

Universidade de Vigo



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



# Sistema IoT para comunicaciones oportunistas en entornos marítimo-costeros

Raúl José Salgado García

Trabajo de Fin de Máster  
**Máster Universitario en Internet de las Cosas (IoT)**

Escola de Enxeñaría de Telecomunicación  
Universidade de Vigo

Tutor:  
Tiago Manuel Fernández Caramés  
José Manuel Cotos Yáñez

Curso 2024/2025



*Dedicatoria*

A todas las personas que me dieron su apoyo y ayuda para en el desarrollo del proyecto. A Carmela, Antía, Mateo, Natalia, Iago y Manuel. También a mi tutor Tiago por todo su apoyo.



# Resumen

Aunque la digitalización y el IoT están llegando a muchos sectores de la sociedad y la industria, el sector primario, y especialmente aquellas partes más tradicionalistas del mismo como las actividades de marisqueo, se están quedando bastante rezagadas en la incorporación de las nuevas tecnologías. La resistencia al cambio y la dificultad de implementación de soluciones en el mar provoca que las bateas no cuenten con ningún mecanismo de control o monitorización digital. Esto provoca la extrema ineficiencia del sector. En este trabajo se propone la creación de un sistema IoT que pueda ser expuesto a las extremas condiciones del mar para monitorizar ciertas variables de interés. En particular, el foco se puso en el control de la producción de mejillón en las bateas a partir de la medida de su hundimiento, que se produce por el engorde del producto. Dicha creación fue el resultado de varias fases sucesivas de diseño, implementación y pruebas del sistema. El resultado final es un dispositivo que ha demostrado ser capaz de enviar datos de forma segura desde el mar, aprovechándose de la tecnología de comunicación LoRaWAN, y utilizando un sistema de cosecha y almacenamiento de energía basado en paneles solares. Los datos enviados se ponen a disposición del usuario almacenados en una base de datos de series temporales, pudiendo visualizarlos a través de un panel de control. Todo esto se ha construido siguiendo el paradigma del Edge Computing Oportunista, realizando el procesamiento de la información lo más cerca posible de los dispositivos finales, no sobrecargando las infraestructuras del Cloud y permitiendo una cobertura flexible gracias al posible movimiento de los Gateaways de acceso al Cloud a las zonas desiertas de cobertura.

# Resumo

Aínda que a dixitalización e o IoT están chegando a moitos sectores da sociedade e a industria, o sector primario, e especialmente aquelas partes máis tradicionalistas do mesmo como as actividades de marisqueo, estanse quedando bastante atrás na incorporación das novas tecnoloxías. A resistencia ao cambio e a dificultade de implementación de solucións no mar provoca que as bateas non contén con ningún mecanismo de control ou monitorización dixital. Isto provoca a baixa eficiencia do sector. Neste traballo propónse a creación dun sistema IoT que poida ser exposto ás extremas condicións do mar para monitorizar certas variables de interese. En particular, púxose o foco no control da produción de mexillón nas bateas a partir da medida do seu afundimento, que se produce polo engorde do produto. Dita creación foi o resultado de varias fases sucesivas de deseño, implementación e probas do sistema. O resultado final é un dispositivo que demostrou ser capaz de enviar datos de forma segura dende o mar, aproveitándose da tecnoloxía de comunicación LoRaWAN, e empregando un sistema de colleita e almacenamento de enerxía baseado en paneis solares. Os datos enviados póñense a disposición do usuario almacenados nunha base de datos de series temporais, podendo visualizalos a través dun panel de control. Todo isto constrúíuse seguindo o paradigma do Edge Computing Oportunista, realizando o procesamento da información o máis preto posible dos dispositivos finais, non sobrecargando as infraestruturas do Cloud e permitindo unha cobertura flexible gracias ao posible movemento dos Gateways de acceso ao Cloud ás zonas desertas de cobertura.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y descripción del problema . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Estructura de la memoria . . . . .	3
<b>2. Estado del arte</b>	<b>5</b>
2.1. Transformación digital en el sector primario . . . . .	5
2.2. Digitalización en entornos marítimos . . . . .	6
2.3. IoT en Bateas . . . . .	9
<b>3. Diseño del sistema</b>	<b>11</b>
3.1. Lugar de implementación . . . . .	11
3.2. Tecnología de comunicación y microcontrolador . . . . .	11
3.2.1. Gateway LoRaWAN . . . . .	13
3.2.2. Dispositivo final LoRaWAN . . . . .	14
3.3. Arquitectura Edge Computing Oportunista (ECO) . . . . .	14
3.3.1. Contexto Edge Computing tradicional y oportunista . . . . .	14
3.3.2. Arquitectura de comunicaciones . . . . .	15
3.3.3. Arquitectura de procesamiento de datos . . . . .	17
3.4. Sensórica para estimación de producción de bateas . . . . .	18
3.4.1. Crecimiento del mejillón . . . . .	18
3.4.2. Estimación del crecimiento . . . . .	19
3.5. Energy Harvesting . . . . .	21
3.5.1. Consumo teórico del sistema . . . . .	22
3.5.2. Hardware disponible . . . . .	23
3.6. Construcción del sistema . . . . .	24
3.6.1. Consideraciones de seguridad . . . . .	24
3.6.2. Diseño de un contenedor ad-hoc . . . . .	25
<b>4. Implementación</b>	<b>27</b>
4.1. Configuración placa de desarrollo y gateway . . . . .	27
4.1.1. Configuración placa de desarrollo . . . . .	27
4.1.2. Configuración gateway LoRaWAN . . . . .	27
4.1.3. Configuración TTN . . . . .	28
4.1.4. Código de envío de datos . . . . .	29
4.2. Implementación de la arquitectura ECO . . . . .	30
4.2.1. The Things Network . . . . .	30
4.2.2. Instalación y configuración Raspberry Pi 4 . . . . .	30
4.2.3. MQTT y Node-RED . . . . .	31
4.2.4. InfluxDB y Grafana . . . . .	32
4.3. Construcción e instalación del sistema . . . . .	33
4.3.1. Proceso de construcción . . . . .	33

4.3.2. Instalación en batea . . . . .	34
<b>5. Pruebas y discusión de resultados</b>	<b>37</b>
5.1. Pruebas del sensor en tierra y agua . . . . .	37
5.2. Pruebas de consumo . . . . .	37
5.3. Pruebas de cobertura . . . . .	40
5.4. Pruebas de monitorización de temperatura y humedad . . . . .	41
5.5. Pruebas de uso en condiciones reales . . . . .	43
<b>6. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>45</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	45
6.2. Trabajo futuro . . . . .	47
<b>A. Planificación temporal y costes</b>	<b>51</b>
A.1. Planificación temporal de trabajo . . . . .	51
A.2. Costes estimados . . . . .	52
<b>B. Acceso y uso del repositorio de código del proyecto</b>	<b>55</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>57</b>

# Capítulo 1

## Introducción

En este primer capítulo se presenta una introducción a la motivación y el problema a resolver en el trabajo, se definen una serie de objetivos para resolver dicho problema y se describen las secciones a tratar a lo largo de la memoria.

### 1.1. Motivación y descripción del problema

La sociedad actual está inmersa en un proceso de digitalización extremo, que afecta a los hogares, la industria, las ciudades, etc. Surge como respuesta a la creciente necesidad de mejorar la eficiencia, la competitividad y la calidad de vida y está impulsada principalmente por el significativo avance en las tecnologías de la información y la comunicación que se ha experimentado en los últimos años.

En este contexto surge el paradigma del Internet de las Cosas (IoT), que se refiere a la integración de las “cosas” de uso diario, de bajo coste, en una red colectiva, pudiendo comunicarse entre ellos y con la nube. Así, se persigue recoger, transmitir y analizar datos de forma continua y automatizada.

El IoT está teniendo un impacto significativo en muchos sectores de la industria, en la logística o la sanidad, especialmente en aquellos lugares donde la infraestructura digital y las condiciones de conectividad están más desenvueltas. En el sector primario, sin embargo, se están encontrando mayores dificultades en la adopción de este tipo de tecnologías, debido principalmente a la dispersión geográfica, la falta de cobertura, la exposición de los dispositivos a condiciones climáticas y ambientales adversas y a la resistencia al cambio por parte de los actores implicados.

Estas adversidades se presentan de forma muy notable en las industrias cuya actividad económica se desarrolla sobre el agua, específicamente en el mar. Las condiciones climáticas en este caso son especialmente extremas y el propio agua salada es difícil de congeniar con la electrónica de los dispositivos. Además, el acceso a Internet resulta mucho más complejo, por la baja disponibilidad de cobertura y por la dificultad de propagación de las ondas electromagnéticas en este medio. Las soluciones desarrolladas para estos problemas están principalmente destinadas a las grandes embarcaciones e instalaciones, siendo costosas y garantizando un alto grado de seguridad para los viajes en alta mar. Las pequeñas embarcaciones e instalaciones, que principalmente desenvuelven su actividad en la bajura, se quedan a menudo sin estas tecnologías, lo que provoca el atraso del

sector en materia de digitalización, con la consecuente baja eficiencia y optimización. Los actores en este caso suelen ser muy tradicionalistas, con escasa exposición a tecnologías digitales, lo que deriva una actitud muy conservadora con respecto a la incorporación de las nuevas tecnologías en sus medios de trabajo.

El sector bateeiro es un perfecto ejemplo de ello. La digitalización existente en las bateas es directamente nula, más allá de algunos proyectos aislados que puedan estar llevándose a cabo. La eficiencia del sector es cada vez menor debido al cambio climático [1], teniendo los trabajadores que enfrentarse a nuevos problemas además de la peligrosidad del trabajo sobre las instalaciones y la exposición a condiciones climáticas adversas. A menudo se produce la pérdida de cuerdas a causa del fuerte oleaje, se pierde producto por su excesivo engorde, por falta de control, o incluso se puede producir el desplazamiento a la deriva de una batea por la rotura de su ancla. Todos estos problemas solo pueden ser monitorizados in situ, teniendo que desplazarse hasta las bateas, con el consecuente gasto de dinero y la pérdida de tiempo que ello supone. La única forma de conocer la carga de una batea y monitorizar el engorde del producto es acudiendo a ella y levantando cuerdas.

Este proyecto surge en el contexto del sector de las bateas de mejillón, buscando digitalizarlo a través de la implantación de dispositivos IoT en sus infraestructuras. El foco se sitúa principalmente en conseguir monitorizar desde tierra el estado de las mismas, evitando viajes innecesarios en barco, con dispositivos de bajo coste que resistan las condiciones climáticas a las que se exponen las bateas.

## 1.2. Objetivos

Una vez descrita la motivación y el problema a resolver se plantea como objetivo principal del trabajo el diseño, implementación y prueba de un dispositivo IoT orientado a la monitorización remota del estado de una batea. En concreto, se buscará monitorizar la carga actual de una batea para relacionarla con su producción. Ello comprende los siguientes subobjetivos:

- **Diseño del sistema:** Considerando el escenario de interés, se buscará desarrollar una solución con un fuerte compromiso entre utilidad, calidad y coste. Para ello, deberán tenerse en cuenta las siguientes cuestiones:
  - Las condiciones climáticas a las que estará expuesto el dispositivo: altas temperatura, mucho viento, lluvias, oleaje (agua salada) o mucha humedad ambiente (niebla). Ello también influirá en el lugar de instalación del dispositivo en la batea.
  - El tamaño del dispositivo debe ser reducido para no interferir con la operación rutinaria de los trabajadores en la batea.
  - Al no disponer de corriente eléctrica en las bateas, el dispositivo deberá alimentarse a través de algún sistema de energy harvesting. Teniendo esto en cuenta, el funcionamiento del dispositivo deberá ser lo más eficiente posible, requiriendo las mínimas necesidades de alimentación posibles. Ello influye no solo en la electrónica, sino también en los protocolos de comunicación a utilizar y en la programación de los tiempos de actividad e inactividad.
  - El sistema deberá utilizar sensores del mínimo coste posible que puedan estimar la carga de la batea. Para ello, debe estudiarse el sistema de producción y buscar formas de medir

su carga.

