxígeno disuelto se usará una esponja humedecida que trae el sensor en la cubierta de la punta; se deja unos minutos al aire después de humedecido, se pone en la tapa del sensor (sin que la espuma toque la superficie de medida) y se espera al rededor de 10 minutos. Este ambiente provee el valor de referencia de 100 % de saturación de oxígeno y el software calibrará automáticamente los valores para K y B (constante de calibración usadas por el sensor) y los agregará al *firmware* del sensor (figura 68).

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

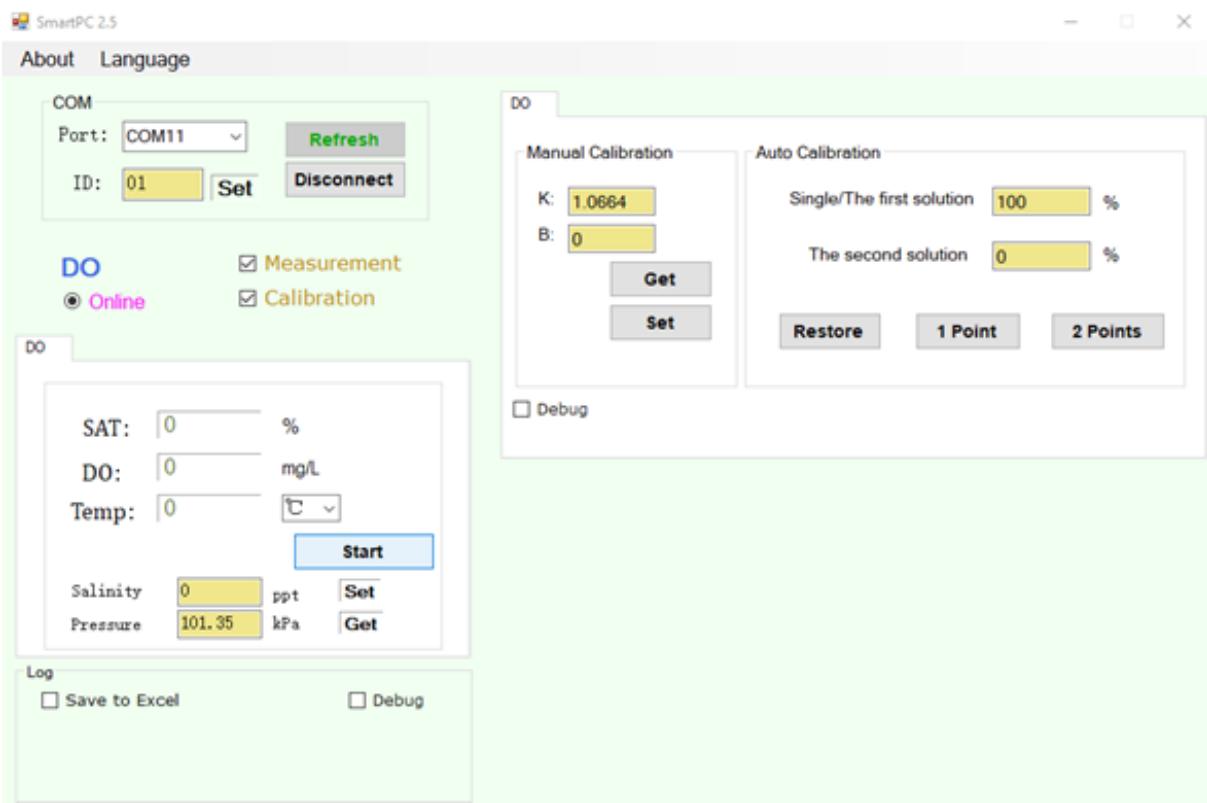


Figura 68: Interfaz de calibración del sensor de oxígeno disuelto del software que provee la compañía *Winmore*

