



Universidad de Oviedo

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

**ÁREA DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN
ÁREA DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES**

BOYA MARINA INTELIGENTE BASADA EN IoT Y LPWAN

**Dña. FRAILE MENDOZA, Patricia
TUTOR: D. Ramón Rubio García
COTUTOR: D. Ignacio Rodríguez Larrad**

FECHA: Julio, 2024

A mi familia y amigos, por escuchar cada queja, por las palabras de ánimo y los abrazos cuando los necesitaba.

A Dani, porque sin ti no habría podido.

Y a mí misma, por no rendirme.

Sigo subiendo la montaña.

Resumen:

A día de hoy hay diversas maneras de considerar la calidad de las aguas que bañan nuestras costas, un ejemplo de las mismas son las investigaciones realizadas por el Ministerio de Sanidad del Gobierno de España, cuyos resultados se pueden observar en su página web o en la aplicación Náyade.

Aun así, los puntos de medida de la calidad del agua de nuestras playas son bastante limitados y habitualmente, los datos se recaban de forma manual. Es por eso que en este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se busca desarrollar una boya marina con sensores integrados que realice mediciones de diferentes parámetros y envíe los datos a través de una red LPWAN para su posterior representación gráfica. Esto permitiría a cualquier usuario con un teléfono móvil poder visualizar esos datos de forma directa, además de suponer un avance en cuanto a monitorización ambiental costera de cara a aumentar el número de puntos de control.

Índice:

1.	Objetivo y alcance del trabajo	1
1.1.-	Introducción	1
1.2.-	Motivación y objetivos	1
2.	Fundamentos teóricos.....	3
2.1.-	Calidad del agua	3
2.2.-	Boyas marinas	4
2.3.-	Internet de las cosas (IoT)	5
2.4.-	Tecnologías de conexión inalámbrica	5
3.	Diseño y prototipado.....	9
3.1.-	Requisitos del sistema.....	9
3.2.-	Consideraciones de diseño.....	11
3.2.1.-	Sensores.....	11
3.2.2.-	LoRa y LoRaWAN	13
3.2.3.-	Microcontrolador.....	14
3.2.4.-	Alimentación del dispositivo	15
3.2.5.-	MING.....	17
3.2.5.-	Flujo de datos	19
3.3.-	Calibraciones	20
3.3.1.-	Calibración del sensor de pH	20
3.4.-	Otras consideraciones	21
3.4.1.-	Drift del reloj.....	21
3.4.2.-	Estimación de la duración de la batería	23
3.4.3.-	Spreading Factor (SF) de LoRa y TTN	23
3.5.-	Implementación final	25
3.5.1.-	Diseño del circuito	25
3.5.2.-	Manejo de datos.....	29
4.	Despliegue	35

4.1.-	Circuito final	35
4.2.-	Montaje	36
4.3.-	Emplazamiento.....	40
5.	Validación y resultados.....	44
5.1.-	Validación	44
5.2.-	Resultados	44
5.2.1.-	Temperatura del agua	44
5.2.2.-	PH del agua	45
5.2.3.-	Temperatura del dispositivo.....	46
5.2.4.-	Calidad del agua.....	46
5.2.5.-	Batería del dispositivo	47
6.	Conclusiones.....	49

Tablas:

Tabla 2.1.- Tipos de marcas, color y forma asociados a las boyas marítimas	4
Tabla 3.1.- Grupos de interés y parámetros de la calidad del agua	11
Tabla 3.2.- SF de LoRa y Fair Access Policy de TTN [29]	24

Figuras:

Figura 1.1.- Objetivos y proyecto	2
Figura 2.1.- Tipos de redes de comunicación inalámbrica	8
Figura 3.1.- Sensor 18B20.....	12
Figura 3.2.- Sensor de pH.....	12
Figura 3.3.- Módulo de adaptación de pH.....	12
Figura 3.4.- Capas de un paquete LoRa	13
Figura 3.5.- Antenas LoRa que componen la red de la Universidad de Oviedo	14
Figura 3.6.- Placa LilyGo TTGO T3 v1.6.1	15
Figura 3.7.- Panel solar	16
Figura 3.8.- Battery shield 18650	16
Figura 3.9.- MOSFET IRF540N [25]	17
Figura 3.10.- Flujo de datos de la boya sensórica	19
Figura 3.11.- Método de calibración del sensor de pH	20
Figura 3.12.- Curva de calibración del sensor de pH	20
Figura 3.13.- Curva de calibración del sensor de temperatura de la placa.....	21
Figura 3.14.- Hora inicial de medida.....	22
Figura 3.15.- Hora final de medida.....	22
Figura 3.16.- Desviaciones temporales de las medidas.....	23
Figura 3.17.- Duración estimada de la batería	23
Figura 3.18.- Tamaño en bytes admisible según el SF [29]	25
Figura 3.19.- Circuito de la boya sensórica.....	26
Figura 3.20.- Circuito de prueba de la boya	27
Figura 3.21.- Cara superior de la PCB diseñada.....	28
Figura 3.22.- Cara inferior de la PCB diseñada	28
Figura 3.23.- Flujograma del funcionamiento del prototipo.....	29
Figura 3.24.- Menú de la aplicación creada en TTN para la boya sensórica	30
Figura 3.25.- Listado de nodos vinculados a la aplicación en TTN	30

Figura 3.26.- Menú disponible del nodo de la boya.....	31
Figura 3.27.- Payload formatters del nodo en TTN	32
Figura 3.28.- Flujo de datos en Balena	32
Figura 3.29.- Configuración del filtro de payload en Balena	33
Figura 3.30.- Panel de visualización de datos en Grafana.....	34
Figura 4.1.- Montaje del circuito electrónico completo.....	35
Figura 4.2.- Flotador empleado como cuerpo de la boya	36
Figura 4.3.- Caja estanca.....	36
Figura 4.4- Parte delantera del soporte	37
Figura 4.5.- Parte trasera del soporte	37
Figura 4.6.- Soporte del panel solar	38
Figura 4.7.- Disposición de la electrónica en la caja estanca	39
Figura 4.8.- Montaje final	40
Figura 4.9.- Panorámica de la zona de la fundación Revillagigedo	41
Figura 4.10.- Panorámica de ubicaciones disponibles para la boya en el Acuario	41
Figura 4.11.- Despliegue de la boya	42
Figura 4.12.- Boya en ubicación final.....	43
Figura 5.1.- Evolución real de la temperatura del agua	45
Figura 5.2.- Evolución real del pH en el agua	45
Figura 5.3.- Evolución real de la temperatura del dispositivo.....	46
Figura 5.4.- Calidad en base a los parámetros medidos	47
Figura 5.5.- Evolución real de la carga disponible	48



1. OBJETIVO Y ALCANCE DEL TRABAJO

1.1.- INTRODUCCIÓN

La calidad del agua marina es un indicador de gran relevancia en diversos ámbitos de la ciencia, como la biología o la oceanografía, pero también de cara a la sociedad y a la parte de la población que interactúa de forma directa con el agua que baña nuestras costas. Pese a que parámetros como la turbidez o la presencia de algunos contaminantes químicos, puedan ser detectados a simple vista, lo cierto es que hay otro gran número de ellos que no cumplen con dicha condición y sobre los que resulta interesante realizar un estudio al estar directamente relacionados con la calidad del agua. Habitualmente la tecnología más usada para tomar medidas de algunos de esos parámetros, principalmente de carácter físico-químico, son los sensores. La información recabada por estos dispositivos puede ser transmitida de diversas formas según el tipo de comunicación seleccionado.

La electrónica encargada de realizar estas medidas debe colocarse de forma estratégica. Los sensores necesitan contacto con el agua para desempeñar su función, pero los elementos a los que van conectados y que se encargan del procesamiento y la transmisión de datos, deben estar aislados en la medida de lo posible del medio acuático. Una forma sencilla de disponer de dicho medio aislado y a la vez poder estar en contacto con el agua puede lograrse si se implementa todo el sistema en una boya.

1.2.- MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El entorno marino es un ecosistema dinámico y por lo tanto dispone de una gran variedad de factores a considerar y englobar en el término “calidad”, es por ello que, buscando simplificar este concepto desde el punto de vista de los distintos usuarios, únicamente se han seleccionado algunos de ellos.

A su vez, la falta de acceso a información sobre las condiciones del agua en las playas puede limitar la capacidad de los ciudadanos para disfrutar de manera segura de las

actividades recreativas en la costa y puede dificultar la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades locales, por ejemplo, los equipos de salvamento.

El desarrollo de una Boya Marina Inteligente basada en IoT y LPWAN que contempla este TFG, representa una oportunidad para poner al alcance de la mano de todos, una información simplificada del estado de las playas. Esta tecnología permitirá a los ciudadanos acceder a datos precisos y actualizados sobre la calidad del agua, lo que mejorará significativamente su experiencia en la playa durante la temporada estival y supondrá un sistema de seguimiento a pequeña escala de los efectos del cambio climático y de la contaminación en la ciudad de Gijón y sus costas, de cara a expertos.

En cuanto a los objetivos y el alcance de este Trabajo de Fin de Grado, se pueden dividir en los siguientes apartados, representados en la Figura 1.1:

- Objetivo 1: Determinación de parámetros a medir, selección de sensores a emplear y ubicación del dispositivo.
- Objetivo 2: Propuesta de diseño de un circuito que integre la medida de los parámetros seleccionados, el envío de la información asociada mediante una red de LPWAN y la alimentación del mismo.
- Objetivo 3: Diseño de la interfaz gráfica que permita observar el histórico de los datos medidos.
- Objetivo 4: Garantizar la accesibilidad por parte del usuario a los datos recabados.
- Objetivo 5: Validación de funcionamiento en condiciones reales.

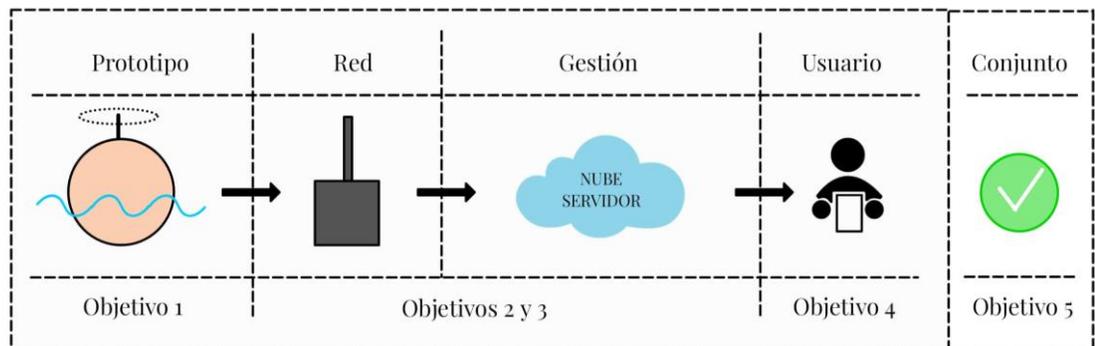


Figura 1.1.- Objetivos y proyecto



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.- CALIDAD DEL AGUA

Cuando hablamos de calidad del agua marina, tal y como se mencionó anteriormente, nos encontramos con una gran variedad de parámetros a considerar. Generalmente se pueden dividir en factores biológicos, presencia de metales pesados y, por último, factores físico-químicos.

Los parámetros biológicos se relacionan con la presencia de microorganismos en las aguas, considerando como tales a las bacterias, virus y parásitos [1]. Los peces y mariscos que consumimos como parte de nuestra alimentación entran en contacto con ellos, causándonos enfermedades o problemas de salud de forma indirecta, algo que resulta del todo inconveniente. Así mismo, también podríamos relacionarnos con estos microorganismos en las aguas de las playas, lagos o por la ingesta de aguas estancadas o en mal estado. Estos patógenos podrían proceder de barcos, aguas residuales de zonas urbanas, plantas depuradoras o restos animales entre otros, así como sufrir una proliferación excesiva en medios con un exceso de nutrientes.

También se debe considerar la presencia de metales pesados. Si bien es cierto que en el mar existen de por sí pequeñas concentraciones de estos elementos, se debe vigilar de cerca la variación de los mismos ya que un aumento considerable podría derivar en un ambiente tóxico para la fauna y flora marinos, así como acumularse en la cadena trófica y terminar por introducirse en nuestra dieta. Además de la toxicidad, los metales pesados no son biodegradables con lo cual podrían permanecer en el medio acuático durante largos periodos de tiempo.

Dejando a un lado los parámetros biológicos y los metales, podemos hablar también de los parámetros físico-químicos. De cara a realizar medidas con sensores son los más sencillos de analizar ya que, además de haber multitud de ellos de los que recabar información también hay una gran variedad de dispositivos adaptados a su medición.



2.2.- BOYAS MARINAS

Una boya es principalmente un objeto flotante [2]. A raíz de esta definición surgen distintos tipos, cada uno con un objetivo distinto de señalización según el Sistema de Balizamiento Marítimo y Otras Ayudas a la Navegación del Gobierno de España [3], entre los que se encuentran los indicados en la siguiente tabla:

TIPOS DE MARCAS	COLORES ASOCIADOS	FORMA
Marcas laterales	Rojo, verde, ambos	Cilíndrica, cónica
Marcas cardinales	Amarillo y negro	Cónicas
Marcas de peligro aislado	Rojo y negro	Castillete o espeque
Marcas de aguas navegables	Rojo y blanco	Esférica, castillete, espeque
Marcas especiales	Amarillo	Libre elección
Marcas de peligros nuevos	Azul y amarillo	Castillete, espeque
Otras marcas	No significativo	Rectangulares, triangulares, lumínicas

Tabla 2.1.- Tipos de marcas, color y forma asociados a las boyas marítimas

Se entiende por marcas laterales aquellas que indican la ubicación de babor y estribor respecto del sentido convencional del balizamiento. Las marcas cardinales referencian los cuatro puntos cardinales siendo estos el norte, sur, este y oeste. Por otro lado, las de peligro aislado y las de aguas navegables indican ambas que las aguas a su alrededor son aptas para la navegación con la salvedad de que las primeras se fondean o colocan sobre un posible peligro. Las marcas especiales señalan zonas o configuraciones especiales cuya naturaleza se visualiza al consultar una carta o publicación náutica, dentro de este grupo se encuentran los Sistemas de Adquisición de Datos Oceánicos (SADO), marcas para indicar presencia de cables o conductos submarinos, instalaciones de acuicultura, zonas de ejercicios militares... Las



marcas de peligro nuevo indican peligros descubiertos recientemente que todavía no figuran en las publicaciones náuticas como bancos de arena, naufragios, etc. Por último, en la categoría de otras marcas, se incluyen las enfilaciones que señalan una línea a seguir por las embarcaciones, y las luces de sectores que muestran una luz de diferentes colores y con diferentes ritmos de parpadeo en función de los cuales el navegante puede interpretar una cierta información [3].