- Se necesitará utilizar un protocolo de comunicación de larga distancia y bajo coste. Debe tenerse en cuenta la cobertura existente en el mar en los polígonos de bateas.
- **Selección de hardware y software:** Una vez diseñado el sistema y conociendo cada una de las partes que serán necesarias para construir el sistema final, será necesario determinar el hardware y software concretos que permitirán construir dicho sistema.
- **Construcción del sistema:** Una vez se han adquirido todas las partes, se construirá el dispositivo final. Se utilizarán para ello materiales de bajo coste pero que sean suficientemente resistentes, teniendo de nuevo en cuenta las cuestiones climáticas mencionadas.
- **Prueba del sistema en laboratorio y en entorno real:** Se realizarán diferentes pruebas del sistema construido para verificar su funcionamiento y validar el resto de etapas previas. Dichas pruebas incluirán:
  - Prueba del sensor, tanto sobre tierra, como agua estanca, como sobre el mar, para determinar si su funcionamiento y forma de medición son correctas.
  - Prueba de cobertura, tanto sobre tierra como en el mar, indicando los tiempos e indicadores de calidad en cada caso.
  - Pruebas de condiciones de funcionamiento. Para ello, se monitorizarán variables ambientales dentro del sistema, intentando verificar que estas sean las indicadas para el correcto funcionamiento del dispositivo.
  - Pruebas de consumo del dispositivo. Debe medirse el consumo cuando el dispositivo está activo e inactivo, teniendo en cuenta el tiempo de ejecución de cada modo.
  - Pruebas de uso real. Se dejará el sistema durante varios días en una batea para verificar su funcionamiento. Así, se enfrentará a periodos de luz directa, sin luz y con diferentes condiciones climáticas y de oleaje.

### **1.3. Estructura de la memoria**

Esta memoria recoge, de manera resumida, el trabajo llevado a cabo para diseñar, construir y probar una solución IoT en el contexto del sector de las bateas de mejillón. La memoria se desarrolla en la siguiente estructura:

1. **Introducción:** presentación de la motivación del trabajo, del problema a resolver y de la solución y objetivos propuestos.
2. **Estado del arte:** Se ahondará en el estado del conocimiento en el contexto de IoT en el sector primario, más concretamente en entornos marítimo-costeros. Se destacarán paradigmas, arquitecturas, sistemas y protocolos actualmente utilizados para estas aplicaciones.
3. **Diseño del sistema:** Describe el proceso de diseño de la solución final, incluyendo la arquitectura de tecnologías y comunicaciones para el sistema ECO, los circuitos y la sensórica a utilizar y el sistema de energy harvesting.

4. **Implementación del sistema:** Describe cómo se llevó a cabo el desarrollo real del sistema, cómo fue la construcción del dispositivo y su instalación.
5. **Pruebas y discusión de resultados:** Todos los experimentos llevados a cabo para la prueba del sistema serán descritos; incluyendo pruebas de cobertura, de los sensores, de consumos y de condiciones climáticas y resistencia del sistema.
6. **Conclusiones y trabajo futuro:** En base a los resultados obtenidos en las pruebas se llegará a una serie de conclusiones sobre el proyecto. Estas además pondrán de manifiesto ciertas ampliaciones que se podrían hacer a futuro para mejorar el dispositivo.
7. **Anexos:** Se incorporan al final del documento un anexo de planificación temporal y de costes del proyecto y un anexo de referencia al repositorio donde se han depositado los códigos utilizados, con instrucciones para su uso.

# Capítulo 2

## Estado del arte

Para poder desarrollar una solución lo más útil posible, es muy importante conocer el estado del mercado, los problemas a los que se enfrentan sus profesionales día tras día y las soluciones existentes para estos. La innovación no pasa por inventar algo nuevo, sino por utilizar palancas existentes de formas novedosas y creativas. En todos estos temas se profundizará a la largo de este capítulo.

### 2.1. Transformación digital en el sector primario

Se entiende la transformación digital y especialmente el IoT como algo de uso principalmente en hogares e industrias ya tecnológicas o grandes fábricas. Lugares donde las instalaciones de comunicaciones y eléctricas hacen sencilla la interconexión entre los dispositivos y su conexión con Internet. En las industrias del sector primario existen una serie de retos como la falta de acceso fiable a Internet en las grandes explotaciones o el limitado acceso a la red eléctrica que hacen más complicada la llegada de estos paradigmas. Por culpa de esto, la digitalización de sectores como la pesca y la agricultura es prácticamente nula. En la Figura 2.1 se muestra dicha situación: el valor añadido aportado por el sector gracias a su digitalización es tan solo del 0,4 %. En la Figura 2.2 se muestra además como esta situación no ha cambiado prácticamente nada en la última década. El porcentaje de digitalización en el sector apenas ha cambiado de un 2,4 % a un 3,5 %, mientras se ve como la digitalización en otros sectores ha crecido significativamente.

A pesar de ello, sí existen esfuerzos tanto privados como públicos por traer la digitalización y el cambio tecnológico a estos sectores. Por ejemplo, en América Latina la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura ha creado una agenda para conseguir el cambio en las mipymes en países como Argentina, Brasil o Chile [3]. En ella se defiende la necesidad de la digitalización argumentando que la adopción de las nuevas tecnologías en la industria está asociada a aumentos en el valor agregado y ganancias de productividad a nivel de empresa [4]. Esto impacta directamente sobre los salarios de los trabajadores y disminuye significativamente la brecha de productividad entre las empresas rezagadas y las empresas líderes [5]. La transformación digital, por tanto, es algo indispensable en todos los sectores y para empresas de cualquier tamaño, no solo para mejorar su competitividad y eficiencia, sino también para mejorar las condiciones de sus trabajadores y con ello su calidad de vida.

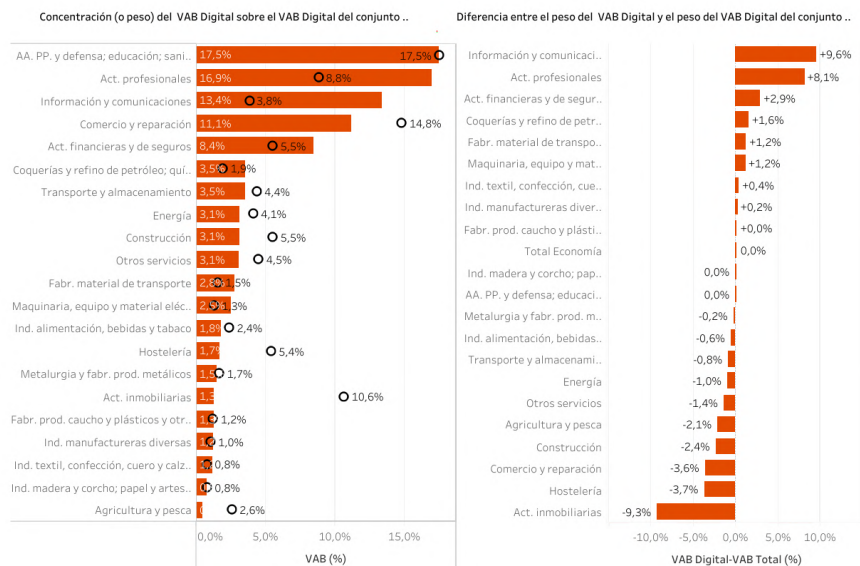


Figura 2.1: En el gráfico de la izquierda muestra el porcentaje de valor añadido de los diferentes sectores (las barras rojas representan el valor añadido por digitalización, los círculos negros el valor añadido general) en 2023 en España. En el de la derecha la diferencia entre el valor añadido digital y el total (fuente: [2]).

## 2.2. Digitalización en entornos marítimos

Entre el 80 % y el 90 % del comercio internacional depende de travesías marítimas [6]. La importancia de estas travesías provocó de forma muy temprana el desarrollo de múltiples tecnologías, regulaciones y estándares para mejorar la navegación, la seguridad y la eficiencia de los grandes barcos de carga. Por ejemplo, las embarcaciones con un desplazamiento (peso) superior a 500 toneladas tienen la obligación de estar equipados con emisores del sistema de identificación automática (AIS) desde el 2004 [7].

Las tecnologías más vanguardistas están siendo implementadas en los grandes buques. En enero de 2022, por ejemplo, el M/V Mikage, del armador japonés Mitsui O.S.K, fue el primer portacontenedores autónomo que se hizo a la mar en el mundo [8]. Este buque no tripulado pudo recorrer casi 300 kilómetros entre el Mar de Japón y el puerto de Sakai. Esto fue posible gracias a la combinación de radares, sensores IoT, cámaras, guía por satélite e inteligencia artificial. Incluso al llegar a puerto fueron unos drones los que llevaron las cuerdas de amarre a los operarios del puerto.

También los puertos están siendo uno de los principales objetos de la digitalización. Acuerdos de colaboración entre empresas privadas y públicas están viendo sus frutos al implementar muchas soluciones basadas en las nuevas tecnologías. El foco está en diferentes tecnologías clave como el análisis de datos, la incorporación de aplicaciones móviles, la ciberseguridad, los servicios Cloud y el IoT [9]. Con respecto a este último, en España hay muchos proyectos en marcha. Por el ejemplo, en el puerto de Valencia se ha implantado una red 5G propia como paso previo a la instalación de dispositivos para la monitorización del buen funcionamiento de las instalaciones [10]. En el puerto de Vigo se ha implementado un sistema de gestión inteligente que utiliza cámaras y sensores

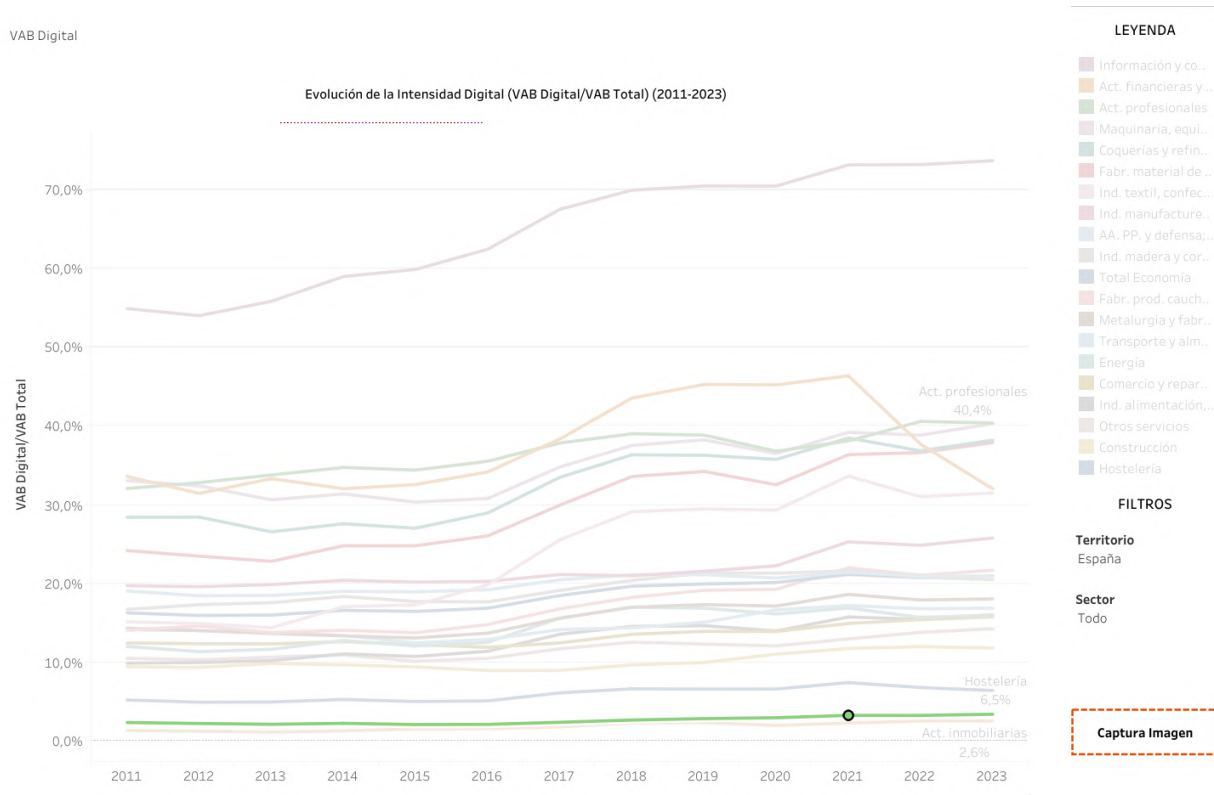


Figura 2.2: Muestra la evolución en la digitalización (valor añadido digital / valor añadido total) de los diferentes sectores desde 2011 hasta 2023. La línea verde destacada es la correspondiente al sector de la agricultura y la pesca (fuente: [2]).