Para el mantenimiento lo más esencial es mantener limpia la tapa fluorescente del sensor (figura 69) esta debe cambiarse cada año, ya que es un item removible que si no se cambia afecta la medición de datos irremediablemente. Para cambiarlo solo hay que desatornillar la tapa fluorescente y reemplazarla con una nueva; después de este proceso se debe volver a calibrar el sensor. También se debe calibrar el sensor regularmente cada 15-20 días (al menos una vez al mes), para asegurar que los datos no tenga exceso de error y limpiarlo de toda la suciedad que acumule del mar. También es importante revisar, engrasar, limpiar, y si se requiere reemplazar el empaque (*O-ring*) rojo que sella la conexión entre la tapa fluorescente y el cuerpo de la sonda. Esta debe cambiarse cada 6 meses a un año de uso y cada vez que se reemplace la tapa fluorescente.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA



Figura 69: Tapa fluorescente y empaque (O-ring) del sensor de oxígeno disuelto (izquierda); conector entre el cable y el cuerpo del sensor (derecha)

6.4.2. Calibración y mantenimiento del sensor de conductividad

Para calibrar el sensor de conductividad también se sigue el método de un solo punto utilizando (figura 70) una solución estándar de conductividad conocida (en este caso KCL al 3,3% que tiene una conductividad de 50 mS/cm) en una taza pequeña que alcance a cubrir el cabezal del sensor, no es necesario sumergir toda la sonda.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

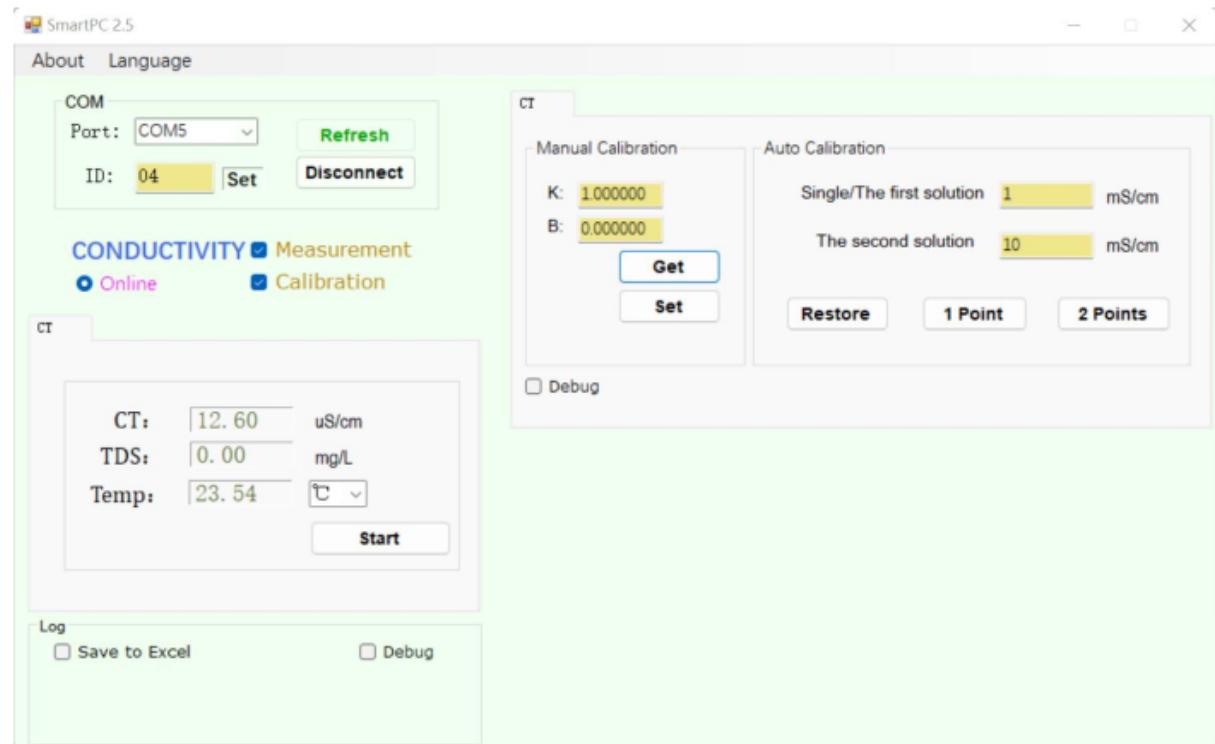


Figura 70: Interfaz de calibración del sensor de conductividad del software que provee la compañía *Winmore*