2.3.- INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

El Internet de las Cosas (IoT) permite unificar bajo una misma infraestructura diferentes sistemas, permitiéndonos su control, así como conocer su estado. A día de hoy el IoT se puede definir como objetos inteligentes que disponen de capacidad recopilatoria y organizativa de datos, además de la posibilidad de actuar frente o reaccionar ante cambios en el entorno en el que se encuentran [4]. Por este motivo, el prototipo de boya se considera un dispositivo IoT, ya que recopila datos y se encarga de su transmisión.

2.4.- TECNOLOGÍAS DE CONEXIÓN INALÁMBRICA

La boya sensórica estará colocada en el agua a una cierta distancia de la costa, lo que dificulta la conexión según medios físicos para la transmisión de los valores medidos, es por esto que nos centraremos en los inalámbricos.

Las comunicaciones inalámbricas permiten el intercambio de información entre dispositivos, mediante el uso del espectro electromagnético. Existen diferentes tipos de tecnologías y redes, que se pueden clasificar teniendo en cuenta el alcance de las mismas [5][6]:

- Redes de proximidad: Típicamente se emplean para la detección de objetos por etiquetado y lectores. Un sistema activo es aquel en el que ambos equipos disponen de un chip Identificador por Radiofrecuencia (RFID) para generar un campo electromagnético y de esta forma, intercambiar datos con un alcance hasta los 100 metros. Por otro lado, un sistema pasivo es aquel en el que el chip RFID solo está presente en uno de los dispositivos, de manera que el otro



aprovecha el campo generado por este para el intercambio en un radio de hasta 25 metros. Además del RFID, también existe la tecnología de Comunicación de Campo Cercano (NFC) que permite la transmisión de datos en distancias muy cortas, hasta un máximo de 20 centímetros [7].

- Redes de área personal inalámbrica (Wireless Personal Area Network, WPAN): Cumplen con la norma 802.15 del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y permiten conectar los dispositivos personales en un radio de alcance de varios metros. En el ámbito del IoT se usan para comunicar las aplicaciones de control y monitorización de dispositivos de baja frecuencia de transferencia de datos. Algunas de las tecnologías más conocidas que emplean este tipo de redes son:
 - Bluetooth: Protocolo estandarizado por el Bluetooth Special Interest Group que emplea un gran ancho de banda, con un consumo reducido de energía. Tiene un alcance cercano a los 10 metros, ampliable a los 100 metros, en la que cualquier dispositivo puede actuar como maestro o como esclavo [8].
 - Z-Wave: Protocolo de corto alcance y baja latencia de transferencia de datos. Trabaja con mallas de nodos que se pueden comportar como emisores o receptores, pero tiene un consumo eléctrico a considerar ya que estos nodos se encuentran siempre encendidos.
 - Zigbee: Tecnología inalámbrica de comunicación abierta regulada por el estándar IEEE 802.15.4 y promovida por ZigBee Alliance. Opera en bandas de frecuencia de radio sin licencia y alcanza varias decenas de metros con un elevado rendimiento de transferencia de datos pese a su bajo ciclo de trabajo.
 - Thread: Tecnología de red basada en estándares abiertos de bajo consumo y comunicaciones seguras, diseñada para estandarizar la transmisión de datos entre dispositivos de IoT. Es un protocolo inalámbrico que trabaja



con una malla de nodos y que se puede conectar con ellos independientemente de su capa física o de enlace al estar dentro del estándar IEEE 802.15.4. Todos los nodos se pueden comunicar entre ellos y disponen de acceso a la nube.

- Redes de área local inalámbrica (Wireless Local Area Network, WLAN): Definidas por la norma IEEE 802.11 son compatibles con las Redes de Área Local (LAN), similares a las WLAN, con la diferencia de que son redes no inalámbricas. Disponen de velocidades de transmisión relativamente altas con un bajo nivel de error y cuya comunicación se centra en las microondas. Además, ofrece la ventaja de poder emplear los recursos de las LAN sin necesidad de infraestructuras de red como cableados, conectores, etc. Las principales tecnologías que emplean WLAN derivan de la norma anteriormente mencionada, por ejemplo, la IEEE 802.11a está orientada a la transmisión de paquetes y la IEEE 802.11i solucionó problemas de vulnerabilidad en protocolos de autenticación y codificación. Una de las tecnologías más reconocidas de este tipo son las redes Wi-Fi cuyo alcance varía desde los 30 metros en interiores hasta los 100 metros en espacios abiertos [9].
- Redes de área extendida inalámbrica (Wireless Wide Area Network, WWAN): Las distancias de transmisión de datos de este tipo de redes están en el rango de las decenas de kilómetros. Emplean frecuencias con licencia y dan cobertura a esas grandes áreas mediante sistemas de satélites o antenas gestionadas por un operador de servicios. Hay tres tipos de tecnologías principales dentro de este grupo:
 - o Redes de telefonía móvil: Además de nuestros teléfonos, los dispositivos de IoT también se sirven de este tipo de redes. Actualmente permiten la transmisión de elevadas tasas de datos y para acceder a ellas se requiere una tarjeta SIM que aporta una conexión directa con el operador. Su inicio se remonta a los años 80 con la tecnología 1G y no fue hasta que nació el 3G que la transmisión de información fue posible. Su avance y evolución

ha desembocado en las redes 5G que se espera que se complementen con las 6G en los próximos años.

- Redes de banda ancha y baja potencia (Low Power Wide Area Network, LPWAN): Tecnologías recientes que permiten transmisiones a gran distancia reduciendo el consumo y el coste de transmisión, es por este motivo por el que no se recomienda su uso para comunicaciones con grandes volúmenes de datos, sino más bien para emitir ordenes remotas o hacer algún seguimiento de parámetros.
- Redes de satélites: Son aquellas que trabajan con ondas electromagnéticas transmitidas por satélites artificiales situados en órbita alrededor de la Tierra. Su baja velocidad de transmisión es compensada con la gran área de cobertura de la que disponen además de su funcionalidad, son las redes por excelencia en áreas con riesgo de catástrofes naturales ya que seguirían en funcionamiento, aunque las demás vías de comunicación estuvieran fuera de servicio.

Un esquema simplificado de los distintos tipos de redes se puede ver en la Figura 2.1:

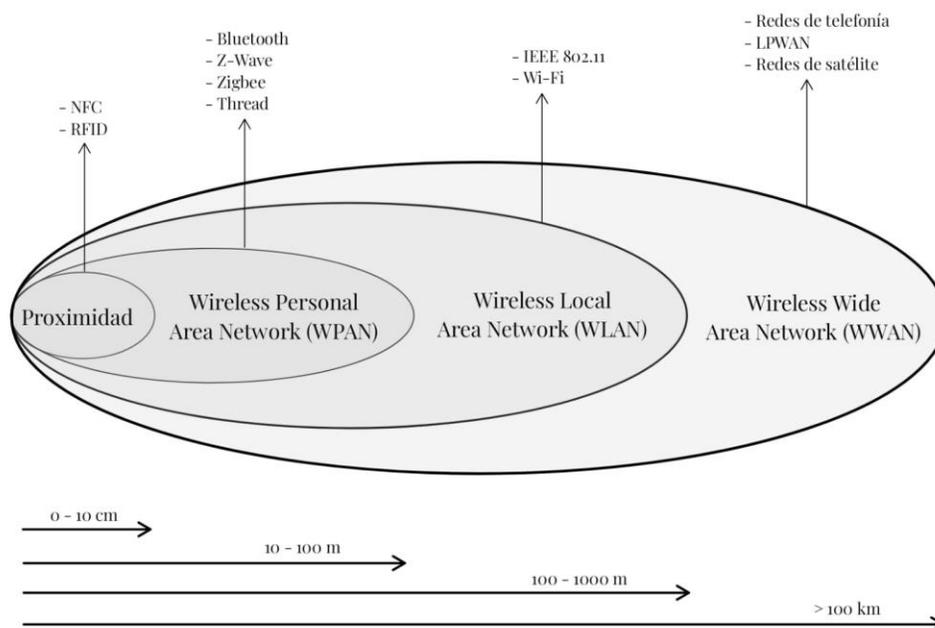


Figura 2.1.- Tipos de redes de comunicación inalámbrica



3. DISEÑO Y PROTOTIPADO

3.1.- REQUISITOS DEL SISTEMA

De cara a la experiencia de un usuario promedio en una playa, este podría considerar que una buena “calidad” relacionada con el agua implicaría que esta presentara un aspecto principalmente limpio, sin turbidez aparente, además de estar a una temperatura agradable para el baño. Partiendo de estas consideraciones por parte de los usuarios, y además considerando otros factores más técnicos, los parámetros seleccionados para su medición son:

- Temperatura: Los valores habituales para la temperatura están aumentando como consecuencia del cambio climático, al absorber los océanos gran parte de ese calor acumulado [10]. Su medida, no solo nos ayuda a estimar los efectos adversos de este fenómeno, sino que también permite hacer un seguimiento del proceso de calentamiento.
- pH: Este valor indica la acidez o alcalinidad del agua, es decir, la concentración de iones de hidrógeno, en una escala logarítmica en un rango de 0 a 14. Valores de pH muy bajos indican aguas muy ácidas mientras que pH elevados, demuestran la presencia de ambientes muy básicos. La relación de este parámetro con la calidad del agua en sí viene dada por la importancia del mismo para la vida marina. El metabolismo celular de los organismos acuáticos transcurre entre unos valores concretos de pH, habitualmente entre 7.5 y 8.4, por lo que una modificación considerable de los iones de hidrógeno disponibles puede afectar a la toxicidad del agua y traducirse en una disminución de la calidad de la misma [11]. Además, los océanos absorben una gran cantidad de CO₂ de la atmósfera lo que hace disminuir el pH, dando lugar al proceso conocido como acidificación. Por este motivo la calcificación, acumulación de sales de calcio en los tejidos de los organismos acuáticos, de la fauna y flora marinas puede verse afectada y por lo



tanto también, impactar negativamente en su cadena alimentaria [12]. La acidificación y la disminución del pH asociada a dicho fenómeno también representa el impacto de la contaminación y el calentamiento global en los océanos.

- Calidades generales: Además de la temperatura y el pH, se considerará un indicador de calidad en formato numérico, adaptado a los rangos habituales de los mismos establecidos por el Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible del Gobierno de España y el Instituto Nacional de Estadística [13][14]. En el caso de la temperatura, se contempla que los valores aceptables de este parámetro varíen entre los 17°C y los 22°C durante la temporada estival y entre los 12°C y los 16°C el resto del año. En el caso del pH se espera que se mantenga entre valores de 7 y 9 bajo circunstancias habituales.

Para la toma de datos de las variables consideradas se ha seguido el esquema de medida del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible del Gobierno de España para la temperatura [13]. Se realizarán mediciones cada hora de forma puntual, considerando el dato obtenido como el valor definitivo. De esta manera conseguimos datos diarios que luego podrán extrapolarse a una media mensual que sirva de comparativa con los meses de años anteriores, pudiendo comprobar los efectos del cambio climático en las costas del mar Cantábrico o, simplemente, la evolución de dichos parámetros. Además, para simplificar el ciclo de medición, se ha implementado el mismo esquema para la toma de datos del pH, ya que a no ser que suceda un determinado acontecimiento, como por ejemplo un vertido, los valores no varían de forma instantánea.

De cara al usuario, podemos distinguir tres grupos de interés y a cada uno, le interesaría una serie de parámetros distintos, tal y como se puede observar en la Tabla 3.1.



PARÁMETROS	USUARIO PROMEDIO	PERSONAL DEL PUERTO	BIÓLOGOS	ESTUDIOSOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
Temperatura	X	X	X	X
pH		X	X	X
Calidades	X	X	X	X

Tabla 3.1.- Grupos de interés y parámetros de la calidad del agua

Una vez determinadas las variables a considerar y sus periodos de medida, se debe estudiar el tipo de boya a usar. En base a todo lo visto anteriormente, se puede deducir que debe ser de color amarillo al entrar en la categoría de SADO, siendo además un dispositivo IoT.

Por último, tras analizar las posibles opciones de comunicación inalámbrica, debido a su alcance y su bajo consumo, una red LPWAN resulta una buena opción de implementación para la boya sensorica a desarrollar.

3.2.- CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Tras decidir los parámetros, los periodos de medida y el tipo de red más apropiada, se debe hablar de forma más específica de los sensores, el circuito diseñado y los protocolos de comunicación establecidos, así como de otras consideraciones.

3.2.1.- Sensores

Considerando siempre que se busca realizar un prototipo económico, se ha optado por sensores que cumplan dicha característica.

- Sensor de temperatura: El modelo seleccionado ha sido el 18B20 (Figura 3.1), que permite medir en un rango de temperaturas desde los -55°C hasta los 125°C . Además, la sonda dispone de un cable de 1 metro de longitud, lo que resultó apropiado desde un principio ya que, pese a que el sensor debe estar en contacto con el agua, es necesario que el resto de la electrónica se encuentre aislada frente a este elemento [15].