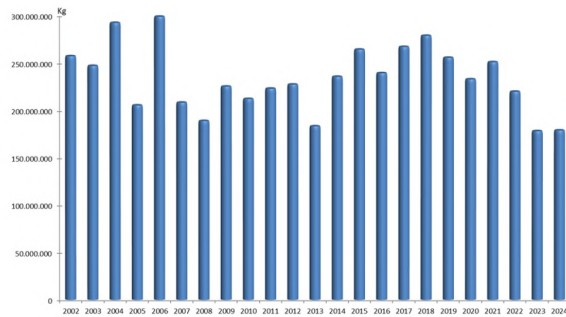
para controlar la llegada de barcos y enviar información al resto de sistemas. Así, estos adaptan automáticamente la iluminación, los espacios, la seguridad y otros recursos [11].

También en el sector de la pesca están apareciendo recientemente soluciones, algunas de ellas relacionadas con IoT. La empresa Satlink, por ejemplo, ha desarrollado una serie de boyas ecosonda que se conectan vía satélite [12]. Lo que hacen es sondear las profundidades en el momento del alba para reconocer, por ejemplo, especímenes de atún. Esto no solo ayuda a la industria pesquera, sino también a la investigación de las diferentes especies de atún y a favorecer su pesca sostenible. Se han desarrollado también muchos sistemas para la identificación de equipo de pesca en alta mar, ya sea con sistemas satélite o con dispositivos RFID de identificación de corto alcance [13]. Muchas de las soluciones son, sin embargo, costosas y excesivamente complejas, haciendo muy complicada su utilización para los pescadores independientes y las pequeñas embarcaciones.

España es un referente a nivel mundial en pesca, capturando las flotas españolas el 28 % del valor total de la pesca entre pescado y marisco en la Unión Europea [14]. Los pescadores y las zonas costeras son los pilares de la pesca y la vida local, conformando la idiosincrasia de muchas poblaciones. El problema reside en que actualmente cerca del 65 % de los trabajadores del sector tiene muy cercana su edad de jubilación, vaticinando que en 20 años se habrá perdido la mitad de las tripulaciones [14]. La elevada edad de los trabajadores del sector provoca un tradicionalismo y conservadurismo extremos, que imposibilita la implementación de nuevas tecnologías. Se necesitará, sin embargo, con la llegada de las nuevas generaciones al sector (en mucha menor cantidad), la implementación de nuevas soluciones basadas en la tecnologías para que el sector pueda sobrevivir, volviéndose más eficiente y dependiendo menos de la mano de obra humana.

La acuicultura es otro sector donde se puede llevar a cabo una transformación significativa. Muchas piscifactorías se comportan, en la práctica, como fábricas, por lo que resulta relativamente sencillo incorporar sistemas IoT como se haría en una fábrica o industria química tradicionales. En [15] se propone el diseño de un sistema de alimentación automático para granjas de gambas utilizando un microcontrolador para liberar comida basándose en un calendario. También se han propuesto otras opciones que liberan comida, por ejemplo, basándose en la temperatura del agua, ya que este factor se ha estudiado que afecta al comportamiento de los peces [16]. En [17] se menciona la necesidad de implementar sistemas automáticos de control de la calidad del agua, ya que esta es crucial para el correcto desarrollo del producto. En [18] se propone un sistema para controlar diferentes parámetros como el oxígeno disuelto, el pH, la temperatura, el amoníaco, nitratos y la salinidad del agua.

Existen también instalaciones de acuicultura que se encuentran directamente en el agua, ya sea en un río, como muchas explotaciones de salmón en Noruega, o en el mar. En estos lugares la disponibilidad de energía eléctrica y cobertura vuelve a ser la mencionada al tratarse de actividades marítimas. En [19] se propone una arquitectura que utiliza el protocolo de comunicación a larga distancia LoRaWAN para conseguir comunicar datos desde una explotación de cultivo a 8,33 kilómetros de la costa, donde se instala una antena. Esta tecnología prueba ser útil por su buen compromiso entre consumo de energía y fiabilidad de las comunicaciones.



(a) Producción anual de mejillón en Galicia.

Provincia Marítima Vilagarcía	110.927.201	62,04%	76.652.245	59,61%	0,69
Ribeira	6.528.713	3,65%	5.923.608	4,61%	0,91
Pobra do Caramiñal	32.559.601	18,21%	21.129.442	16,43%	0,65
Vilagarcía	22.235.542	12,44%	12.895.346	10,03%	0,58
O Grove	22.283.499	12,46%	16.799.861	13,06%	0,75
Cambados	27.319.846	15,28%	19.903.988	15,48%	0,73

(b) Producción de mejillón en kilogramos en 2024 en la provincia marítima de Vilagarcía por distritos.

Figura 2.3: Producción anual de mejillón en Galicia (fuente: [22]).

## 2.3. IoT en Bateas

La industria marisquera en Galicia, tanto en su modalidad flotante (bateas) como la desarrollada sobre los fondos marinos es la tercera más importante del mundo, solo después de China y Dinamarca. Las 3.300 bateas que están distribuidas por el litoral gallego producen anualmente unas 270.000 toneladas anuales de mejillón [1], lo que supone una facturación de 130 millones de euros anuales [20].

La provincia marítima de Vilagarcía es la principal productora de mejillón, con un 62,04 % de la producción en el año 2024, como se aprecia en la Figura 2.3b. O Grove, como parte de esta, representa el 12,46 % del total. Desde el CSIC se alerta sobre una grave tendencia que se está consolidando en el mejillón gallego [21]: en 2024 se registró la peor producción en 20 años, como se aprecia en la Figura 2.3a.

Esta industria, a pesar de su volumen de negocio, está muy poco digitalizada. Las empresas todavía llevan el control de la producción en papel, si es que lo hacen, acuden a las bateas directamente para cualquier gestión y determinan sin indicadores el momento de recogida del producto. La única transformación tecnológica que sí ha llegado al sector de forma profunda se encuentra en las cofradías, donde sistemas informáticos conectados a básculas permiten el registro de datos en la red [23]. Los sistemas de producción, sin embargo, se basan todavía en los métodos tradicionales y no incorporan tecnologías de la información. Los profesionales del sector han puesto su foco recientemente más en los materiales de construcción de las instalaciones, introduciendo las bateas de hormigón [24].

Como consecuencia, sin embargo, de la preocupación por el descenso de la producción de mejillón en Galicia, están surgiendo nuevas iniciativas basadas en la tecnología para su monitorización. El Centro Tecnológico del Mar (Cetmar), por ejemplo, ha sido contratado por la Xunta para desarrollar una solución que apoye la mejora de la información disponible sobre la dinámica del cultivo del mejillón, controlando variables medioambientales y el proceso de engorde [25], intentando crear así una batea 4.0. Para ello, se dotarían con sensores, como de temperatura y salinidad, dos bateas en la Ría de Arousa. Se instalarían también celdas de carga para ver como varía y crece el mejillón.

La empresa MAR Technologies 5.0 propone por su parte el desarrollo de un gemelo digital de las

instalaciones de producción. Esto incluiría la sensorización exhaustiva de las mismas, la posibilidad del control remoto y la simulación de crecimiento offline [26].

A pesar de lo bien que pueda sonar todo esto, sin embargo, la realidad es que más allá de un pequeño grupo de bateas experimentales que pueda existir, el sector sigue y seguirá estando muy poco digitalizado durante los próximos años. Hablando con profesionales y propietarios se aprecia como su interés por la digitalización es muy pequeño, incluso el de aquellos integrantes del sector más jóvenes. Todo esto apunta a que, salvo se tomen las oportunas medidas, el desconocimiento, el coste percibido de las soluciones y la falta y desinterés por la innovación seguirán reinando en el sector por mucho tiempo.

# Capítulo 3

## Diseño del sistema

En este capítulo se describen todas las decisiones de diseño tomadas con respecto a las diferentes partes del proyecto. Se hace referencia a la decisión del lugar de implementación, las tecnologías de comunicación a utilizar, el diseño de la arquitectura de Edge Computing Oportunista, la sensórica a utilizar para estimar la producción de las bateas, el diseño del subsistema de energy harvesting y las consideraciones y decisiones en la construcción del sistema.

### 3.1. Lugar de implementación

Las bateas se organizan por polígonos localizados a lo largo de la costa gallega. Hay polígonos de bateas en todas las rías marcadas en el mapa de la Figura 3.1a. En la Figura 3.1b se muestra un mapa con los polígonos existentes en la Ría de Arousa, la principal productora de mejillón en el territorio. En O Grove hay cuatro polígonos: Grove C1, C2, C3 y C4. Su conjunto se ve en la Figura 3.2. Entre todos ocupan un área de 7,52 km cuadrados, con un perímetro de 12,64 km.

Aunque el objetivo del proyecto es desarrollar un sistema capaz de funcionar en cualquier batea, las condiciones de cobertura en cada polígono o ría no son homogéneas, por lo que es necesario centrarse en algún lugar de actuación para el posterior diseño, implementación y prueba del sistema. El proyecto se centrará en facilitar la instalación en cualquiera de los polígonos de O Grove. El lugar de pruebas, donde se podrán instalar los gateways para recibir los mensajes de los dispositivos se encuentra a 1,17 km de la batea más cercana y a 5,88 km de la más alejada, como se ve en la Figura 3.2.

### 3.2. Tecnología de comunicación y microcontrolador

Existen diferentes alternativas de tecnologías de comunicación que podrían ser utilizadas para este sistema. En general, sería apropiada cualquier tecnología LPWAN, de larga distancia y con bajo consumo de energía, con conectividad a pocos kilómetros de la costa. En este sentido, algunas opciones serían Sigfox, NB-IoT, LTE-M y LoRaWAN. La primera es una tecnología propietaria, que proporciona una gran cobertura pero que requiere del pago de una suscripción anual. Las dos siguientes utilizan la red de datos móviles disponible a poca distancia de la costa para comunicarse,



(a) Mapa de rías con bateas. Los colores no son relevantes en este caso.

(b) Polígonos de bateas en la Ría de Arousa. En azul los polígonos abiertos y en rojo polígonos cerrados a 02/07/2025 a las 09:59.

Figura 3.1: Mapas de polígonos de bateas Galicia (fuente: [27]).