6.5. Código payload formatter

El siguiente es el código usado para darle un formato legible a la respuesta enviada por el microcontrolador a *TTN*:

```
1 function Decoder(bytes, port) {
2     // Decode an uplink message from a buffer
3     // (array) of bytes to an object of fields.
4     var decoded = {};
5
6     // temperature of the conductivity sensor
7     rawTempArrayCond = bytes[0] + bytes[1] * 256;
8     decoded.cond_degreesC = sflt162f(rawTempArrayCond) * 100;
9
10    // conductivity of the conductivity sensor
11    rawCondArray = bytes[2] + bytes[3] * 256;
12    decoded.cond_mgPerLiter = sflt162f(rawCondArray) * 100;
13}
```

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

```
14 // temperature of the DO sensor
15 rawTempArrayDO = bytes[4] + bytes[5] * 256;
16 decoded.D0_degreesC = sflt162f(rawTempArrayDO) * 100;
17
18 // pecentage of dissolved oxigen of the DO sensor
19 rawD0p = bytes[6] + bytes[7] * 256;
20 decoded.D0_percentage = sflt162f(rawD0p) * 100;
21
22 // value of dissolved oxigen of the DO sensor
23 rawD0v = bytes[8] + bytes[9] * 256;
24 decoded.D0_mgPerLiter = sflt162f(rawD0v) * 100;
25
26 return decoded;
27 }
28
29 function sflt162f(rawSflt16)
30 {
31
32 // throw away high bits for repeatability.
33 rawSflt16 &= 0xFFFF;
34
35 // special case minus zero:
36 if (rawSflt16 == 0x8000)
37     return -0.0;
38
39 // extract the sign.
40 var sSign = ((rawSflt16 & 0x8000) !== 0) ? -1 : 1;
41
42 // extract the exponent
43 var exp1 = (rawSflt16 >> 11) & 0xF;
44
45 // extract the "mantissa" (the fractional part)
46 var mant1 = (rawSflt16 & 0x7FF) / 2048.0;
47
48 // convert back to a floating point number. We hope
49 // that Math.pow(2, k) is handled efficiently by
50 // the JS interpreter! If this is time critical code,
51 // you can replace by a suitable shift and divide.
52 var f_unscaled = sSign * mant1 * Math.pow(2, exp1 - 15);
```

```
53
54     return f_unscaled;
55 }
```

Listing 2: Decoder function for payload formatter

Referencias

- [1] Kais Mekki and Eddy Bajic and Frederic Chaxel and Fernand Meyer. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT Express*, 5(1):1–7, 2019.
- [2] Termodinámica. Medición óptica de oxígeno en centrales de energía. <https://www.termodinamica.cl/power-dissolved-oxygen>, Septiembre 2021.
- [3] Apera Instruments. Do850 portable dissolved oxygen meter kit. https://aperainst.com/do850-portable-dissolved-oxygen-do-meter-kit?__store=spanish&__from_store=default, Septiembre 2021.
- [4] Sven Zea and Nicolás Espada Gómez-Lor. Caracterización de variables físicas en la escollera, una laguna costera artificial en santa marta, caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 49(2):25–48, 2020.
- [5] Sven Zea, Néstor Hernando Campos, and José Ernest Mancera. Procesos ecológicos y oceanográficos en lagunas costeras: el caso de la escollera en santa marta. reconocimiento general y avances 2014-17. *Informe inédito, Universidad Nacional de Colombia, sede Caribe, Santa Marta.*, 2017.
- [6] YSI. The dissolved oxygen handbook. https://www.fondriest.com/pdf/ysi_do_handbook.pdf, 2009.
- [7] SRC. Tipos de sensores de temperatura. <https://srcsl.com/tipos-sensores-temperatura/>, 2019.
- [8] Agencia de Protección del Medio Ambiente de California. Folleto informativo conductividad eléctrica/salinidad. https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf, marzo 2013.
- [9] Endress+Hauser Colombia S.A.S. Sensor de conductividad del agua y conductímetros. <https://www.co.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/conductividad-agua-conductivimetro>.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO
IOT DE MONITOREO INTELIGENTE PARA
AMBIENTES MARINOS Y COSTEROS DE COLOMBIA

- [10] Peter R. Michael, Danvers E. Johnston, and Wilfrido Moreno. A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance. *Journal of Measurements in Engineering*, 8(4):153–166, 2020.