Figura 3.1.- Sensor 18B20

- Sensor de pH: En este caso el modelo seleccionado es el SUP-pH5016 (Figura 3.2). Entre sus características principales destaca su alta precisión, de ± 0.01 PH, y su rango de temperaturas de funcionamiento, entre 0°C y 50°C , que resulta en gran medida compatible con el del sensor de temperatura seleccionado también para este TFG. Por otro lado, el dispositivo es impermeable y también dispone de un cable de longitud cercana a los 2 metros que permitiría situar la electrónica principal lejos del agua [16]. Debido a que su conector es de tipo BNC, se necesita un dispositivo de adaptación para el intercambio de datos con el microcontrolador, que no dispone de entradas de este tipo. Por ser uno de los más comúnmente empleados, además de económicos, se seleccionó el PH-4502C (Figura 3.3) que dispone de tiempos de respuesta inferiores al minuto, además de un tamaño compacto [17]. Por último, se debe tener en cuenta que la medida de pH requiere un cierto tiempo para la estabilización del puerto encargado de su realización, por lo que antes de la toma del dato, se mantendrá activo el sensor durante 20 segundos, garantizando la calidad de la medida realizada.



Figura 3.2.- Sensor de pH

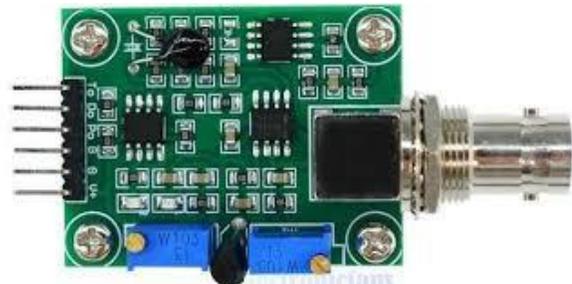


Figura 3.3.- Módulo de adaptación de pH



- Sensor de temperatura para el circuito electrónico: También resulta interesante, ya que el conjunto electrónico del prototipo va a estar expuesto al sol de forma continuada, medir la temperatura a la que se encuentran estos elementos. Los distintos elementos del circuito trabajan correctamente en un rango de temperatura específico y un sobrecalentamiento podría inducir mediciones erróneas o incluso el fallo del propio componente. El sensor de temperatura adicional colocado en la placa del sensor de pH nos permitirá conocer el estado de la electrónica, de nuevo tomando una medida puntual cada hora, junto a la de pH y temperatura en sí del agua.

3.2.2.- LoRa y LoRaWAN

LoRa es una tecnología inalámbrica que emplea un tipo de modulación en radiofrecuencia, llamada CSS (Chip Spread Spectrum), patentado por Semtech. La asociación LoRa Alliance certifica a todo fabricante de hardware que desee trabajar con este tipo de modulación, que resulta ideal para conexiones a grandes distancias y para redes de IoT.

Por otro lado, LoRaWAN es el protocolo de red empleado por LoRa y es un tipo de red LPWAN. Como ya se justificó anteriormente, es el tipo de comunicación más apropiado para la boya sensorica por su gran alcance y bajo consumo de energía [18].

LoRa formaría parte de la capa física de los paquetes de datos mientras que LoRaWAN se encarga del control de acceso al medio (capa MAC), tal y como se ve en la Figura 3.4 [19].

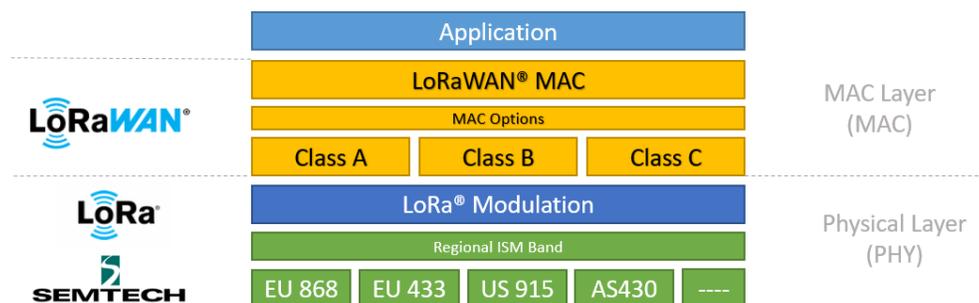


Figura 3.4.- Capas de un paquete LoRa



Las redes LoRaWAN trabajan mediante nodos, gateways y servidores. Los nodos son el punto de entrada de los datos [20] mientras que el gateway se encarga de recopilar y redirigir dichos datos entre distintas redes, lo que implica traducirlos del protocolo empleado en la red de origen, al usado en la red destino [21]. Por último, los servidores se encargan de administrar la red y procesar los datos [22]. En el caso que nos ocupa, el nodo se corresponde con la boya que recopila datos de pH y temperatura, el gateway debe ser una antena de LoRa y el servidor, permitirá a los usuarios consultar dichos datos. En cuanto al despliegue de la red en sí, la Universidad de Oviedo dispone de cobertura validada en el campus de Gijón en un radio aproximadamente de 3 km en zona urbana, y de varias decenas de km mar adentro o en entornos más rurales [23].

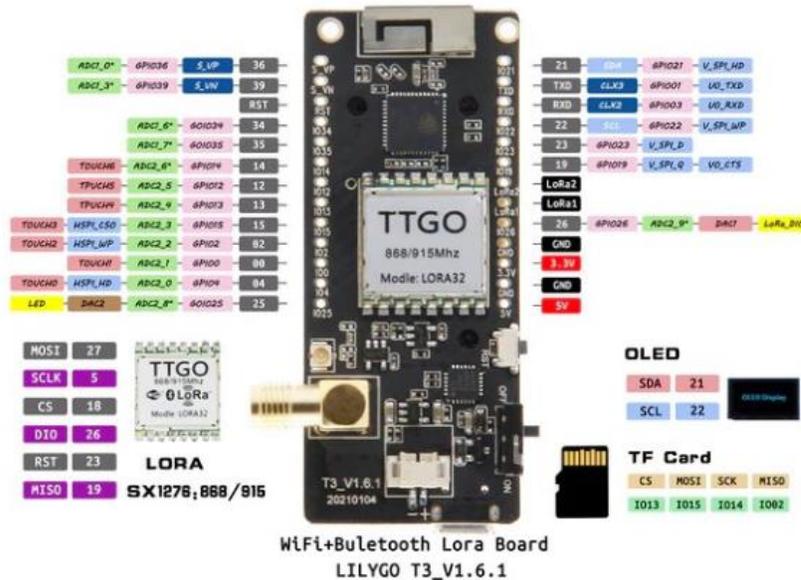


Figura 3.5.- Antenas LoRa que componen la red de la Universidad de Oviedo

3.2.3.- Microcontrolador

No todas las placas de desarrollo incorporan la posibilidad de trabajar con LoRa, como puede ser un Arduino Uno, por lo que a la hora de diseñar proyectos de IoT que impliquen este tipo de comunicaciones se debe seleccionar correctamente el elemento encargado del manejo de datos. Para el diseño de este prototipo se ha decidido emplear una placa LilyGo TTGO T3 v1.6.1 (Figura 3.6) basada en una ESP32 que incorpora una antena LoRa y un puerto de conexión micro-USB, para la alimentación. Además, dispone de numerosos puertos de

entrada/salida de propósito general (GPIO), que no tienen un uso específico por parte del microcontrolador si no que son, más bien, dirigidos al usuario. Es a estos puertos a los que se conectarán los sensores anteriormente mencionados.





líquidos. Considerando que la ubicación del panel sería en un entorno sometido a salpicaduras, se ha decidido emplear un panel IP67, que consta de protección contra el polvo y salpicaduras, incluyendo la inmersión durante 30 minutos. Por estos motivos se ha seleccionado el modelo IP67 de FlexSolar que maneja voltajes hasta los 5V y proporciona una potencia de hasta 6W (Figura 3.7), en función de la propia corriente y del sol disponible [24].

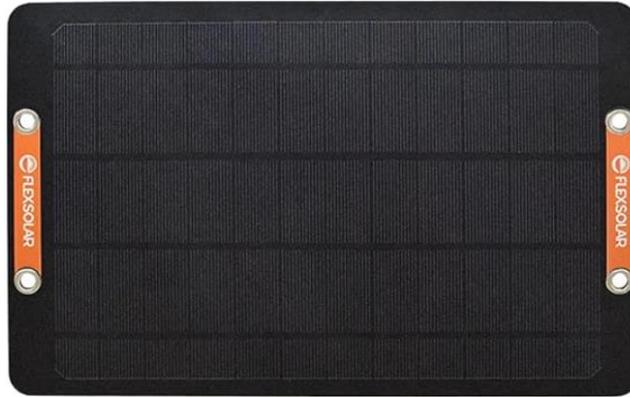


Figura 3.7.- Panel solar

Como complemento al panel solar se seleccionó el battery shield 18650 (Figura 3.8) que permite alimentaciones de 3.3V y 5V [24]. La pila a colocar será de 3.3V y el propio dispositivo, permitirá extraer los 5V necesarios para la alimentación de los sensores [25].



Figura 3.8.- Battery shield 18650

Adicionalmente, esta vez en relación a la alimentación de los sensores, se debe tener en cuenta que cuando el dispositivo no esté transmitiendo datos (modo Deep Sleep), estos siguen alimentados. Por este motivo, con ayuda de un transistor, se desconectan de la alimentación en cuanto se duerme el dispositivo, de manera que el uso de la batería es el justo y necesario para despertar, medir y transmitir por parte del prototipo. El modelo de transistor empleado es el IRF540N cuyo esquema se puede ver en la Figura 3.9, un MOSFET de canal N que soporta corrientes hasta de 33A y voltajes hasta un máximo de 100V [25], que actuará como interruptor, controlado por una señal digital emitida por el microcontrolador.

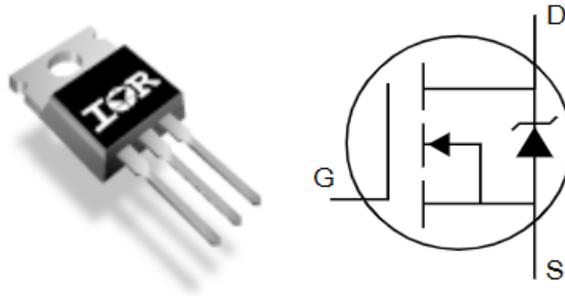


Figura 3.9.- MOSFET IRF540N [25]

3.2.5.- MING

La adquisición de los datos por parte de los sensores requiere de comunicación, y la comunicación requiere un destino en el que entregar los mensajes. Ese destino es BalenaOS, junto con el stack de MING.

BalenaOS es un sistema operativo de tipo docker, una plataforma de código abierto en la que se pueden instalar containers, comúnmente utilizado para aplicaciones de IoT. Esto son paquetes que contienen lo necesario para poder ejecutar una aplicación de forma aislada. En otras palabras, BalenaOS permite ejecutar aplicaciones de manera que no interfieran unas con otras ni afecten de forma directa o indirecta a su integridad.

Por otro lado, existen los stacks de containers. Son agrupaciones de estos elementos que se emplean en aplicaciones donde la coordinación entre servicios resulta interesante [26].



En el caso de la boya sensórica y dado que se quiere realizar un seguimiento de ciertos parámetros, será necesario almacenar los valores medidos de alguna forma y también tener en cuenta la representación de los mismos de cara a los usuarios.

La cátedra MediaLab (Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón) ya dispone de una plataforma de este tipo y ya que el proyecto se realiza en colaboración con ellos, se ha decidido tomar ventaja de esta situación. Debido a estas causas, se empleará el stack de MING sobre BalenaOS, cuyas siglas describen los 4 servicios de los que dispone [27]:

- Mosquitto, bróker MQTT: Esto permite conectar los dispositivos que funcionan con BalenaOS a servicios con integración MQTT como puede ser The Things Network (TTN), que además incorpora diversas ventajas respecto a otros containers del stack. Esta plataforma busca ser una comunidad en la que cualquier persona pueda participar en proyectos de IoT, aportando sus conocimientos, desarrollando nuevas ideas o colaborando con otras personas [28]. Dado que la boya es, precisamente, un proyecto de IoT que busca acercar la tecnología a la sociedad de hoy en día, realizamos una pequeña contribución a TTN con nuestra idea.
- InfluxDB, base de datos: Permite almacenar los datos recibidos desde TTN, remitidos por MQTT, de forma gratuita [27].
- NodeRed, lenguaje de programación por bloques: Actúa como puente de enlace entre los nodos de TTN, en este caso la boya, y la base de datos creada en InfluxDB permitiendo el tratado y procesado de los mismos. [27].
- Grafana, plataforma gráfica: Incorpora la opción de realizar paneles visuales en los que el usuario puede consultar la información recabada por los nodos y almacenada en la base de datos de InfluxDB [27].

Además del stack de MING, se requiere disponer de conexión a internet para poder almacenar y representar los datos. La antena de LoRa que capta los datos reportados por la boya, los envía por internet a TTN y con ayuda de MQTT, se redirigen a una Raspberry Pi 3 Model B situada en el laboratorio de MediaLab. En dicho dispositivo se dispone además de



una tarjeta microSD en la que se almacenarían, ya que los servidores de TTN tienen una volatilidad de 30 días. Por último, con Grafana e InfluxDB se generaría la interfaz gráfica que vería el usuario en caso de querer consultar la evolución de los parámetros.

3.2.5.- Flujo de datos

La Figura 3.10 describe de manera simplificada el flujo de datos considerado. El primer lugar los datos son recabados por parte de los sensores incorporados a la boya, que, a su vez, se comunica con el gateway para su envío. Este elemento dispone de conexión a Internet para poder vincularse al servidor online de TTN que reenvía los datos a otro servidor basado en el stack de MING, dentro de la red de la Universidad de Oviedo y alojado en una Raspberry Pi ubicada en MediaLab. El software de Node-Red que se encuentra dentro de dicha Raspberry, incorpora los datos a la base configurada en InfluxDB permitiendo su posterior visualización mediante el motor gráfico de Grafana. De esta manera, un usuario puede acceder a los datos desde cualquier dispositivo con conexión a internet a través de un acceso web privado del propio Grafana.