Figura 3.2: En amarillo el área ocupada por los 4 polígonos de O Grove (Grove C1, C2, C3 y C4). En rojo la distancia entre el lugar de trabajo y la batea más próxima y la más alejada del área amarilla.



el mercado, desde gateways de bajo coste pensados para interiores de edificios inteligentes, hasta opciones costosas y complejas, con grandes antenas, pensadas para su uso en exteriores a largas distancias. Esta segunda opción será la que probablemente esté utilizando la UVigo para sus estudios. Muchas empresas comercializan dos versiones del mismo producto, la de interior y la de exterior, incorporando la segunda simplemente un envoltorio estanco sobre la primera, pero teniendo un coste mucho mayor. El modelo UG65 de Milesight [30] tiene un buen compromiso entre coste y prestaciones. Aunque es un dispositivo pensado para interiores puede instalarse en el exterior protegiéndolo y comprando una antena más potente como la GAO1 60 cm [31]. Incluso utilizándolo en interiores, tiene un rango teórico de 15 km con vista despejada y de 2 km en áreas urbanizadas. Además, el lugar de pruebas donde será instalado, indicado en la Figura 3.2, está elevado con respecto al mar 51 metros y tiene una vista bastante despejada hacia la playa, con apenas pocos árboles en el camino. Se instalará en una habitación orientada directamente hacia las bateas, con solo una pared en el medio.

#### 3.2.2. Dispositivo final LoRaWAN

El dispositivo final del sistema debe incorporar una antena LoRa para poder enviar datos al gateway. Existen diferentes alternativas al respecto:

1. Módulos LoRa básicos: existen módulos como el SX1276 [32] o el SX1278 que se pueden conectar a placas de desarrollo como ESP32 o Arduino para conseguir que estos tengan conectividad LoRaWAN.
2. Placas de desarrollo: algunas ya incorporan directamente un módulo LoRa y una antena. El más famoso es probablemente el Heltec WiFi LoRa 32 [33].
3. Sensores LoRa: algunos productos ya son soluciones completas que incorporan los sensores, los chips de desarrollo y la antena LoRa, con todo en una misma carcasa [34].

Las dos primeras opciones resultan más atractivas por resultar mucho más polivalentes. Se pretende diseñar un sistema expansivo, no solo con la capacidad de medir la variable que se planteará en el trabajo, sino también con la posibilidad de incorporar nueva sensorización con pequeños ajustes. Se disponía de una placa de desarrollo Heltec WiFi LoRa 32 V2 [35], por lo que será la utilizada en el proyecto. Esta incorpora un microprocesador ESP32, dual-core de 32 bit con MCU (principal) + ULP (ultra bajo consumo), con las prestaciones básicas de una placa de desarrollo como el ESP32-WROOM-32 [36] (interfaz USB, WiFi, Bluetooth...), un chip LoRa SX1276 con su antena y una pantalla OLED de 0,96 pulgadas. Además, el fabricante Heltec proporciona una librería para trabajar con ESP32 + LoRaWAN [37], lo que facilita el uso del dispositivo.

## 3.3. Arquitectura Edge Computing Oportunista (ECO)

### 3.3.1. Contexto Edge Computing tradicional y oportunista

La tendencia de las últimas décadas ha sido la incorporación del modelo de Cloud Computing a todos los sectores de la sociedad. Bajo este paradigma, la computación y el almacenamiento de datos se centralizan en grandes centros de datos remotos. Así, se proporciona al usuario una potencia

de procesamiento escalable y un acceso ubicuo a sus datos a través de Internet. Esto resulta muy eficiente tanto para proveedores, por obtener la máxima eficiencia de sus activos, como para los clientes, por no depender de la compra y mantenimiento de equipos propios.

El aumento de la cantidad de dispositivos conectados a Internet, especialmente por causa del auge del IoT [38], evidencia una serie de limitaciones y problemas de este paradigma centralizado [39]:

- Latencia elevada: los tiempos de respuesta cuando un mensaje tiene que viajar a un lugar remoto centralizado pueden ser muy elevados, lo que no es adecuado para el procesamiento de datos en tiempo real.
- Dependencia de conectividad: se requiere una conexión constante a Internet, lo que no es viable en entornos aislados.
- Sobrecarga de red: muchos dispositivos enviando datos constantemente provoca un cuello de botella en las redes de comunicaciones.
- Privacidad y seguridad: la centralización de los datos supone que el ataque a un único punto permite acceder a toda la información.

Como respuesta a dichas limitaciones muchos proveedores están creando pequeños centros de datos más cercanos al usuario, de forma que haya más puntos de acceso y más próximos. En IoT surge el paradigma de la computación en el borde (Edge Computing). Este se basa en procesar, analizar, filtrar o agregar la información que se genera en los dispositivos directamente en estos o en puntos de computación cercanos (Cloudlets), para después enviar solo los datos realmente útiles a la nube. De esta forma, se reduce ampliamente la sobrecarga de la red, se gana en seguridad por procesar los datos en puntos controlados por el usuario, y se establece una jerarquía en la arquitectura del sistema que proporciona mucha más autonomía de uso y configuración al profesional que lo diseña.

Este nuevo paradigma, sin embargo, sigue asumiendo que existe cierta infraestructura de red o comunicaciones permanente entre los dispositivos finales y los cloudlets o la nube. Esto, en contextos extremos, como zonas rurales, áreas remotas o entornos marítimos no es válido. El Edge Computing Oportunista (ECO) se plantea como la solución a este problema. No se asume que existe una conexión permanente, de forma que los dispositivos en el edge ponen sus servicios a disposición de los dispositivos finales independientemente de su estado de conexión. Serán estos los que envíen los datos cuando consigan obtener cobertura, lo que proporciona una flexibilidad extrema al sistema.

### **3.3.2. Arquitectura de comunicaciones**

En el mar, la conexión es intermitente a causa de las condiciones extremas del entorno. La humedad, las olas, la niebla y el reflejo del propio agua suponen que los dispositivos finales no tengan acceso a tierra por momentos. Incluso los gateways de LoRaWAN públicos pueden apagarse y encenderse al antojo de los usuarios externos, por lo que la existencia de señal puede también variar. Por todo ello, y por las ventajas del Edge Computing sobre el Cloud Computing, se plantea para este proyecto el diseño de una arquitectura de Edge Computing Oportunista.

En la Figura 3.4 se refleja la arquitectura construida. Los dispositivos instalados en las bateas representan los dispositivos finales (End Devices). Estos constarán principalmente de sensores y placas de desarrollo con capacidad de enviar datos LoRa. Estas placas se despertarán cada cierto tiempo

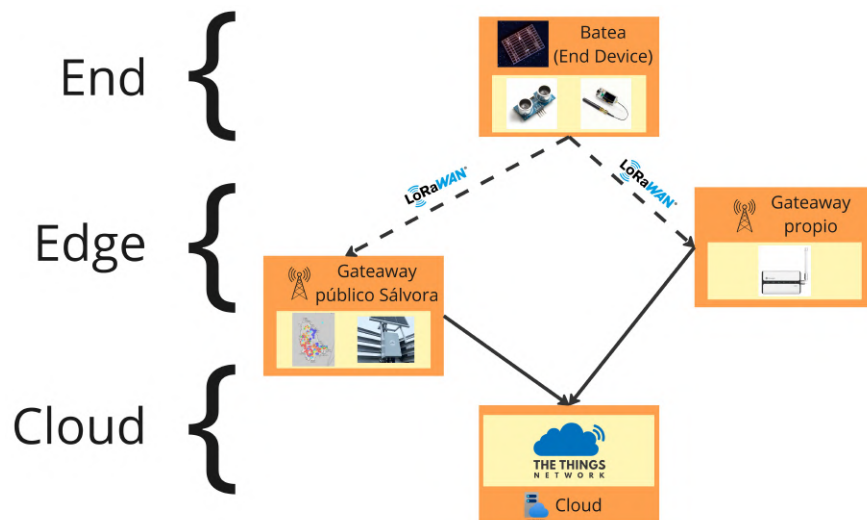


Figura 3.4: Arquitectura de Edge Computing Oportunista diseñada para las comunicaciones.

para tomar datos de los sensores, hacer un pequeño procesamiento de los mismos, si fuese necesario, y enviar la información obtenida a los gateways de LoRaWAN disponibles. Los gateways se encargarán de aceptar la conexión de las placas, recibir sus datos inalámbricamente y enviarlos a través de una conexión de datos móviles, WiFi o Ethernet a la nube en Internet.

En este caso, el gateway instalado en la Isla de Sálvora, con un rango teórico de entre 15 km y 20 km, ya se ha comentado que en principio debería ser suficiente para abastecer de cobertura a todos o la mayor parte de los polígonos de bateas de O Grove. La barrera entre el Edge y el Cloud no siempre está perfectamente delimitada. En este caso, se considera este gateway como un dispositivo a medio camino entre ambos. Sí es cierto que se sitúa en el borde, suficientemente cerca de los dispositivos finales. Sin embargo, al tratarse de un dispositivo público puede ser utilizado por cualquier aplicación, por lo que no se tiene tanto control sobre él como sí se tendría sobre un dispositivo propio en el borde, por lo que las cuestiones de seguridad y privacidad mencionadas, por ejemplo, no se cumplirían como en Edge Computing.

La posibilidad de encontrar zonas desiertas de cobertura o el hecho de depender de una institución externa, que puede decidir mover, apagar o encender el gateway a su antojo, no proporcionan suficiente fiabilidad al sistema. Por ello, se utilizará el gateway adquirido UG65 de Milesight. Este será instalado en el Edge y proporcionará el oportunismo al sistema. En principio será instalado en el lugar de trabajo del proyecto, utilizándolo para las pruebas de laboratorio y pudiendo proporcionar algo de cobertura extra a los polígonos. Sin embargo, su papel no tendría por qué limitarse a esto. Podría utilizarse como un dispositivo móvil, llevado en un coche, en un barco o una mochila, conectándolo a la red de datos móviles a través de su ranura SIM, para proporcionar cobertura oportunista a los dispositivos que estén demasiado lejos del gateway público de Sálvora. Así, proporciona a la arquitectura final una flexibilidad enorme. En otros polígonos de bateas de Galicia, donde un gateway público no fuese accesible, este gateway sería el que conectaría a todos los dispositivos finales con la nube, haciendo así que la arquitectura final resulte útil en cualquier contexto.

Ambos gateways formarán parte de la red global y abierta The Things Network (TTN) [40]. Esta

permite conectar dispositivos IoT de bajo consumo con la nube sin necesidad de una infraestructura costosa. Pone a disposición de los usuarios servicios de visualización de datos y se integra con muchos servicios como MQTT o HTTP Webhooks para reenviar la información de la nube a las aplicaciones propias. Existen alternativas a TTN, como ChirpStack o Helium, pero muchas de ellas son de pago o más complejas. Además, en este caso particular es interesante aprovechar la existencia del gateway de Sálvora público que está en esta red.

### **3.3.3. Arquitectura de procesamiento de datos**

Una vez los datos llegan a la nube de TTN es necesario procesarlos, almacenarlos y analizarlos para ponerlos a disposición del cliente final. Como se mencionaba, la consola de TTN se integra con múltiples servicios externos para este propósito. En concreto, proporciona directamente un broker MQTT que puede ser utilizado para recibir los mensajes que llegan a TTN en otros servicios. MQTT [41] es un protocolo ampliamente utilizado en IoT por su bajo consumo de ancho de banda y eficiencia energética. Además, al integrarse directamente con TTN, se obtiene una fiabilidad y seguridad valorables.

Los datos salientes de MQTT volverán al borde para ser procesados con seguridad y el máximo control posibles. En el lugar de trabajo se instalará una Raspberry Pi 4 (RP4) [42] que ejecutará los servicios de procesamiento de los datos. Este dispositivo cuenta con 4GB de RAM y un procesador quad-core de 64 bits, lo que le permite ejecutar muchos servicios sin comprometer el rendimiento del sistema. Además, es fácilmente empleable, ya que se puede conectar a un monitor o acceder a él a través de SSH como con cualquier otro ordenador, además de que posee un bajo coste.

En la Raspberry Pi 4 se recibirán los datos de MQTT en Node-RED [43], una herramienta de desarrollo visual basada en flujos que permite conectar diferentes fuentes de datos, transformarlos y construir lógicas complejas de manera sencilla. La mayor ventaja de este software es que tiene una comunidad muy activa y cuenta con muchas integraciones con otros servicios. Aunque se podría integrar directamente TTN con una base de datos en la RP4, la decisión de utilizar Node-RED se plantea como una opción más flexible. Una vez recibidos los datos de MQTT la lógica podría expandirse para múltiples usos, como enviar alertas por correo electrónico o mensaje o almacenar los datos en bases de datos diferentes. Además, al contar con este programa intermedio se están desacoplando las lógicas de recepción de datos en la nube y su almacenamiento, lo que permite mayor versatilidad al momento de cambiar, por ejemplo, la base de datos a utilizar en un futuro. La principal ventaja de Node-RED es que permite todo esto de manera muy sencilla y visual, sin necesidad de programar prácticamente código.

En Node-RED se extraerán los datos de interés de los mensajes (datos de sensores, tiempo e identificación de dispositivos) y se enviarán a la base de datos InfluxDB [44] para su almacenamiento. Esta es una base de datos orientada a series temporales, diseñada específicamente para almacenar grandes cantidades de datos con marcas de tiempo. Por ello resulta la alternativa idónea para el proyecto, ya que se pretende controlar variables de monitorización de las bateas a lo largo del tiempo. Este servicio es especialmente eficiente con datos y consultas temporales, y además se integra directamente con el software de visualización Grafana [45], que es uno de los más conocidos y potentes utilizados en la industria. Este accederá a la base de datos en InfluxDB a través del lenguaje de consultas específico InfluxQL para generar visualizaciones temporales de los datos.

La arquitectura final del sistema, la parte de comunicaciones y la de procesamiento de los datos, está reflejada en la Figura 3.5. Los datos recogidos, tanto en la base de datos, como su visualización en Grafana podrán ser puestos a disposición de clientes finales para su procesamiento y monitorización. Con ello, se podrían desarrollar sistemas todo lo complejos que fuese necesario, incluso algoritmos basados en inteligencia artificial, para hacer estimaciones y análisis de la producción bateeira.

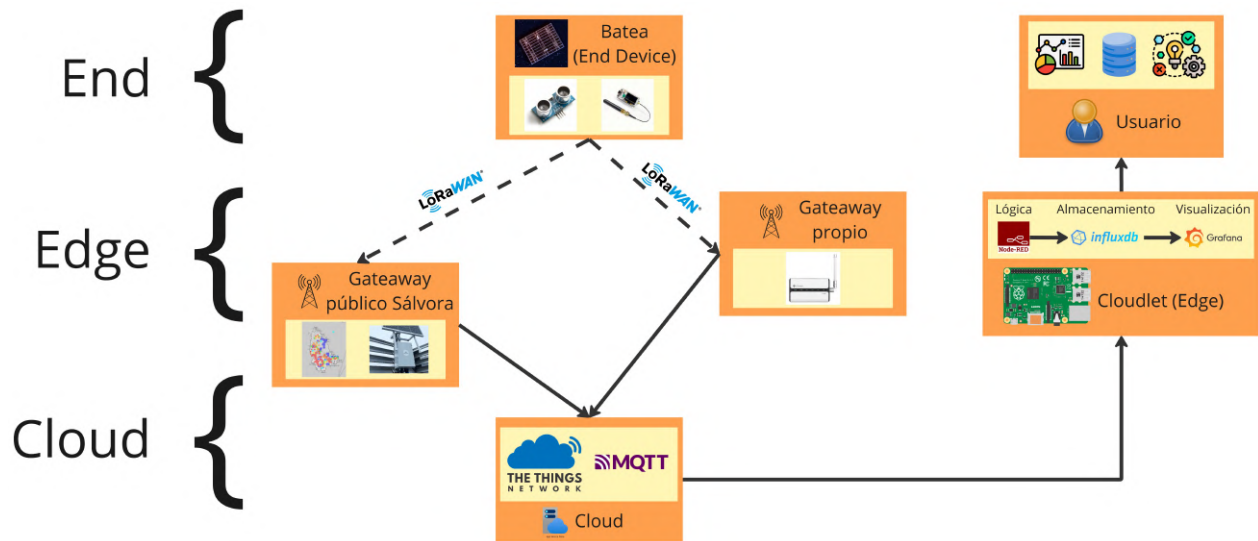


Figura 3.5: Arquitectura de Edge Computing Oportunista final diseñada, teniendo en cuenta las comunicaciones, la ingesta, el almacenamiento y la visualización de datos en el borde.

## 3.4. Sensórica para estimación de producción de bateas

### 3.4.1. Crecimiento del mejillón

A pesar de lo antiguo y tradicional de los métodos de cultivo utilizados en las bateas de mejillón, la realidad es que no muchas personas entienden realmente en profundidad cuál es el proceso seguido. Actualmente, los profesionales del sector se basan en la experiencia obtenida con los años para determinar los mejores momentos de recogida de la cuerda de mejillón, pero no existen métodos más sofisticados para ello.

Existen tres tipos de cuerdas en las bateas. Las primeras, de pesca, se utilizan para la captación del mejillón. Se cuelgan de la batea para recolectar la cría después del desove. Son cuerdas con muchos hilos pequeños. Las segundas, de desdoble, son en las que se establece la cría del mejillón, la mejilla, que pudo haber sido obtenida a partir de las cuerdas de pesca o de las rocas. Las terceras son las cuerdas comerciales, como la mostrada en la Figura 3.6a, en las que se deja el mejillón para su engorde hasta que ha crecido lo suficiente como para ser comercializado. En estas últimas, el mejillón pasa entre 8 y 10 meses hasta que alcanza su tamaño máximo. Según los nutrientes que haya recibido y el tiempo que haya pasado el producto final se categorizará según su tamaño en pequeño, mediano y grande. Las Rías Baixas, y Galicia, siempre se han distinguido de otros lugares de producción de mejillón por la calidad de su agua y por el gran tamaño del producto final. Durante los últimos años, sin embargo, se está extrayendo mucho más mejillón pequeño, porque

dejar engordar el producto durante más tiempo supone un mayor riesgo de pérdida, ya sea por la llegada de toxinas o temporales a las rías, o por la caída del mejillón por un engorde excesivo.

Una batea se divide en sectores en base a la intersección entre travesaños horizontales y verticales. En total, soportan en torno a unas 500 cuerdas de carga. Se establecen sobre el mar, ancladas al fondo marino a través de un ancla y flotando sostenidas sobre grandes flotadores, como los azules que se ven en la Figura 3.6c. El efecto de dichos flotadores se ajusta con el depósito de grandes bloques de piedra u hormigón sobre la infraestructura, para evitar que partes de las cuerdas con mejillón no estén en contacto con el agua.

Una imagen habitual desde las playas gallegas es la de las bateas torsionadas de formas que parecen imposibles, dando la impresión de que están cerca de romperse, como es el caso de la Figura 3.6b. Dicho hundimiento es consecuencia principalmente de la carga de las bateas en esos puntos. La batea mostrada probablemente tenga mucho mejillón engordado en ese punto, mientras que la Figura 3.6c se mantiene a bastante distancia del mar porque sus cuerdas no están muy cargadas de producto.



(a) Cuerda de batea comercial (fuente: [46]).



(b) Batea hundida por el centro casi al nivel del mar.



(c) Batea con poca carga en las cuerdas, aproximadamente a 1 metro de la superficie del mar.

Figura 3.6: Ejemplos de cuerdas y bateas.

### 3.4.2. Estimación del crecimiento

Aunque conocer el peso de cada cuerda independientemente sería lo ideal, la realidad es que sería una solución compleja y muy costosa. Por ello, una solución diferente, de compromiso entre coste, complejidad y utilidad, podría ser conocer el hundimiento de la batea en diferentes sectores o puntos de la batea. Cuantos más puntos se midan más precisa será la estimación.

Lo importante, en este caso, no sería la distancia total entre la batea y el mar, sino la diferencia entre la distancia cuando se cargó la batea, o cuando hubo el último movimiento de piedra y la distancia actual. Esta diferencia significaría la cantidad extra que se ha hundido la batea por causa del crecimiento del mejillón, a partir de lo cual se podría estimar la carga de la misma en kilogramos de producto. A este respecto, es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El tiempo de crecimiento del mejillón: los cambios de distancias entre minutos, horas o incluso días próximos pueden ser nulos o mínimos, y derivados en su mayoría de la variabilidad

en las medidas del sensor por las condiciones climáticas. Las diferencias significativas en el hundimiento de las bateas podrán apreciarse a lo largo de los meses, ya que el producto pasa entre 8 y 10 meses cultivado.

- La presencia de oleaje: un sensor que mida la distancia entre dos puntos fijos no siempre dará el mismo valor en medidas sucesivas, ya que tanto el momento de la ola como el movimiento de la batea por el oleaje provocarán una distancia mayor o menor según el caso.
- Las condiciones climáticas, como el viento o la niebla pueden provocar errores de medición: el viento podría desviar las ondas de medida (de ser el caso) y la niebla podría interponer obstáculos entre el sensor y el agua.
- Las diferencias en hundimiento: a lo largo de los meses la diferencia de pesos entre las cuerdas provocará una diferencia significativa en el rendimiento. Por tanto, la precisión de las medidas no necesita ser muy grande, ya que se apreciará una diferencia igualmente con el tiempo.

Existen múltiples alternativas de sensores para medir distancias en el mercado:

- Sensores acústicos: operan en el rango de ultrasonidos, para que no sea molesto para el oído humano. Emiten ondas de sonidos y miden el tiempo que tardan en reflejarse.
- Sensor óptico: funcionan utilizando un enfoque de tiempo de vuelo. Miden cuánto tiempo tarda un láser u otra fuente de luz en alcanzar un objetivo y reflejarse de vuelta al sensor.
- Sensores electromagnéticos inductivos: a medida que un objeto metálico se acerca, desafina la bobina del sensor, lo cual puede ser utilizado para medir la proximidad.
- Sensores de radar: se envían ondas de radio de alta frecuencia desde el sensor.

Para utilizar en este proyecto los sensores ópticos no son útiles porque el agua no refleja correctamente la luz y los electromagnéticos tampoco, ya que se utilizan en la industria, donde existen atracciones magnéticas. Los sensores de radar suelen ser muy fiables pero demasiado caros. Por tanto, se utilizará un sensor de ultrasonidos. Estos, especialmente las opciones más baratas, no son especialmente precisos y se ven afectados por situaciones de viento o midiendo superficies irregulares, pero como la precisión de las medidas no es una prioridad para el demostrador construido para este TFM serán la mejor solución en este caso.

El modelo HC-SR04 [47], en la Figura 3.7, se utiliza ampliamente en múltiples proyectos, especialmente en robots móviles, por su velocidad de medida y bajo consumo. Su rango de medición es de 2 cm-450 cm, lo cual es más que suficiente para el hundimiento de las bateas, que puede ser como mínimo de 1,5 o 2 metros. Tiene una precisión máxima de 3 mm. Cuenta con dos componentes, el primero, trigger, se encarga de emitir una onda ultrasónica, y el segundo, echo, se encarga de recibir el reflejo de la misma.

Teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas en el uso del sensor, se ha diseñado un sistema y un calendario de medidas. Al momento de despertarse, el ESP32 tomará 10 datos de distancia a intervalos de 1 segundo cada uno. Tras encontrar la media de dichas medidas, se espera haber encontrado la medida real, habiendo evitado así el efecto de medidas atípicas derivadas de las condiciones climáticas o el oleaje. Con esta filosofía, además, se implementa de forma correcta el paradigma del Edge Computing, evitando enviar las 10 medidas y enviando solo la información útil



Figura 3.7: Sensor HC-SR04 (fuente: [47]).

a la nube. A lo largo del día se tomarán 24 medidas, una cada hora. De esta forma, se pretende paliar lo máximo posible el efecto de las mareas en las mediciones, ya que se recogerán datos de todos sus estados. También se pretende evitar medidas atípicas por condiciones climáticas demasiado extremas durante un momento del día. Para ello, se pueden realizar diferentes procesamientos de las medidas diarias para encontrar una media, una mediana, calcular desviaciones atípicas, etc. Los datos recogidos podrán agruparse de formas diferentes (por día, por semana, por mes) para observar el crecimiento del mejillón. En este caso, serían necesarias unas pruebas más exhaustivas de las consideradas en el alcance de este trabajo, ya que tendría que contarse con datos de por lo menos varios meses para encontrar las mejores formas de procesamiento.

### **3.5. Energy Harvesting**

El sistema con la placa de desarrollo de Heltec y el sensor de ultrasonidos serán instalados en una batea dentro de un recipiente aislado, a la intemperie, expuesto a sol directo y sin ninguna instalación eléctrica cerca. Por tanto, se necesitará algún sistema de cosecha de energía (energy harvesting) que alimente al dispositivo. Existen múltiples fuentes de energía disponibles: energía hidráulica de las olas, energía eólica, energía térmica (diferencia de temperaturas), energía piezoeléctrica (vibraciones y movimiento) y energía solar. De entre estas, la que se intuye más útil es la energía solar. La energía térmica y piezoeléctrica no proporcionarían probablemente energía suficiente al sistema, ya que su generación es muy pequeña. El aprovechamiento de la energía hidráulica requeriría de la instalación de microturbinas o sistemas flotantes, lo que supone un diseño e instalación complejas. La energía eólica podría ser una fuente interesante, pero su generación no sería tan periódica como la de la energía solar. Con esta última, por lo tanto, se garantizan, de forma relativamente segura, unas horas de generación mínima de energía diarias, mayores probablemente que en tierra, lo que resulta muy indicado para este sistema.

La energía solar se aprovecha a través de células fotovoltaicas (paneles solares), construidas con silicio en capas n, con electrones libres, y p, con huecos. Parte de la energía solar es absorbida por el silicio, provocando el movimiento de electrones y con ello la generación de corriente eléctrica. La cantidad de generación de energía depende de la incidencia de la luz solar sobre los paneles, lo que significa que en días nublados la generación desciende significativamente (hasta un 99,9 %

[48]). Por la noche, no se produce ninguna generación de energía. Nuestro sistema, sin embargo, deberá seguir alimentado tanto por la noche, como ante cualquier condición climática. Por ello, será necesario el uso en el sistema de baterías, que almacenen la energía no utilizada producida en las placas solares, para alimentar más adelante a los dispositivos cuando no haya generación de energía.

#### 3.5.1. Consumo teórico del sistema

Para poder calcular las necesidades de generación de energía y almacenamiento es necesario conocer el consumo teórico del sistema desarrollado. Esto no exime de llevar a cabo una medición del consumo real, que se realizará en el capítulo de experimentación.

- ESP32: Cuando está activo consume alrededor de 160 mA y en modo de sueño profundo consume entre 10 y 150  $\mu$ A [36].
- Módulo LoRa SX1276: Consume entre 10 y 40 mA durante la transmisión y la recepción (aunque este valor depende de la potencia de la señal) [32].
- Sensor HC-SR04: Consume alrededor de 15 mA cuando se utiliza y 2 mA en reposo [47].

Los consumos teóricos del sistema, podrían ser:

- Tiempo de actividad: Se ejecuta durante 1 minuto cada hora (entre tiempo de conexión y medición). Esto supone un consumo de 160 mA + 40 mA durante 50 segundos y 160 mA + 15 mA durante 10 segundos.
- Tiempo de inactividad: Se ejecuta durante los restantes 59 minutos de la hora. Esto supone un consumo de 150  $\mu$ A + 2 mA durante este tiempo.

Alimentando el sistema con 5 V, como necesita la placa de desarrollo Heltec:

- Activo LoRa:

$$50/3600 * 200mA = 2,77mAh$$

- Activo Sensor:

$$10/3600 * 175mA = 0,49mAh$$

- Inactivo:

$$59/60 * 2,15mA = 2,11mAh$$

En total serían 5,37mAh, lo que supone un consumo diario de  $24 * 5,37 = 128,88mAh/dia$

Con esta información se pueden calcular las necesidades de batería. Suponiendo, por ejemplo, que el sistema debe poder funcionar 5 días sin sol:

$$EBateria = 5 * 128,88 = 644,4mAh.$$

Como además según baja la carga de la batería baja el voltaje, se suele sobredimensionar la batería un 20 %, asumiendo que ese restante no será útil:

$$644,4 * 1,2 = 773,28mAh$$

Se podría utilizar por lo tanto una batería a partir de 800 mAh.

Se puede calcular también las características de los paneles solares a adquirir.

Suponiendo  $2200/365 = 6$  horas de pleno sol al día, según el mapa [49], la corriente necesaria se calcularía como:

$$128,88mAh/6 = 21,48mA$$

El panel debe entregar al menos 21,48 mA a 5 V durante 6 horas para cubrir la demanda diaria.

Asumiendo unas pérdidas de energía del 50 %:

$$21,48mA * 1,5 = 32,33mA$$

Necesitaríamos un panel de 0.5-1 W que provea entre 100 mA y 200 mA a 5 V.

### **3.5.2. Hardware disponible**

Una vez teniendo claras las necesidades básicas del sistema se encontró el siguiente hardware disponible:

- 2 baterías Li-io 18650 de 2400 mAh cada una [50]. Estas proporcionan un voltaje de 3.7 V.
- 2 placas solares de 300 mW y 5 V cada una (AK68X37). Proporcionan una corriente pico de 60 mA [51].

Con este material se cumple con las necesidades de consumo del sistema con creces. Las dos baterías en paralelo tendrían una capacidad total de 4800 mAh, mucho más que los calculados 770 mAh; y las placas solares proporcionarían 120 mA, igualmente mucho más que los calculados 32,33 mA. El sistema podría incluso cargarse mientras está activo durante los momentos de pico de energía solar.

Estos dos elementos no pueden ser conectados directamente entre sí. Las baterías de litio requieren un control de carga muy preciso, ya que cargarlas incorrectamente puede reducir significativamente su vida útil. Para conseguir una carga segura y controlada se suele utilizar el módulo HW-168 [52], basado en el chip TP4056 [53]. Este módulo carga las baterías a 1 A mediante microUSB o pines de entrada y las protege frente a sobrecarga, sobredescarga, cortocircuitos y corriente inversa.

A través de los pines de salida del HW168 se cargan las baterías y se alimenta el ESP32. El voltaje de salida de las batería es de 3.7 V. Al instalarse en paralelo se duplica su capacidad, pero el voltaje se mantiene constante. La placa de desarrollo de Heltec necesita ser alimentada por USB o a través de sus pines de 5 V. Por ello, es necesario utilizar el módulo convertidor de voltaje MT3608 [54], que eleva el voltaje de entrada a entre 2 V y 28 V ajustando un tornillo. Ajustándolo para 5 V ya se puede alimentar el ESP32. Este módulo además aporta una capa de seguridad extra, previniendo grandes fluctuaciones de voltaje en la alimentación de la placa de desarrollo, que podrían dañarla.

El sistema final a construir se muestra en la Figura 3.8.

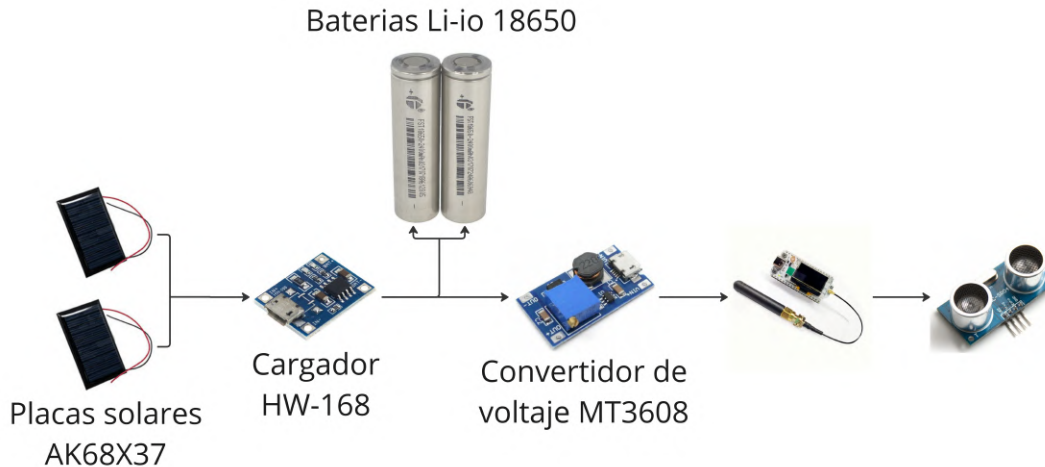


Figura 3.8: Sistema de energy harvesting para recoger energía de placas solares, almacenarla y alimentar la placa de desarrollo y el sensor.

## 3.6. Construcción del sistema

### 3.6.1. Consideraciones de seguridad

Como ya se ha mencionado múltiples veces anteriormente, la instalación de un dispositivo IoT en el entorno marítimo supone tener en cuenta una serie de consideraciones de seguridad extras, debido a las condiciones climáticas del entorno:

- **Dispositivo a la intemperie:** el dispositivo estará expuesto directamente a las condiciones climáticas, la lluvia, la luz solar directa, el viento, la niebla, la humedad, etc. Todo ello puede penetrar en el sistema, dañando los circuitos, o puede elevar la temperatura por encima del rango de funcionamiento.
- **La sal del mar:** Puede corroer y degradar los materiales y dispositivos electrónicos. Hay que tener cuidado no solo con el agua, sino también con su evaporación y la sal que pueda quedar dentro del dispositivo.
- **Agua:** El contacto de los dispositivos a utilizar con el agua provocaría la degradación de su rendimiento en el mejor de los casos y la pérdida completa del sistema en el peor caso.
- **Posibilidad de robo o pérdida:** el sistema está expuesto a la vista, cualquiera podría robarlo, o podría desprenderse por causa del desgaste de los materiales de la bodega y quedar a la deriva o hundirse. Además, su coexistencia con los trabajadores de las bodegas podría provocar que se dañase el sistema o suponer un riesgo para las personas.

Por todos estos factores en el diseño de la construcción se han tomado una serie de decisiones:

- **Encapsulamiento de la electrónica:** Todos los módulos a utilizar mencionados anteriormente deberán ser encapsulados en un recipiente estanco, preferiblemente con protección IP67 (impermeable). Aunque existen opciones más caras en el mercado con mejores propiedades, se realizarán las pruebas con el modelo [55], que es barato y suficiente para su propósito. Todos

los agujeros que se hagan a la caja (antena, sensor de ultrasonidos y cables placas solares) deberán ser lo más pequeños que sea posible e impermeabilizarse y aislarse lo máximo posible utilizando cinta aislante.

- **Aislamiento de placas solares:** Las placas solares estarán expuestas al sol directo. Se las intentará aislar lo máximo posible manteniendo la exposición de las células fotovoltaicas a la luz del sol. Para ello, todo su contorno se pegará a la caja con varias capas de cinta aislante, evitando que el agua pueda depositarse debajo entre ellas y la caja.
- **Protección del sensor:** este será el módulo que quedará más expuesto al agua, ya que apuntará hacia el mar. Por ello, se deben tomar especiales precauciones en su protección. Se harán dos agujeros en la parte inferior de la caja, del tamaño lo más exacto posible de las bocas del sensor, que son de 5 cm de circunferencia. Se cubrirán los sobrantes con abundante cinta aislante. Finalmente, se utilizarán dos tubos de pvc del tamaño de las bocas para instalarlas sobre estas, de forma que el agua solo pueda salpicar de forma perpendicular al sensor para entrar en el sistema. Se deberá experimentar con la longitud de los tubos que permite el correcto funcionamiento del sistema.
- **Monitorización de condiciones climáticas dentro del sistema:** con la exposición a la humedad y la temperatura el sistema podría sufrir daños. Incluso podrían recibirse datos incorrectos por culpa de las condiciones de trabajo. Para comprobar si esto ocurre se instalará dentro del sistema un sensor DHT11 [56] de temperatura y humedad, cuyos datos se enviarán junto a los de distancia para ser monitorizados.