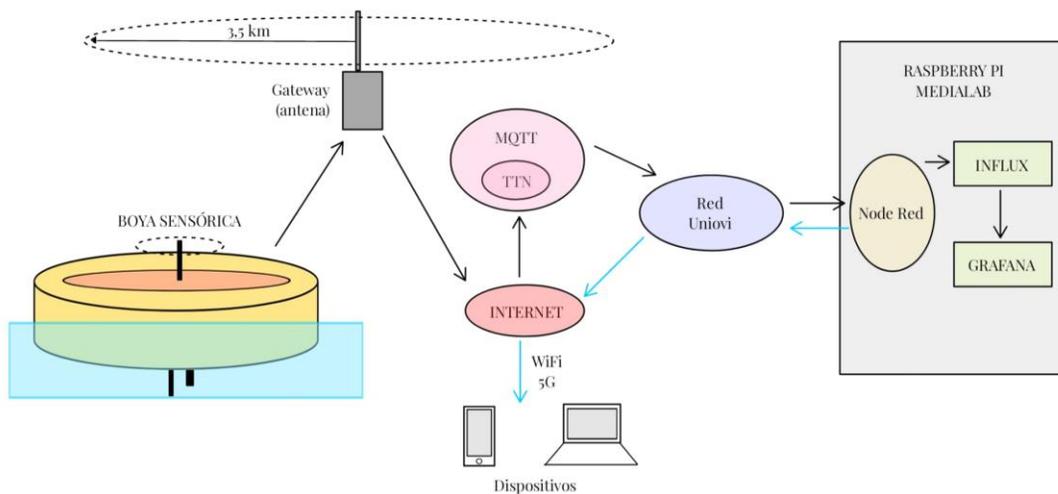


Figura 3.10.- Flujo de datos de la boya sensorica

3.3.- CALIBRACIONES

3.3.1.- Calibración del sensor de pH

El conjunto de sonda y adaptador de señal del pH requiere de una cierta calibración para obtener valores adecuados y precisos. En primer lugar, se debe tener en cuenta que el adaptador asocia el pH=7 (neutro) a una señal de 0V, es decir, que pH más ácidos, o lo que es lo mismo, inferiores al pH neutro no podrían ser detectados como corresponde al no reconocer el microcontrolador voltajes negativos. Esto se puede solucionar con ayuda del potenciómetro más cercano al conector BNC presente en la propia placa, que permite desplazar la medida de pH neutro entre los 0V y los 5V. Al tratarse el pH=7 del valor medio de la escala de pH, se ha decidido centrar la medida en los 2.5V, es decir, la media del rango de tensiones manejado por el adaptador. El método empleado consistió en medir la propia tensión en abierto presente en el conector, tal y como se representa en la Figura 3.11, variando el potenciómetro hasta obtener una medida de 2.5V. Para más detalle del código de calibración, se recomienda al lector dirigirse al Anexo I. La recta obtenida se representa en la Figura 3.12.

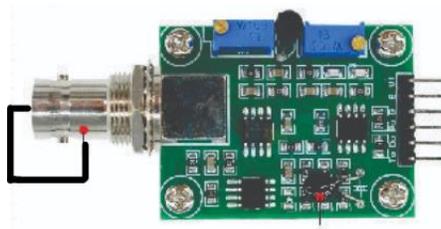


Figura 3.11.- Método de calibración del sensor de pH

Voltaje (V)	pH
5	14
0	0

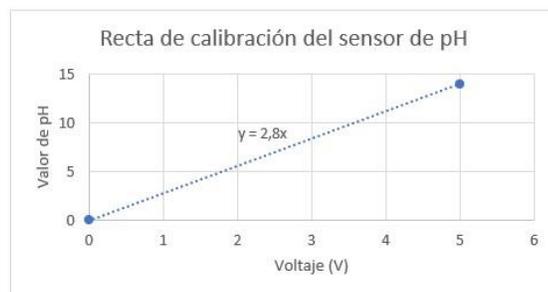


Figura 3.12.- Curva de calibración del sensor de pH



Además de esto, debido a la sensibilidad del sensor de temperatura, incorporado a la placa, se calculó también una recta de calibración. Sometiendo a la misma a una temperatura ambiente aproximadamente constante se obtuvo función representada en la Figura 3.13.

Voltaje (V)	Temperatura (°C)
3,09	23,94
3,14	23,62
3,1	23,37
3,04	23,31
3,14	23,31
3,04	23,31

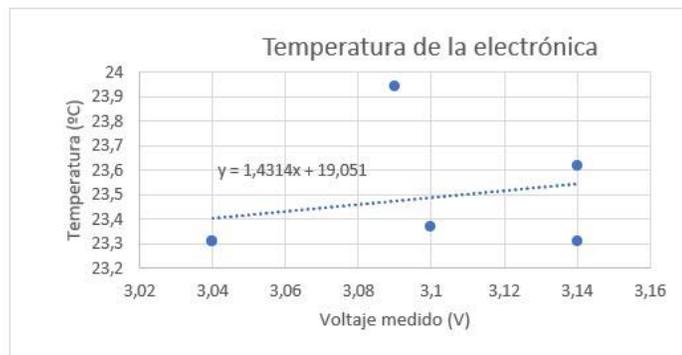


Figura 3.13.- Curva de calibración del sensor de temperatura de la placa

3.4.- OTRAS CONSIDERACIONES

3.4.1.- Drift del reloj

El prototipo mide idealmente cada hora, sin embargo, esto se debe comprobar. Para ello se ha analizado la hora del envío de datos en un periodo de 48 horas, es decir, se comprueba que tras dos días la boya siga enviando las mediciones a la hora prevista.

El día 6 de Julio de 2024, el dato correspondiente a la temperatura del dispositivo de las 5 de la tarde se tomó a las 16 horas y 53 minutos, como se puede comprobar en la Figura 3.14.

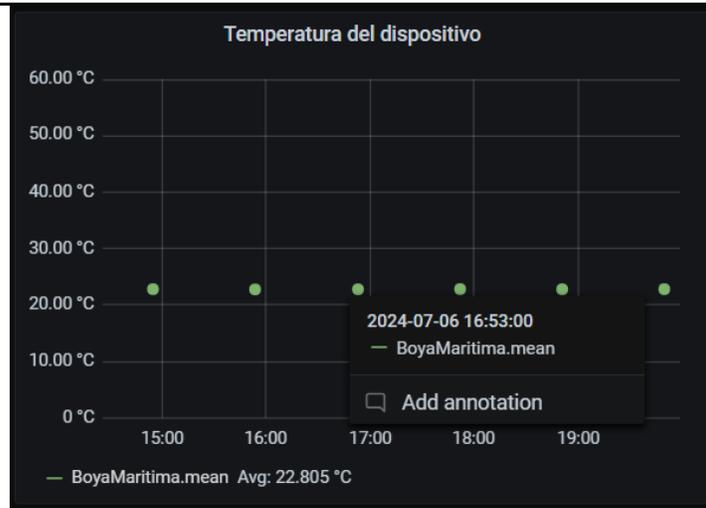


Figura 3.14.- Hora inicial de medida

Sin embargo, el día 8, la misma medida correspondiente a las 5 de la tarde se tomó a las 15 horas y 5 minutos, como se puede observar en la Figura 3.15.

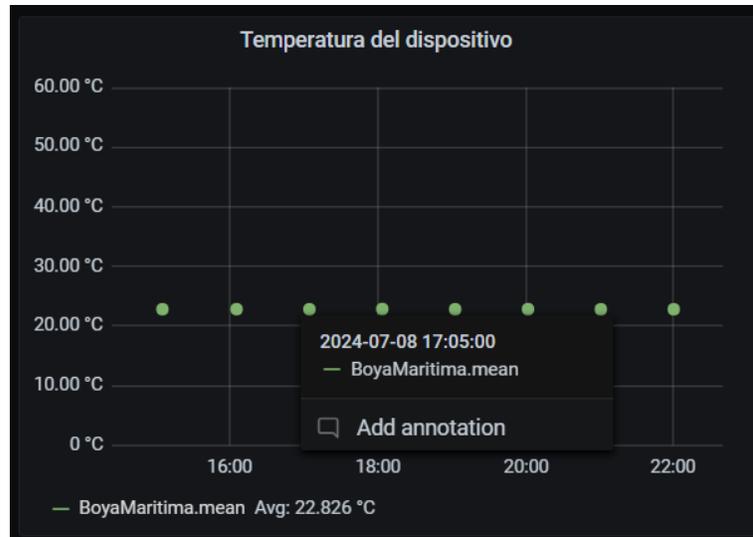


Figura 3.15.- Hora final de medida

Esto se puede traducir en una desviación de 12 minutos por cada dos días de funcionamiento o de 6 minutos al día, que a la larga supondrá la pérdida de algunas de las



mediciones realizadas. Se puede calcular la desviación total a lo largo de un año con unas ecuaciones sencillas representadas en la Figura 3.16.

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de desviación} &= \frac{6 \text{ minutos}}{1 \text{ día}} * \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} * \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ minutos}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 1,52 \text{ días} \\ \text{Medidas perdidas} &= \frac{24 \text{ medidas}}{1 \text{ día}} * 1,52 \text{ días} \approx 37 \text{ medidas} \end{aligned}$$

Figura 3.16.- Desviaciones temporales de las medidas

3.4.2.- Estimación de la duración de la batería

Sin la incorporación del panel solar, no hay forma de recargar la batería que se encarga de la alimentación del dispositivo. Observando la evolución de la misma se ha estimado que cada 10 medidas, es decir, aproximadamente cada 10 horas, se consume un 1.7% de la carga. Realizando unos cálculos sencillos, similares a los del apartado anterior, representados en la Figura 3.17 se puede observar que la duración de la batería sería aproximadamente de 24 días, sin considerar una recarga por parte del panel solar.

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje diario de consumo} &= \frac{1,7\%}{10 \text{ medidas}} * \frac{24 \text{ medidas}}{1 \text{ día}} = 4,08 \frac{\%}{\text{día}} \\ \text{Días estimados de duración} &= 100\% * \frac{1 \text{ día}}{4,08\%} \approx 24 \text{ días} \end{aligned}$$

Figura 3.17.- Duración estimada de la batería

3.4.3.- Spreading Factor (SF) de LoRa y TTN

Se ha mencionado anteriormente que las medidas se realizarán cada hora y que el mensaje se transmitirá inmediatamente después, para poner a “dormir” cuanto antes al dispositivo y consumir el mínimo de batería posible, pero se debe comprobar si realmente el protocolo de LoRa permite esta tasa de envío de datos.

Para ello se debe tener en cuenta que no se pueden enviar de forma continuada si no que deben mandarse en mensajes de pequeño tamaño y cada cierto tiempo. En este punto entra en juego el spreading factor (SF) de LoRa, que se podría traducir como el factor de



esparcimiento espectral. La transmisión LoRa debe cumplir con la normativa del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI) que para las bandas de radiofrecuencia habituales emplea ciclos de trabajo (duty) máximos de un 1%, aunque algunas usen 0.1% e incluso un 10%. Además, también se debe tener en cuenta que TTN dispone de una Política de Acceso Justo (Fair Access Policy) que permite un máximo de 30 segundos de tiempo de transmisión entre un enlace ascendente y un máximo de 10 mensajes en enlace descendente por dispositivo y cada 24 horas. Todo esto se puede ver resumido en la Tabla 3.2.

	DR6 ^①	DR5	DR4	DR3	DR2	DR1 ^①	DR0 ^①
<i>data rate</i>	SF7 ^{BW} ₂₅₀	SF7 ^{BW} ₁₂₅	SF8 ^{BW} ₁₂₅	SF9 ^{BW} ₁₂₅	SF10 ^{BW} ₁₂₅	SF11 ^{BW} ₁₂₅	SF12 ^{BW} ₁₂₅
<i>airtime</i>	30.8 _{ms}	61.7 _{ms}	113.2 _{ms}	205.8 _{ms}	411.6 _{ms}	823.3 _{ms}	1,482.8 _{ms}
<i>1% max duty cycle</i>	3.1 _{sec} 1,167 _{msg/hour}	6.2 _{sec} 583 _{msg/hour}	11.3 _{sec} 318 _{msg/hour}	20.6 _{sec} 174 _{msg/hour}	41.2 _{sec} 87 _{msg/hour}	82.3 _{sec} 43 _{msg/hour}	148.3 _{sec} 24 _{msg/hour}
<i>fair access policy</i>	88.8 _{sec (avg)} 40.5 ^{avg} _{/hour} 972 _{msg/24h}	177.7 _{sec (avg)} 20.3 ^{avg} _{/hour} 486 _{msg/24h}	325.9 _{sec (avg)} 11.0 ^{avg} _{/hour} 265 _{msg/24h}	592.8 _{sec (avg)} 6.1 ^{avg} _{/hour} 145 _{msg/24h}	1,185.5 _{sec (avg)} 3.0 ^{avg} _{/hour} 72 _{msg/24h}	2,371.1 _{sec (avg)} 1.5 ^{avg} _{/hour} 36 _{msg/24h}	4,270.3 _{sec (avg)} 0.8 ^{avg} _{/hour} 20 _{msg/24h}

Tabla 3.2.- SF de LoRa y Fair Access Policy de TTN [29]

El rango de valores abarca desde el SF7 al SF12, siendo este último el máximo o lo que es lo mismo, el factor de esparcimiento que implica la peor situación posible, ya que contempla la duración máxima de la transmisión por el aire. Si nos centramos precisamente en el SF12 podemos mandar un máximo de 24 mensajes a la hora, separados un mínimo de 148.3 segundos por lo que nuestra transmisión de 1 mensaje a la hora cumple con ambas especificaciones [29].