### **3.6.2. Diseño de un contenedor ad-hoc**

Con idea de conseguir el mayor aprovechamiento del espacio y construir el sistema más seguro y útil se ha diseñado un modelo 3D de caja con el software Sketchup [57] para imprimir en una impresora 3D. El diseño exterior se puede ver en la Figura 3.9a y el interior en la Figura 3.9b. Dentro de la caja existen dos repisas para apoyar las baterías y el ESP32, evitando así que queden volando y tensando los cables que tienen conectados. La repisa del ESP32 tiene una ranura para pasar y organizar cables por detrás. Encima tiene un agujero para la salida de la antena y otra pequeña repisa para apoyarla y que no se mueva. Debajo tiene un agujero de acceso al módulo inferior, que sería donde se encontraría el sensor de ultrasonidos. En el exterior se instalarían las placas solares con cierta inclinación para evitar la acumulación de agua sobre su superficie. A través de un pequeño agujero se llevarían los cables al interior de la caja. Los módulos cargador y convertidor de voltaje sí estarían volando. De esta forma se esperaría que todo el sistema quedase bien organizado, siendo lo más sencillo posible su mantenimiento. Se incorporan además dos asas, una a cada lado de la figura para su anclaje en la batea.

Como se ha intentado construir un sistema lo más expansible y flexible posible, la parte del sensor se plantea como una pieza separada del cuerpo general, como se ve en la Figura 3.9c. Esto se hace así para facilitar el intercambio de sensores. Si en otro momento se decide utilizar el dispositivo para medir otras variables ambientales, sería tan fácil como retirar el módulo e incorporar uno nuevo, ya sea sobre el mismo agujero o sobre otro diferente que se hiciese en ese momento.

Lamentablemente, dicho sistema no pudo ser impreso para su prueba en un contexto real. El tiempo

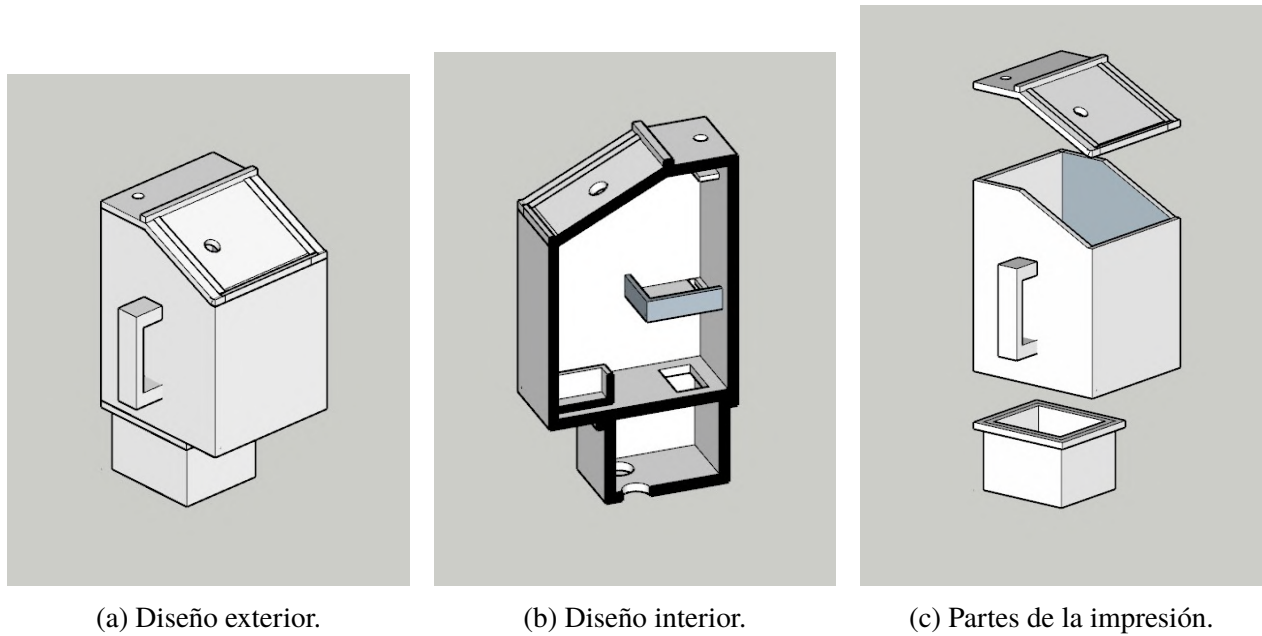


Figura 3.9: Diseño 3D del contenedor.

apremiaba y la inexperiencia al utilizar el programa para impresión hizo que el archivo desarrollado tuviese muchos errores imperceptibles en la visualización pero que afectan a la impresión. Para solventar estos problemas se decidió utilizar una caja estanca, que suelen ser empleadas en instalaciones eléctricas.

# Capítulo 4

## Implementación

Se describe a continuación el proceso de implementación del diseño propuesto en el capítulo anterior. Dicha descripción incluye la configuración de la placa de desarrollo y el gateway para las comunicaciones, el uso de todas las tecnologías de procesamiento de datos que conforman la arquitectura ECO y la construcción e instalación del sistema.

### 4.1. Configuración placa de desarrollo y gateway

#### 4.1.1. Configuración placa de desarrollo

Heltec proporciona una librería al usuario para utilizar LoRa de forma sencilla [37]. Sin embargo, esta solo puede ser utilizada por dispositivos de la marca con licencia. Esta licencia puede obtenerse y debe activarse tras la compra del dispositivo accediendo a la página [58] y siguiendo las instrucciones. Primero debe ejecutarse un código en la placa de desarrollo que escribe por pantalla el ID del chip. Este ID a continuación debe ser introducido en la página de búsqueda de licencias. De estar el dispositivo activado, debería aparecer una licencia de 32 bits. En este caso, fue necesario contactar con el equipo de soporte de Heltec por correo electrónico para que activasen el dispositivo. Antiguamente esta licencia se podía utilizar en una variable directamente en el código. Sin embargo, actualmente para su uso se prefiere la escritura de la licencia en la memoria FLASH del dispositivo. Esto se hizo a través de los comandos AT, que es una forma de enviar información a un ESP32 a través del puerto serie cuando está conectado al ordenador. Simplemente utilizando el comando `AT+CDKEY=licencia` y enviándolo a través de Arduino IDE se puede escribir la licencia en la placa. A partir de ese momento ya se podrá utilizar la librería.

#### 4.1.2. Configuración gateway LoRaWAN

El gateway UG65 está diseñado para ser lo más sencillo en su uso posible, pero aún así, es necesario seguir una serie de pasos para llevar a cabo su configuración [59]. Al abrir la caja lo primero que se hizo fue instalar los cables de red y alimentación desatornillando y volviendo a atornillar la tapa que cubre sus entradas, como se ve en la Figura 4.1a. También se instaló la antena externa. A continuación ya se pudo conectar el router a la corriente. En el primer acceso es necesario utilizar

#### 4.1. Configuración placa de desarrollo y gateway

una interfaz web para llevar a cabo la configuración. Al conectar el dispositivo a la corriente se activa un nuevo punto de acceso WiFi con el nombre Gateway\_\*\*\*\*\*. Al conectarse a este punto de acceso y acceder en el navegador a la dirección 192.168.1.1 se visualiza la interfaz web. El usuario en el primer uso es admin y la contraseña password. Tras iniciar sesión se configurará el sistema determinando si la antena es interna o externa (externa en este caso). A continuación, ya se podrá acceder a la información y el panel principal de configuración.

El dispositivo iba a ser utilizado en principio en el lugar de trabajo, donde se dispone de conexiones Ethernet, por lo que al conectarlo utilizándolas el sistema pudo funcionar directamente, como se ve en la Figura 4.1b. Contando con la posibilidad de utilizarlo en otro lugar, se configuró además la conexión del gateway con el punto de acceso de los datos móviles de un Iphone 13 Pro, con capacidad de datos ilimitados. Esto podría ser útil en caso de querer acercar todavía más el gateway al borde, en lugares donde no se dispusiese de conexión WiFi pero sí de instalación eléctrica, como en un chiringuito de playa, por ejemplo. Para ello se accedió al panel Network ->Interface ->WLAN y se seleccionó el Cliente como Work Mode. Aparece entonces un botón Scan que permite escanear las redes WiFi disponibles. Al aparecer el punto de acceso de los datos móviles simplemente se rellena su contraseña y se pulsa el botón de guardar. El gateway se reiniciará y conectará al punto de acceso WiFi.



(a) Instalación de cables de red y alimentación en el gateway.



(b) Primera conexión del gateway.

Figura 4.1: Configuración física gateway UG65.

#### 4.1.3. Configuración TTN

Para utilizar The Things Network el primer paso es crear una cuenta en su plataforma [60] tras seleccionar la región de uso (Europa, Norteamérica o Australia). A continuación se puede seguir el siguiente tutorial [61] para crear una aplicación y añadir un dispositivo final. En el panel Applications se utiliza el botón Add application y se establece un ID. A continuación se selecciona la opción “register end device in an application”, se selecciona la aplicación a utilizar y se utiliza la opción “Select the end device in the LoRaWAN Device Respository”. Se busca la marca HelTec Automation y el modelo “WiFi LoRa 32 (V2)(Class A OTAA)”. Las opciones por defecto y el Profile se

utiliza EU\_863\_870. El plan de frecuencia a utilizar será el recomendado “Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2 - recommended)”. El JoinEUI se deja como todo 0s, al no tener un servidor de gestión del dispositivo específico. Ahora el sistema permite generar las claves a utilizar de identificación del dispositivo y la aplicación: DevEUI y AppKey, se establece un id para el dispositivo y se registra. Haciendo figurar estas claves en el código ejecutado en el ESP32 ya se podría realizar el envío de datos a la red LoRaWAN.

A continuación, para añadir el gateway UG65 a la red TTN se sigue el tutorial [62]. Primeramente se accede a la interfaz web del gateway. En la pestaña Packet Forwarder aparece el identificador GatewayEUI. En esta misma pestaña aparece el servidor localhost activado por defecto. Clicando en el botón de edición se cambia la opción activada por desactivada. A continuación se añade un nuevo servidor con las opciones Type en Semtech, la Server Address a eu1.cloud.thethings.network y las Port Up y Port Down a 1700, que son los valores por defecto de The Things Stack. Tras pulsar el botón de guardado y pasados pocos segundos el gateway aparecerá en la lista de gateways en la consola de TTN. Con ello, ya podría recibir mensajes de los dispositivos y mostrarlos en la consola en la nube.

#### **4.1.4. Código de envío de datos**

El código desarrollado está en el repositorio indicado en el Anexo B.

El código utilizado en este proyecto se basa directamente en un ejemplo [63] de la librería Heltec ESP32 Dev-Boards, que incluye herramientas para el uso de LoRa en los ESP32 de la marca. Se ha utilizado el editor de código Arduino IDE, en el que se puede instalar la librería accediendo en el panel izquierdo al buscador de librerías y escribiendo el nombre de la librería en la barra de búsqueda.