Además, se debe considerar otro factor limitante en cuanto a la transmisión de datos con LoRa, que implica los bytes del mensaje. Las tramas del protocolo LoRa disponen de varias capas, tal y como se vieron en la Figura 3.4, entre ellas la capa física, la capa MAC y la de aplicación. Cada una de ellas incorpora distintos tipos de cabeceras y datos adicionales tanto del dispositivo como del propio mensaje, para su posterior reconocimiento por el gateway. Esto implica que realmente el espacio disponible para incluir nuestros valores



medidos en el mensaje no corresponde al tamaño completo del mismo. Para cada uno de los SF hay una cierta cantidad de bytes ocupados y disponibles y en el caso del prototipo de la boya se emplea un SF7, lo que supone una cantidad máxima de 235 bytes con un tamaño de cabecera de 13 bytes. Esto se traduce en que realmente el espacio disponible para la transmisión de datos no son 235 bytes si no 222 bytes, como se puede ver en la Figura 3.18.

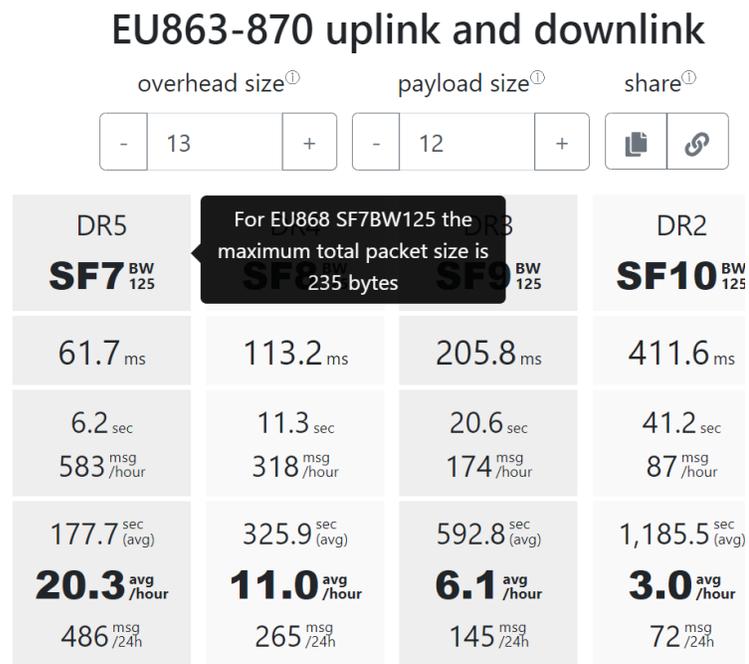


Figura 3.18.- Tamaño en bytes admisible según el SF [29]

3.5.- IMPLEMENTACIÓN FINAL

3.5.1.- Diseño del circuito

La circuitería del prototipo, según lo visto anteriormente, debe incluir los sensores con sus dispositivos adicionales de protección, el microcontrolador, el battery shield y el panel solar.

En el esquema representado en la Figura 3.19. se observa la presencia de LilyGo con sus correspondientes puertos de alimentación, conectados a entradas de +5V y GND, y los puertos por los que se mide tanto la batería disponible como los parámetros de los sensores.



Adicionalmente se muestra el MOSFET que desconectaría a dichos dispositivos de la alimentación al finalizar la medida. Debido a que el microcontrolador debe encargarse de dar la señal de encendido y apagado a los sensores, este debe mantenerse alimentado en todo momento. Por último, los terminales adicionales permiten la conexión con el battery shield que a su vez se conectará al panel solar. El montaje físico de dicho circuito se comprobó sobre una placa de pruebas en el laboratorio, tal y como se puede ver en la Figura 3.20.

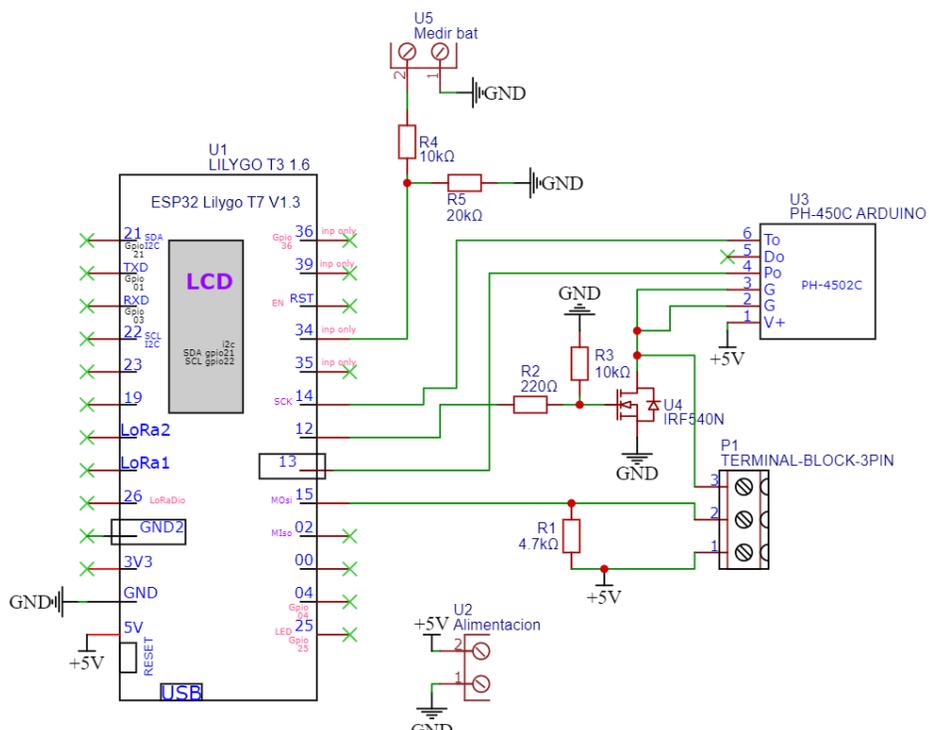


Figura 3.19.- Circuito de la boya sensórica

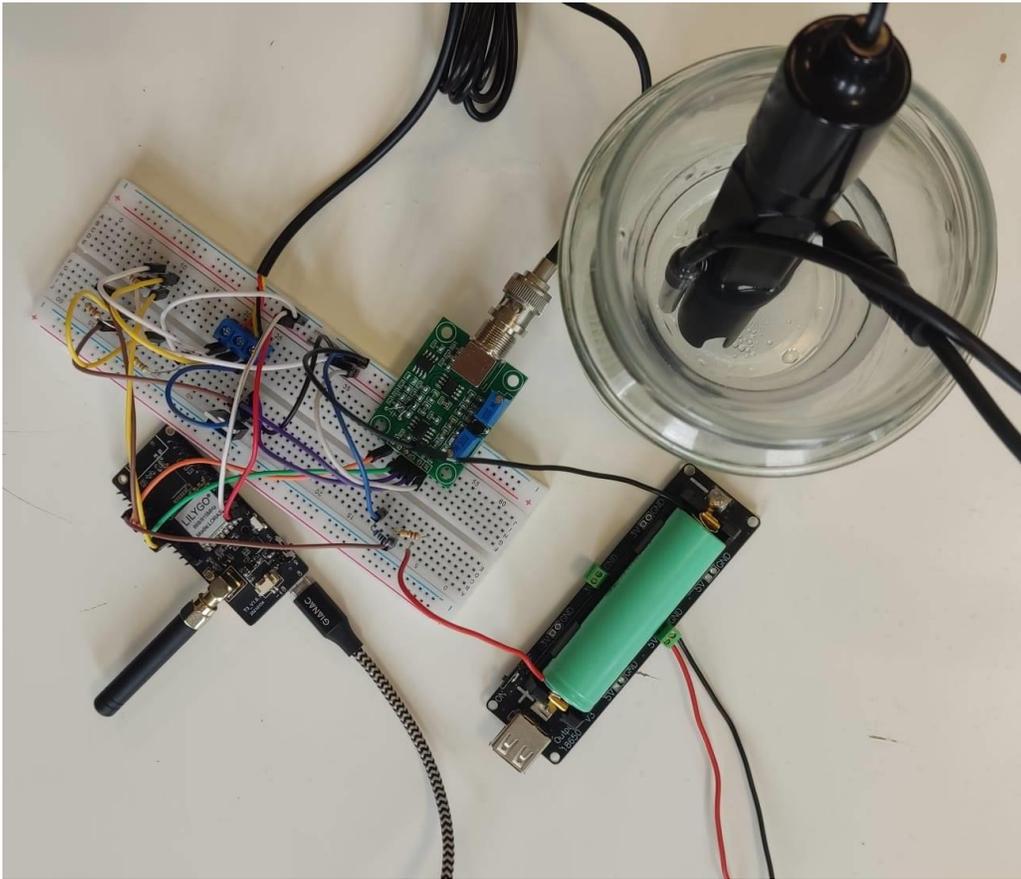


Figura 3.20.- Circuito de prueba de la boya

El diseño de la Placa de Circuito Impreso (PCB), mostrado en las Figuras 3.21 y 3.22, contempla el espacio necesario para la colocación de la antena transmisora de la señal LoRa, así como la posibilidad que aporta la propia LilyGo de separarla de la placa mediante un cable adicional, y permite una rápida inserción o retirada de los componentes, al montarse sobre pines y no directamente sobre la placa, de cara a futuras mejoras o reparaciones.

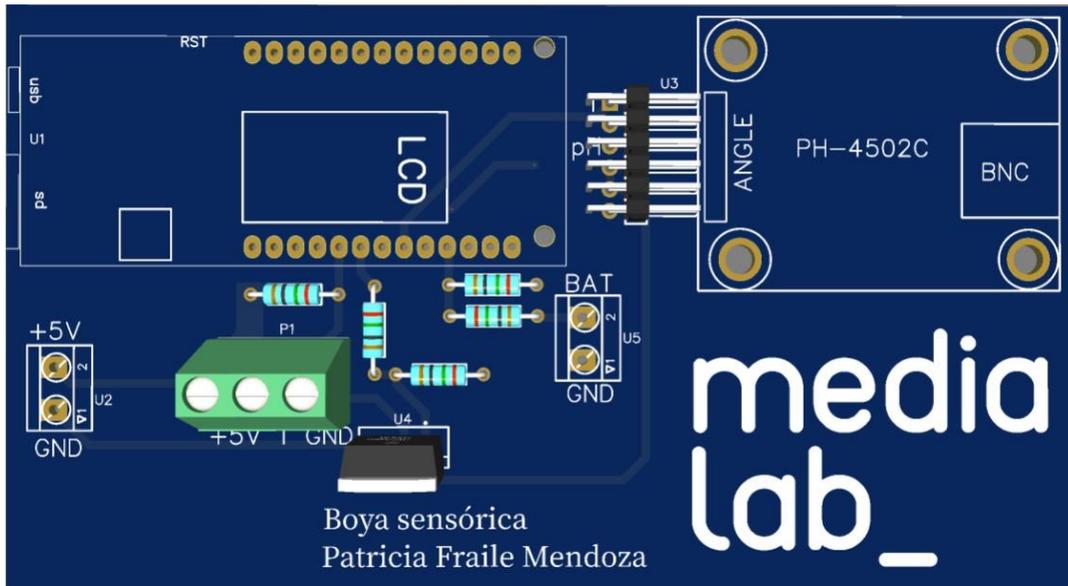


Figura 3.21.- Cara superior de la PCB diseñada

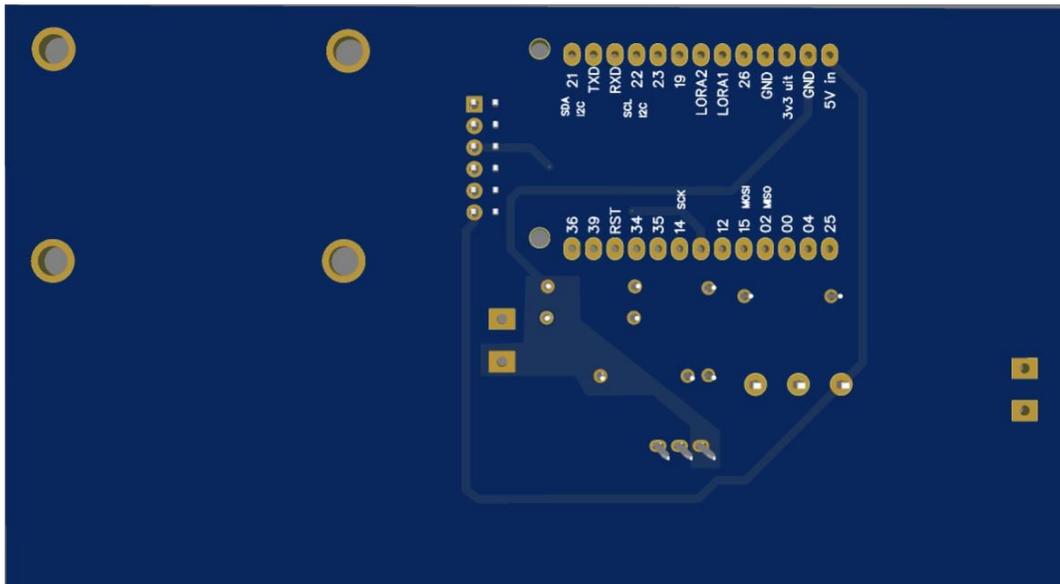


Figura 3.22.- Cara inferior de la PCB diseñada



3.5.2.- Manejo de datos

El código de funcionamiento implementado en la LilyGo, incluido en el Anexo II, se encarga de tomar las medidas y de su transmisión por la red LoRaWAN. Un flujograma que describa el planteamiento seguido se muestra en la Figura 3.23. Para más detalle, se recomienda acudir al Anexo y analizar los comentarios adjuntos en el mismo.

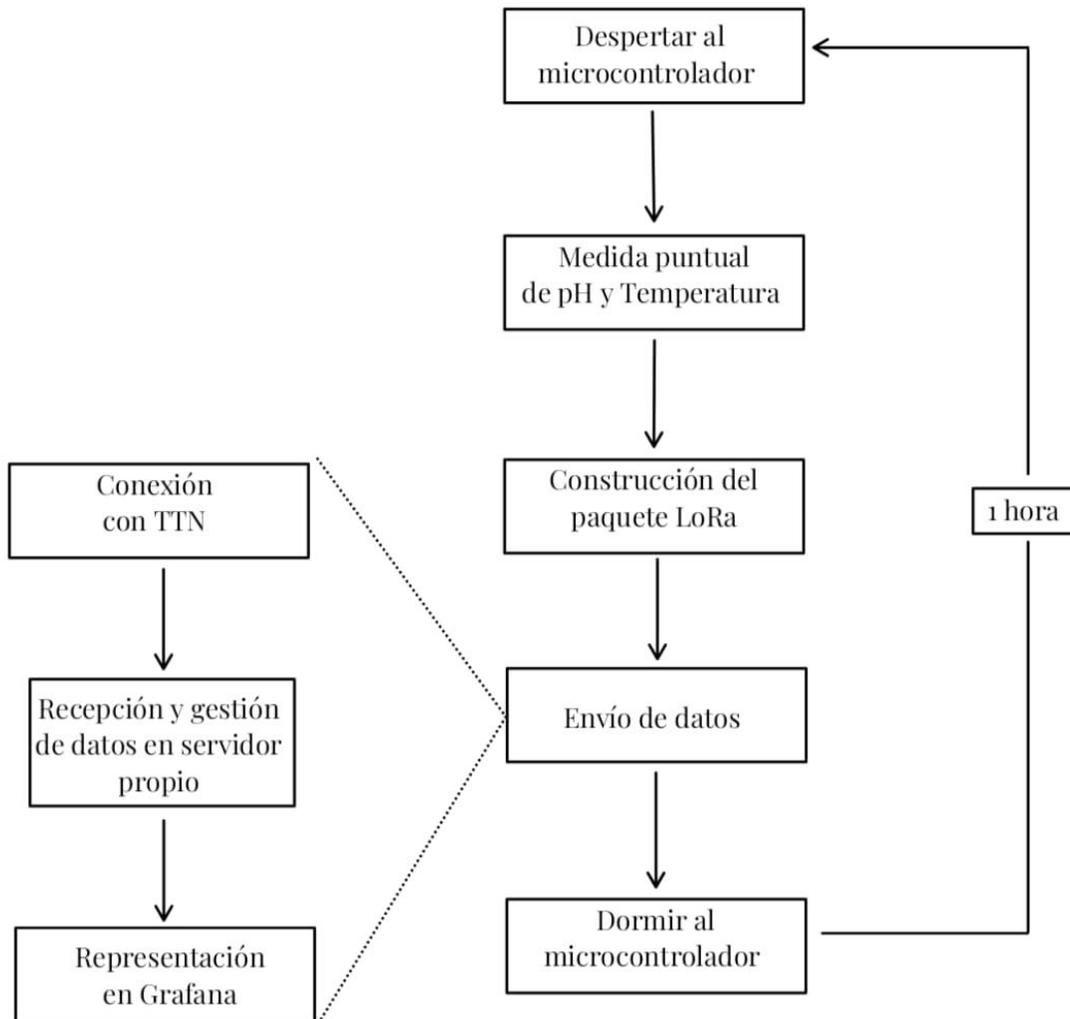


Figura 3.23.- Flujograma del funcionamiento del prototipo

En el envío de datos se engloban varios pasos adicionales. En primer lugar, la conexión con TTN, en la que se tratan los datos transmitidos por LoRa en forma de bytes



como se mencionó anteriormente. En la Figura 3.24 se puede observar una panorámica del menú de la aplicación creada para la boya en The Things Network, que permite acceder al historial de los mensajes enviados por los nodos vinculados a ella.

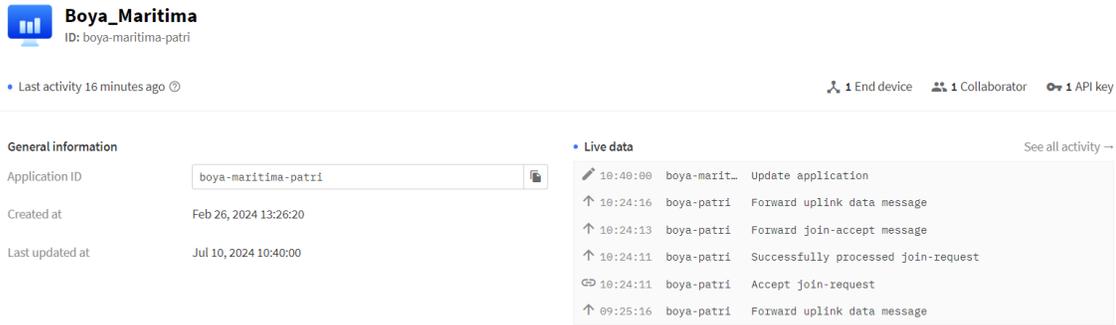


Figura 3.24.- Menú de la aplicación creada en TTN para la boya sensórica

En el apartado End devices, se puede acceder a los distintos nodos conectados a la aplicación llamada Boya_Maritima, tal y como se puede ver en la Figura 3.25.



Figura 3.25.- Listado de nodos vinculados a la aplicación en TTN

Una vez dentro del nodo, en este caso boya-patri, podemos acceder a varios menús adicionales como un resumen general, los datos transmitidos y los payload formatters, entre otros tal y como se ve en la Figura 3.26.

En el resumen se pueden ver datos como el nombre del nodo, la banda de frecuencia para la transmisión y la información de activación. En este último apartado se encuentra la AppEUI (Identificador único de aplicación), el DevEUI (Identificador único del dispositivo, dado de fábrica) y la AppKey, una clave compartida entre el nodo y la red. Estos valores



deben incluirse en el código implementado en el microcontrolador para poder establecer la conexión entre la boya y TTN [30].

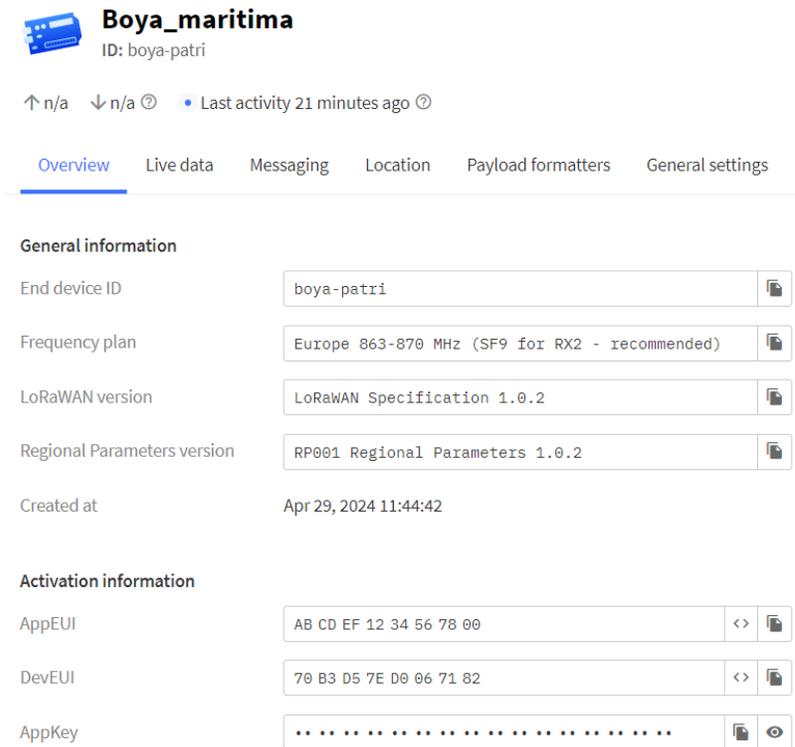


Figura 3.26.- Menú disponible del nodo de la boya

El apartado más relevante del menú es el correspondiente a los payload formatters, en el que se implementa un código en JavaScript que permitirá reconvertir los datos transmitidos en el paquete LoRa en forma de bytes, a valores con unidades del sistema internacional. Sabiendo que, según el código, los valores de pH se implementan entre las posiciones 0 y 1 del paquete, la temperatura del dispositivo entre la 2 y la 3, la temperatura del agua entre la 4 y la 5 y el porcentaje de la batería entre la 6 y la 7, sabiendo que cada posición corresponde a un byte, se pueden extraer de nuevo los datos medidos por los sensores, mediante el código mostrado en la Figura 3.27, presente tanto en el apartado Uplink como en el Downlink. Tal y como se comentó anteriormente, hay un tamaño máximo



de bytes a transmitir en función del SF, en este caso al tratarse de SF7 dicho tamaño eran 222 bytes, por lo que nuestro paquete cumple ampliamente con el límite al solo requerir 8 bytes, correspondientes a las 8 posiciones en las que se almacenan los datos.

Uplink Downlink

Setup

Formatter type *

Custom Javascript formatter

Formatter code *

```
1 function decodeUplink(input) {
2   var data = {};
3   var bytes = input.bytes;
4
5   data.valor_pH = ((bytes[1] << 8) | bytes[0])/100;
6   data.valor_temp_elec = ((bytes[3] << 8) | bytes[2])/100;
7   data.valor_temp1m = ((bytes[5] << 8) | bytes[4])/100;
8   data.valor_bat = ((bytes[7] << 8) | bytes[6]) / 100;
9   return {
10    data: data,
11    warnings: [],
12    errors: []
13  };
14 }
```

Figura 3.27.- Payload formatters del nodo en TTN

Una vez hecho esto los datos se transmiten a Influx mediante un flujo programado en Balena, representado en la Figura 3.28, en el que se observan varios bloques.

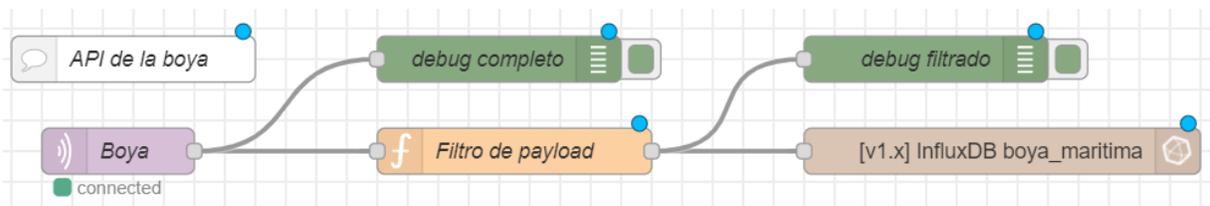


Figura 3.28.- Flujo de datos en Balena



El llamado Boya es una conexión a un nodo de una aplicación, en este caso de la plataforma de TTN, presente en MQTT. Para ello definimos un usuario, correspondiente al nombre del nodo y una contraseña, una API asociada al mismo que, adicionalmente y para más comodidad, guardaremos también en un bloque de comentario por si requiere su uso de nuevo. De este bloque surgen otros dos, uno de debug y otro de tipo función llamado filtro de payload. Esto se debe a que Boya devuelve el payload completo, es decir, los valores medidos por los sensores, pero también otros datos adicionales que definen el estado del nodo o de la transmisión, que no son relevantes para su posterior almacenamiento en la base de datos de Influx. Por este motivo, se implementa un filtro con la configuración mostrada en la Figura 3.29, de forma que el payload se reduce únicamente a los valores de las distintas variables a medir.

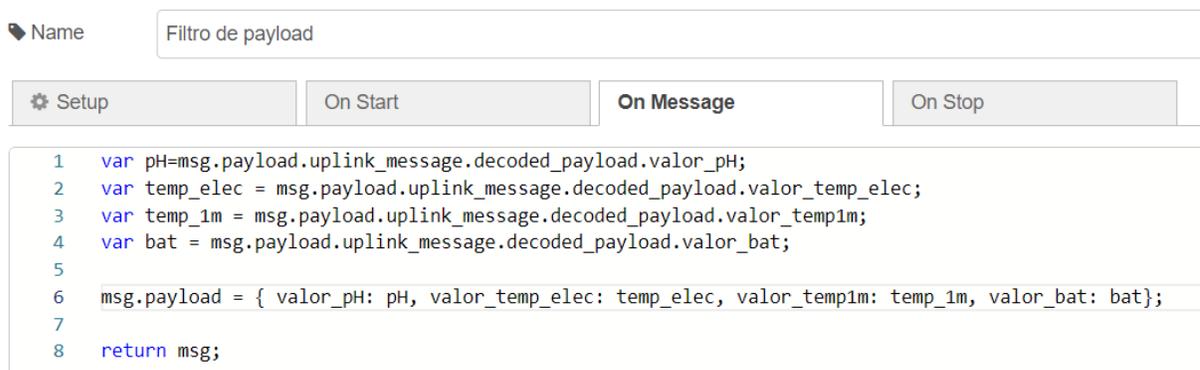


Figura 3.29.- Configuración del filtro de payload en Balena

En último lugar, se indica mediante el bloque correspondiente a Influx, la base de datos en la que almacenar las medidas realizadas. Será a partir de los valores almacenados en dicha base de datos, cuando se creará el panel de visualización de los mismos mediante Grafana.

Los datos recabados por los sensores, como son la temperatura y el pH del agua del mar y la temperatura de funcionamiento del circuito electrónico se representan tal y como se muestra en la Figura 3.30. Adicionalmente a las medidas también se pueden visualizar indicadores de calidad cuyos valores límite se corresponden con los determinados por el



Instituto Nacional de Estadística y el Ministerio de Transportes del Gobierno de España para el mar cantábrico, lugar de emplazamiento del prototipo, en el caso del pH y la temperatura del agua, y con los establecidos por los diferentes Datasheet de los elementos electrónicos presentes en el circuito. El panel incorpora la posibilidad de observar las medidas en diferentes intervalos temporales, hasta una antigüedad de los mismos de 7 días seleccionándolo del desplegable de la esquina superior izquierda, o estableciendo unas fechas concretas en el calendario.



Figura 3.30.- Panel de visualización de datos en Grafana

4. DESPLIEGUE

4.1.- CIRCUITO FINAL

Una vez realizado el diseño, se debe comenzar con el montaje. En primer lugar, es necesario finalizar el circuito implementado en la PCB que se vio en las Figuras 3.14 y 3.15, mediante la soldadura o inserción de los componentes necesarios.

En este caso, las resistencias de protección, el transistor, los terminales y los pines sobre los que se colocarán el resto de los componentes se sueldan directamente a la placa mientras que el microcontrolador y el adaptador de señal se insertan en dichos pines. Adicionalmente el sensor de temperatura del agua se coloca en uno de los terminales siendo los otros dos uno para la medida de la batería y el otro para la propia alimentación de los sensores. Una vez realizado todo esto, el circuito completo formado por la PCB de la boya sensorica, el panel solar, los sensores y la batería tendría el aspecto representado en la Figura 4.1.



Figura 4.1.- Montaje del circuito electrónico completo

4.2.- MONTAJE

En cuanto al encapsulado del circuito ya completo visto en el apartado anterior y el montaje en sí del propio dispositivo, se ha optado por emplear como cuerpo principal de la boya un flotador tipo salvavidas, similar al representado en la Figura 4.2, debido a su gran flotabilidad. Como detalle a considerar, el salvavidas debe ser amarillo ya que la boya entra en la categoría SADO (Tabla 2.1) por lo que se cambiará su color con ayuda de cinta adhesiva.



Figura 4.2.- Flotador empleado como cuerpo de la boya

Por otro lado, para el almacenamiento estanco de la electrónica, se ha empleado una caja comercial que dispone de distintas salidas, visible en la Figura 4.3. Esto permite extraer y sumergir las sondas de los sensores para la toma de medidas del agua así como el panel solar y, debido al buen número de ellas que se encuentran disponibles, favorece la incorporación de más dispositivos de medida de cara al futuro.



Figura 4.3.- Caja estanca



La caja debe sujetarse a la boya con ayuda de algún soporte. En este caso, debido a que la caja es comercial y por lo tanto no es posible rediseñarla, se ha diseñado el soporte en sí con ayuda de la impresión 3D. Como se puede ver entre las Figura 4.4 y 4.5 consta de dos partes principales como son el propio espacio para la caja, incluyendo el saliente que fija la unión mediante un tornillo, y el enganche específico para las asas del salvavidas.



Figura 4.4- Parte delantera del soporte

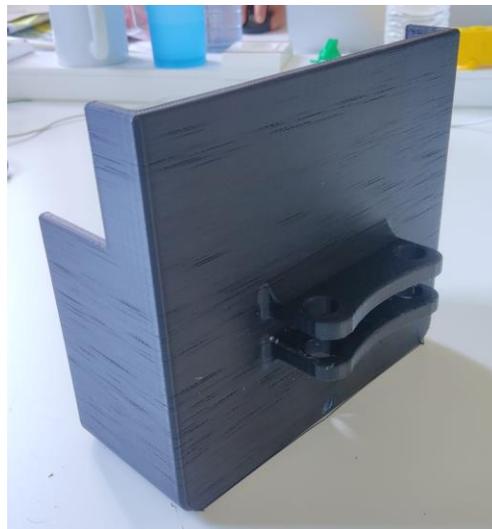


Figura 4.5.- Parte trasera del soporte



Además del soporte de la caja, es necesario sujetar también el panel solar. Por este motivo se ha optado de nuevo por realizar un diseño en 3D de una pieza sencilla similar a la representada en la Figura 4.6, que permite su unión a la caja estanca mediante un tornillo de acero inoxidable y que facilita la conexión con el circuito presente en su interior.

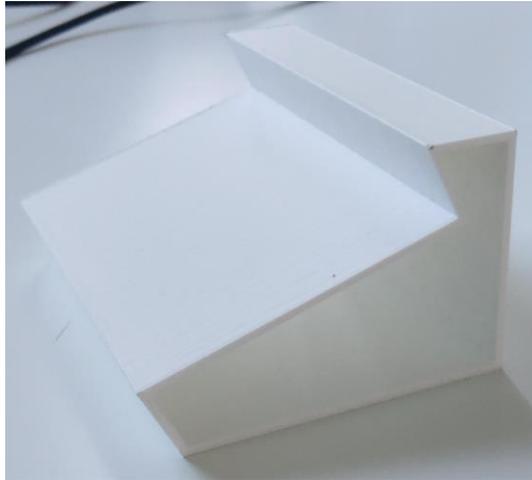


Figura 4.6.- Soporte del panel solar

La electrónica se ha situado dentro de la caja estanca empleando piezas diseñadas en 3D, de manera que los cables de las sondas propios de los sensores queden debidamente situados respecto a las salidas de la misma. Las sujeciones se han realizado mediante tornillos de acero inoxidable para evitar la corrosión y, con ayuda de bridas, se han recogido los cables para un manejo más cómodo. El conjunto representado en la Figura 4.7 muestra el montaje de manera que, si se quiere extraer el circuito para modificaciones o arreglos, simplemente se debe abrir la tapa de la caja y extraer la pieza azul, sobre la que va situada la electrónica.

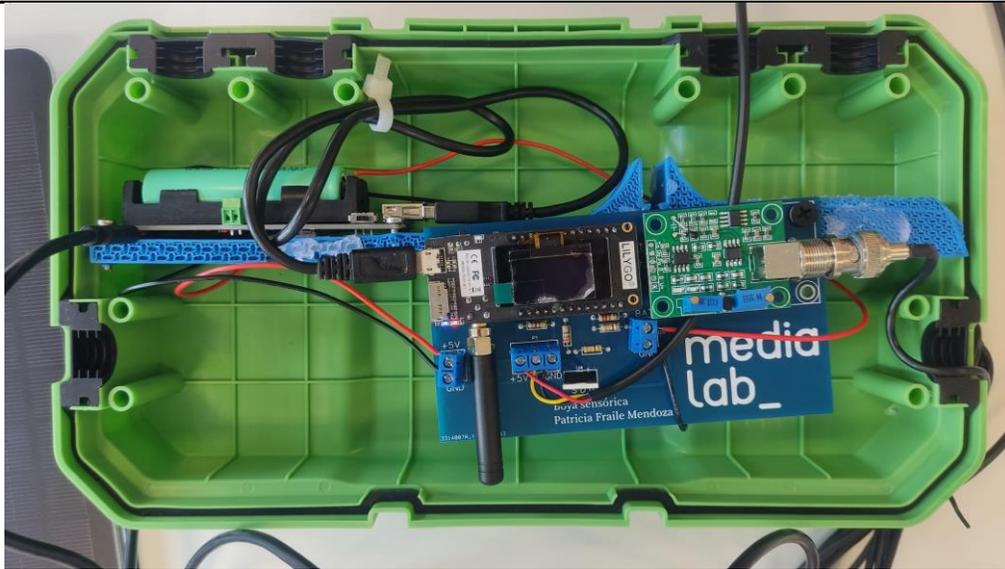


Figura 4.7.- Disposición de la electrónica en la caja estanca

Tras el proceso de montaje, el diseño final y completo del dispositivo se puede ver en la Figura 4.8. El panel solar y las sondas se encuentran por fuera de la caja estanca, colocada en posición vertical para aprovechar la disposición de las salidas para las sondas, y esta se sujeta al salvavidas que posteriormente se pintará de color amarillo con ayuda del soporte diseñado en 3D. Adicionalmente a posteriori, se ha añadido un palo guía al que sujetar las sondas, no solo para evitar su libre flotación si no también para poder adquirir datos a una cierta profundidad, cercana al metro. De esta manera, tal y como se mostró en la Figura 3.10, puede dar comienzo el ciclo de envío de datos de la boya hasta la llegada de los mismos al usuario.



Figura 4.8.- Montaje final

4.3.- EMPLAZAMIENTO

Además de la electrónica y el montaje, también es importante la ubicación del dispositivo. Debe encontrarse cerca de una antena receptora, estar en contacto directo con el agua y a la vez situarse en un espacio abierto. Teniendo en cuenta dichas necesidades, se consideró una localización inicial en el Acuario de Gijón, como se muestra en la Figura 4.9, cercana a la fundación Revillagigedo que ya dispone de una antena LoRa de la red de la universidad (Figura 3.5). Además, el Bioparc Acuario de Gijón se encuentra a menos de 1 kilómetro de esta ubicación y dispone de varios accesos al mar. Tras ponernos en contacto con la institución, planteándoles las tres posibles ubicaciones de la Figura 4.10 finalmente se decidió emplear la indicada con el número 2.



Figura 4.9.- Panorámica de la zona de la fundación Revillagigedo



Figura 4.10.- Panorámica de ubicaciones disponibles para la boya en el Acuario

Esta zona presenta ventajas como el resguardo contra el oleaje, que disminuye posibles problemas de vuelco y flotabilidad. También dispone de cercanía al paseo marítimo que bordea la costa lo que resulta de utilidad a la hora de introducir y sacar la boya del agua para la implementación de mejoras o solución de problemas. Por último, al tratarse de una zona sin acceso por playa, y por lo tanto con el fondo marino a una distancia considerable, las variaciones del nivel del mar no afectan al contacto de los sensores con el agua como podría



ocurrir por ejemplo en la zona 1, en la que cabría la posibilidad de que al bajar la marea la boya quedara estancada en la arena.

Además, este es un proyecto que acerca la institución universitaria al Acuario, interesados también en cooperar con centros de referencia científicos, abriendo la puerta a posibles colaboraciones de cara al futuro.

Finalmente, la boya se colocó en la posición acordada el jueves 18 de Julio de 2024, aproximadamente a las 13 horas, con la colaboración de una docente de la Escuela de Marina. El momento de introducirla en el agua se puede observar en la Figura 4.11.



Figura 4.11.- Despliegue de la boya

Se puede comprobar que el prototipo no consta de lastre. Eso es debido, principalmente, a la presencia de una plataforma flotante que se encuentra en el lugar de despliegue. De esta forma el amarre se realiza mediante cuerdas, a la propia plataforma, asegurando que esta permanezca fija en su posición. En la Figura 4.12 se muestra el aspecto del prototipo, una vez introducido en el agua y sujetado a la plataforma. Como se puede comprobar en la imagen el panel solar permanece fuera del agua mientras que las sondas se encuentran sumergidas, realizando así las mediciones pertinentes.



Figura 4.12.- Boya en ubicación final



5. VALIDACIÓN Y RESULTADOS

5.1.- VALIDACIÓN

Tras la colocación del dispositivo, es importante comprobar que todo funciona correctamente. En este caso, el prototipo continúa enviando datos cada hora por lo que el método de medida se mantiene. Sin embargo, se ha detectado un posible problema en relación a la medida del pH ya que siempre se obtiene un valor de 14, por lo que el hardware se revisará el lunes 22 de Julio.

5.2.- RESULTADOS

El análisis de las medidas realizadas se centrará en los datos obtenidos tras las 24 horas transcurridas desde el despliegue.

5.2.1.- Temperatura del agua

Si bien es cierto que la ausencia de oleaje y corriente puede evitar la entrada de agua fresca proveniente del mar a la zona en la que se ha situado la boya, aun así, pueden observarse variaciones en la temperatura del agua en horas clave. Tal y como se representa en la Figura 5.1 se puede ver que, en torno al mediodía, las horas en las que comienza el período de máxima radiación solar, la temperatura aumenta ligeramente. Por otro lado, en horas cercanas al atardecer, esta disminuye de nuevo ligeramente.

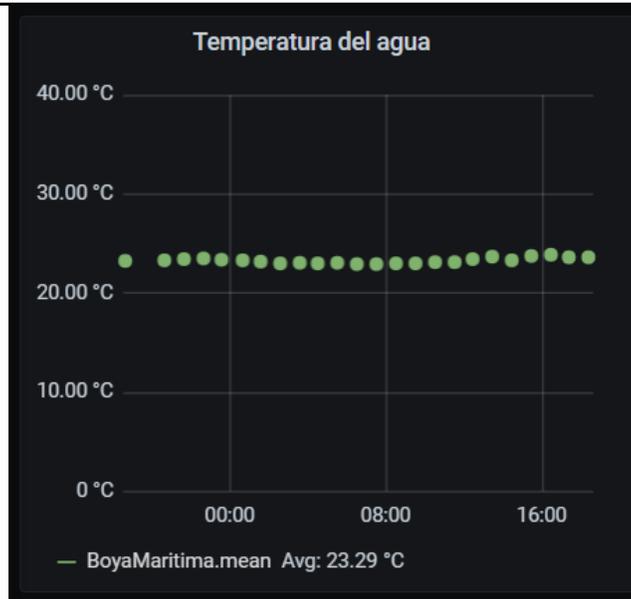


Figura 5.1.- Evolución real de la temperatura del agua

5.2.2.- PH del agua

Los valores medidos de este parámetro se representan en la Figura 5.2, permanecen constantes en todo momento y toman siempre el valor de pH=14, es decir, el valor máximo posible.

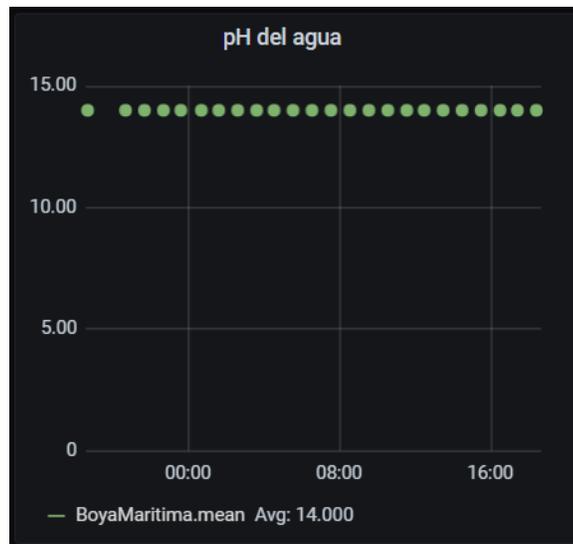


Figura 5.2.- Evolución real del pH en el agua



Esto demuestra, o bien que ha habido un fallo físico, como una mala conexión de la placa adaptadora de la señal de pH, o bien que el código de programación para la adquisición de datos no es válido y por lo tanto se debe realizar una recalibración vía software.

5.2.3.- Temperatura del dispositivo

De nuevo, al estar este sensor implementado en la placa de medida del pH, los datos obtenidos se mantienen constantes en el tiempo, sin variaciones aparentes, como se muestra en la Figura 5.3. Esto incita a pensar que puede haber un problema con dicha placa o con el código de adquisición de datos, que se intentará solucionar tras la correspondiente revisión del dispositivo.



Figura 5.3.- Evolución real de la temperatura del dispositivo

5.2.4.- Calidad del agua

Como se mencionó anteriormente en este TFG, también se considera un concepto más amplio de calidad del agua, que engloba tanto la temperatura como el pH. Para poder referirnos a una buena calidad, ambos parámetros deberían mantenerse en los límites establecidos por el Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible del Gobierno de España y



el Instituto Nacional de Estadística [13][14]. En este caso, debido a la medida errónea por parte del sensor de pH y a la posible ausencia de agua nueva del mar presente en la zona de despliegue, la calidad no se puede considerar como buena tal y como refleja la Figura 5.4.

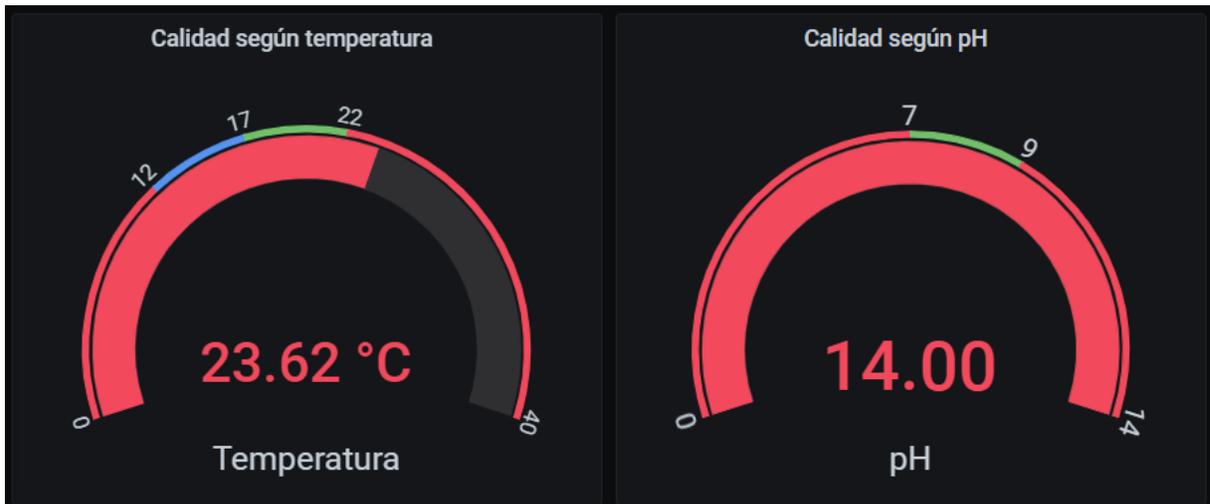


Figura 5.4.- Calidad en base a los parámetros medidos

5.2.5.- Batería del dispositivo

Respecto a la batería, una vez incorporado el panel solar, debería poder verse como a lo largo de la noche, en ausencia del sol, esta se descarga mientras que, de día, debería o bien permanecer constante porque el consumo se iguale a la producción de energía, o bien incrementarse el porcentaje de carga disponible. Debido al clima soleado presente durante estas 24 horas de evaluación inicial del funcionamiento de la boya, se puede observar en la figura 5.5 como, efectivamente, el porcentaje de batería disponible aumenta durante las horas de sol, mientras que, por la noche, disminuye muy sutilmente debido al bajo consumo de la boya.

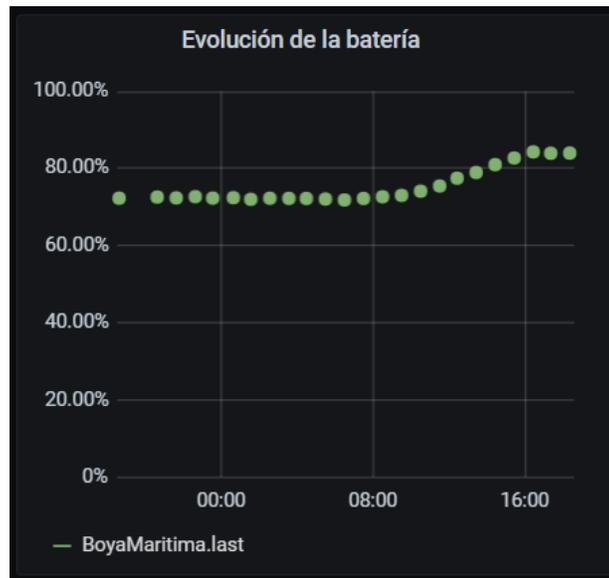


Figura 5.5.- Evolución real de la carga disponible



6. CONCLUSIONES

El presente TFG buscaba solventar en la medida de lo posible la falta de autonomía en cuanto a sistemas de medida de parámetros relacionados con la calidad del agua. Por ello se ha desarrollado el ya visto prototipo, para el que se plantearon unos ciertos objetivos en el apartado 1.2.

- Respecto al Objetivo 1: determinación de parámetros a medir, selección de sensores a emplear y ubicación del dispositivo. Se concluye que se han podido cumplir todos los apartados mencionados. Los parámetros finalmente fueron el pH y la temperatura del agua así como la temperatura de la electrónica y la batería disponible, los sensores son los mencionados en el apartado 3 y la ubicación final se estableció en base al espacio disponible ofertado por el Acuario de Gijón tal y como se mencionó en el apartado 4.
- En relación al Objetivo 2: Propuesta de diseño de un circuito que integre la medida de los parámetros seleccionados, el envío de la información asociada mediante una red LPWAN y la alimentación del mismo. Se concluye que, de nuevo, se ha cumplido todo lo indicado. En este caso el circuito comprende no solo las conexiones necesarias para los sensores, sino también los medios necesarios para la alimentación. Además, se empleó la red LPWAN de la Universidad de Oviedo.
- Con respecto al Objetivo 3: Diseño de la interfaz gráfica que permita observar el histórico de los datos recabados. En este caso se seleccionó Grafana que permite precisamente generar paneles visuales de representación.
- En cuanto al Objetivo 4: Garantizar la accesibilidad por parte del usuario de los datos recabados. Se comprueba que, efectivamente, el panel de Grafana es



accesible desde diversos dispositivos y representa los datos recabados por parte de la boya.

- Por último, respecto al Objetivo 5: Validación de funcionamiento en condiciones reales. Se puede concluir que se ha cumplido con lo solicitado al disponer de un prototipo funcional que retransmite datos y los envía mediante una red LPWAN para su posterior representación, tal y como indica el título de este TFG, pese al mal funcionamiento de la placa adaptadora de la señal de pH.

Adicionalmente se han adquirido diversos conocimientos respecto a las redes inalámbricas, además de ampliar y afianzar conocimientos sobre la electrónica y su manejo en cuanto a dispositivos reales se refiere.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Rendón, L. A. Q., Agudelo, E. A., Hernández, Y. A. Q., Gallo, S. A. C., & Arias, A. F. O. (2010). Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos. *Gestión y ambiente*, 13(3), 51-64.
- [2] Asale, R.-, & Rae. (s. f.). *boya* | *Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la Lengua Española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/boya>
- [3] *Sistema de balizamiento marítimo y otras ayudas a la navegación* (pp. 5–18). (2011). Ministerio de Fomento. Recuperado de https://www.puertos.es/Documents/1-IALA-MBS_2010%20ES-PdE.pdf
- [4] *Infraestructuras (I) Redes Inalámbricas: Capítulo 11 | Guía de Industria 4.0*. (2020, 2 julio). Tecnología Para los Negocios. <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-11-infraestructuras-i-redes-inalambricas/>
- [5] Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 3(5), 164-173.
- [6] Blázquez, J. P. (2015). Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos. *Universitat Oberta de Catalunya*, 10-14.
- [7] TSF Sistemas RFID. (s. f.). *Etiquetas RFID activas*. Sistemas RFID. <https://web.archive.org/web/20181014110243/https://sistemas-rfid.es/etiquetas-rfid-activas>
- [8] “What is the maximum communication range of the Bluetooth connection? *Print*. (2013, 19 abril). <https://www.sony.com/electronics/support/articles/00014085>
- [9] *S.E. de Digitalización e Inteligencia Artificial y S.E. de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales-Wi-Fi*. (s. f.). <https://avancedigital.mineco.gob.es/banda-ancha/tecnologias/inalambrico/Paginas/Wi-Fi.aspx#:~:text=La%20nueva%20versi%C3%B3n%20del%20est%C3%A1ndar,100%20m%20en%20el%20exterior.>

- [10] Images, M. W. / G. (2017, 9 noviembre). La continua aceleración del calentamiento global lleva consigo un irremediable aumento del nivel del mar: los expertos alertan de que aumentará 30 centímetros para 2050, independientemente de cuánto reduzcamos las emisiones de carbono. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/el-aumento-de-la-temperatura-del-mar>
- [11] *Folleto Informativo pH* (pp. 1–2). (2002). Recuperado de https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf
- [12] Indicadores de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible - Objetivo 14. Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible - Indicador 14.3.1. Acidez media del mar (pH) medida en un conjunto convenido de estaciones de muestreo representativas. (s/f). INE. Recuperado el 30 de abril de 2024, de <https://www.ine.es/dyngs/ODS/es/metadatos.htm?idSub=509>
- [13] Mor, P. M. (s/f). *Midiendo la temperatura del mar*. Gob.es. Recuperado el 30 de abril de 2024, de https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/en40_45.pdf
- [14] INE - Instituto Nacional de Estadística. (s. f.). *Acidez media del mar (pH) en las aguas territoriales españolas por demarcación marina y periodo*. INE. <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?tpx=54696>
- [15] html.alldatasheet.com. (s. f.-b). *18B20 datasheet(1/27 Pages) DALLAS*. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/58559/DALLAS/18B20/179/1/18B20.html>
- [16] (S/f). Datasheet pH sensors. Recuperado el 6 de junio de 2024, de <https://www.supmeaauto.com/uploads/2101/ph-sensor-datasheet.pdf>
- [17] *Modulo PH analogico PH-4502C*. (s. f.). Soporte Sawers Bolivia. <https://sawerssrl.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000164678-modulo-ph-analogico-ph-4502c>
- [18] IoT Consulting. (2021, 15 marzo). *LoRa vs LoRaWAN – ¿Cuál es la diferencia?* Tu Fuente Experta En IoT. <https://iotconsulting.tech/lora-vs-lorawan/>
- [19] Larrad, I. R. (2023, octubre). IoT Wireless Technologies & Intro to LoRaWAN & Uniovi LoRaWAN Network.

- [20] Porto, J. P., & Gardey, A. (2022, 22 febrero). *Nodo - Qué es, en la física, en la informática y formas*. Definición.de. <https://definicion.de/nodo/>
- [21] *Gateway: ¿Qué es y para qué sirve?* - AlaiSecure - Perú. (2021, 14 diciembre). AlaiSecure - Perú. <https://alaisecure.pe/glosario/gateway-que-es-y-para-que-sirve/>
- [22] Karanja, D. (2023, 19 mayo). How To Build a LoRaWAN Network and Connect It to a Server - DusunIoT. *DusunIoT*. <https://www.dusuniot.com/es/blog/build-lorawan-network-and-connect-to-server/>
- [23] Ignacio, R. L. (2024, 16 febrero). Planificación, despliegue, y validación operacional de una red IoT basada en LoRa para la monitorización masiva de sensores a nivel de campus. Universidad de Oviedo. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/71481>
- [24] (S/f-b). Tinytronics.nl. Recuperado el 8 de julio de 2024, de <https://www.tinytronics.nl/en/power/solar-energy/solar-panels/solar-panel-with-dc-dc-converter-and-usb-5v-1a>
- [25] *18650 BATTERY SHIELD 5V/3V USB*. (s/f). tiendatec.es. Recuperado el 17 de junio de 2024, de <https://www.tiendatec.es/raspberry-pi/raspberry-pi-alimentacion/999-18650-battery-shield-5v-3v-usb-8472496015301.html>
- [26] (S/f). Tinytronics.nl. Recuperado el 17 de junio de 2024, de <https://www.tinytronics.nl/en/power/batteries/18650/eve-18650-li-ion-battery-3100mah-10a-inr18650-33v>
- [27] alldatasheet.es. (s. f.). *IRF540N PDF*. <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/68172/IRF/IRF540N.html>
- [28] Danirmoya. (s. f.). *LPWAN-documentacion/tutoriales_lora/tutorial_soporte_i.PDF at main · 99danirmoya/LPWAN-documentacion*. GitHub. https://github.com/99danirmoya/LPWAN-documentacion/blob/main/tutoriales_lora/tutorial_soporte_i.PDF
- [29] The Things Network. (s. f.-b). *Que es la comunidad TTN*. <https://www.thethingsnetwork.org/community/jacinto-arauz/post/que-es-la-comunidad-ttn>
- [30] The Things Network (s. f. -b). *Airtime calculator for LoRaWAN with EU863-870 uplink and downlink* <https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/eu868>