El código base se fundamenta sobre un diagrama de flujo claro de estados del dispositivo. Esto se implementa a través de una estructura switch-case en la función loop del código. Al inicio, el dispositivo se ejecuta en el estado INIT, donde inicializa LoRaWAN. A continuación pasa al estado JOIN, en que intenta conectarse a la red LoRaWAN indicada. Una vez se une pasa al estado SEND, donde recoge los datos de los sensores y los envía. Finalmente pasa al estado CYCLE y SLEEP, donde entra en modo deep sleep y apaga el módulo LoRa del dispositivo.

Para que el dispositivo sepa a que red y aplicación conectarse en TTN se proporcionan los valores de devEUI, appEUI y appKey como variables.

Los tres datos enviados (distancia, temperatura y humedad) se incorporan a la variable appData definida como un array de uint8\_t en la librería de LoRa. El primer elemento del array será el MSB de distancia y el segundo el LSB. El tercer elemento será la temperatura como un solo byte, y el cuarto la humedad igualmente como un solo byte. Como ya se ha mencionado, la precisión no es importante, por lo que se puede prescindir de los decimales de los valores.

Sobre el código básico se incorpora la lectura de los sensores HC-SR04 y DHT11 utilizando las librerías NewPing.h [64] y DHT.h [65]. Su uso es bastante similar en ambos casos. Se empieza determinando los pines a utilizar (17 trigger y 23 echo para HC-SR04 y 32 para DHT11). Se crea en el primer caso un objeto NewPing indicando los pines a utilizar y un objeto DHT en el segundo caso indicando igualmente el pin y el tipo de sensor (DHT11). Para utilizar el NewPing simplemente se

utiliza la función la función `ping_cm`, que devuelve la distancia como una variable `unsigned long`. Para utilizar el DHT11 primero se debe inicializar con la función `begin` en el `setup` y después ya se pueden leer datos con las funciones `readTemperature` y `readHumidity`, que devuelven `floats`.

En la parte del código en que se leen medidas, se lee primero el valor de distancia. Para ello, se toman 10 medidas a intervalos de 1 segundo para luego calcular la media en un bucle `While`. En caso de que la medida devuelta no sea válida, lo que puede ocurrir por las condiciones climáticas al no recibir el reflejo de una onda, se vuelve a tomar la medida. Así, hasta tener 10 medidas válidas. A continuación se lee el sensor de temperatura y humedad, se preparan y envían los datos.

Con el propósito de verificar el funcionamiento del sistema, tanto en el laboratorio de pruebas como en el entorno real del mar, se ha hecho uso de la pantalla OLED incorporada con la placa de desarrollo de Heltec. Esta muestra información sobre la ejecución del código sin necesidad del ordenador y el monitor serial, lo que resulta muy útil en las pruebas de campo. Para utilizar la pantalla se ha instalado la librería `HT_SSD1306Wire.h` [66]. Para utilizarla se crea un objeto `SSD1306Wire` indicando los pines en que está conectada la pantalla con el ESP32 y otra información por defecto. Este se inicializa con las funciones `init`, `clear` y `display` en el `setup`. Durante la ejecución del código se puede mostrar un mensaje en la pantalla utilizando la función `drawString`, indicando las posiciones de los mensajes en cada caso, y la función `display`.

## 4.2. Implementación de la arquitectura ECO

Teniendo la placa de desarrollo y gateways instalados y configurados, ya se puede implementar la arquitectura de Edge Computing Oportunista. Para ello, deberán instalarse, configurarse e interconectarse los diferentes servicios mencionados en el capítulo de diseño.

### 4.2.1. The Things Network

Los mensajes que llegan a la consola de TTN son simplemente el vector de `uint8_t` que se ha enviado en el código del ESP32. Para poder interpretar y procesar estos datos en las próximas etapas es necesario configurar un `Payload Formatter` en la consola. Para ello, se accede al menú de la aplicación y en el panel lateral izquierdo a la opción `Payload formatter` en los mensajes `Uplink`. En esta ventana se ha escrito un código de JavaScript que toma el vector `input.bytes` y recupera sus dos primeros elementos en una variable `distancia`, su tercer elemento en una variable `temperatura` y su último elemento en una variable `humedad`. A continuación, devuelve dichos datos como un objeto `JSON data` que contiene los campos `distancia_cm`, `temperatura_c` y `humedad_pct`. A partir de ese momento, los datos recibidos en la pestaña `Live Data` ya tenían un formato legible, como se ve en la Figura 4.2.

### 4.2.2. Instalación y configuración Raspberry Pi 4

La Raspberry Pi 4, que llevará a cabo el procesamiento de datos en el borde, trae una tarjeta `microSD` donde es necesario instalar su sistema operativo `Raspberry Pi OS`. Para ello se puede seguir el siguiente tutorial [67]. Se instala el programa `Raspberry Pi Imager` desde [68]. Al ejecutarlo aparece una ventana en la que se puede seleccionar el OS a instalar (`Raspberry Pi OS (32-bit)`) y en las



Figura 4.2: Mensajes capturados en la consola de TTN. El último mensaje es el que contiene los datos formateados.

opciones avanzadas se puede determinar una contraseña y usuario que después permitirán acceder por SSH al dispositivo. A continuación se conecta la tarjeta microSD de la Raspberry al ordenador. En esta se grabará el sistema operativo al ser detectada por el Raspberry Pi Imager. Una vez termina la ejecución del programa ya se puede expulsar la tarjeta y conectarla de nuevo a la Raspberry. Al conectar esta a la corriente iniciará el sistema operativo. Una vez iniciado se puede utilizar un cable microHDMI para visualizar el sistema operativo de ventanas en una pantalla y así poder configurar la red WiFi y demás servicios.

### 4.2.3. MQTT y Node-RED

Los mensajes del broker MQTT integrado directamente en TTN serán recibidos en Node-RED. Para ello, se precisa instalar este último. Esto se puede hacer desde [43]. Una vez instalado, se puede acceder al software a través del puerto 1880 del navegador en la IP de la Raspberry Pi 4. Así, encontrando la IP del dispositivo en la red WiFi, también se puede acceder desde otro ordenador. Al crear un nuevo flujo aparece una cuadrícula en blanco en la que se pueden añadir nodos. El flujo final que se ha construido es el que aparece en la Figura 4.3. El nodo más a la izquierda es de tipo MQTT In, el que recibe los datos del Broker MQTT de TTN. Se ha configurado para acceder al servidor eu1.cloud.thethings.network en el puerto 1883, el por defecto de MQTT, y para suscribirse al tema v3/prueba-bateas@ttn/devices/batea-device/up. Es decir, a los mensajes uplink enviados por el dispositivo batea-device a la aplicación prueba-bateas. Estos mensajes llegarán en formato JSON.

Este nodo MQTT In se conecta con tres nodos de funciones. Cada uno de ellos será el encargado de recoger uno de los datos de interés: distancia, temperatura o humedad. Constan de simples códigos que acceden al `payload.uplink_message.decoded_payload` para extraer el campo que les interesa, además de a los campos `received_at` y `device_id` para identificar el tiempo de recepción y el dispositivo emisor respectivamente. Estos campos se encapsulan en un mensaje constando de dos campos: el primero con los valores del sensor y el timestamp, y el segundo con el id del dispositivo. Este es el formato de mensajes que esperan los nodos influxdb in, instalados como parte de la librería `node-red-contrib-influxdb`. Además, se utilizan 3 nodos de debug para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

La decisión de dividir la extracción de los datos en tres campos responde al desacople del procesamiento de las medidas. Se ha planteado el sistema para que sea lo más expansible y flexible posible, porque los datos que hoy pueden formar parte del sistema dentro de un tiempo podrían dejar de hacerlo. Así, parece más correcto tratar cada dato por separado, y también inyectarlo a la base de datos de forma separado, como se verá a continuación.

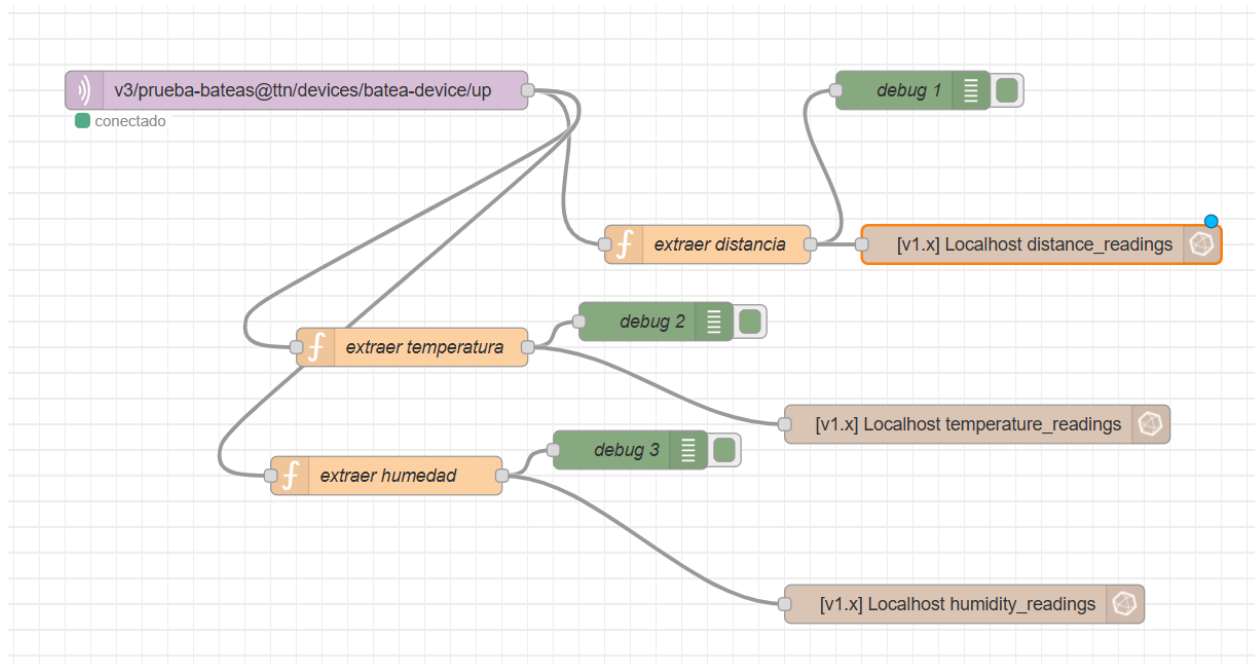


Figura 4.3: Flujo de Node-RED.

### 4.2.4. InfluxDB y Grafana

Para utilizar estos dos servicios es necesario primero instalarlos. InfluxDB 1.x puede instalarse directamente desde terminal con el comando `sudo apt install influxdb`. Para instalar grafana se deberá acceder a [45]. En influxDB el primer paso a llevar a cabo es crear una base de datos ejecutando en una terminal `influx` y a continuación `CREATE DATABASE ttn_data`;

A continuación, ya se puede configurar el nodo Influxdb in de Node-RED para que se envíen los datos a la base de datos. En los nodos se configura un servidor localhost con ip 127.0.0.1 y puerto 8086. El nombre de la base de datos será el indicado anteriormente: `ttn_data`. En cada nodo se tomará como medición `distance_readings`, `temperature_readings` o `humidity_readings` según corresponda.

No es necesaria ninguna configuración extra en InfluxDB. Los datos que lleguen a TTN empezarán a almacenarse en la base de datos. Se puede consultar la existencia de los datos a través de terminal, como se ve en la Figura 4.4.

Grafana será accesible en el navegador en el puerto 3000. Para conectar este servicio con influxDB se accede a `connections` y `add new connection`. Se busca el data source InfluxDB y se añade una fuente nueva. Esta se configura indicando el localhost, el puerto 8086 y el nombre de la base de datos `ttn_data`.

Una vez se ha configurado la fuente de datos se crea un nuevo dashboard. Se han decidido añadir dos parejas de visualizaciones por cada variable a medir. El cuadro de mando desarrollado final se puede ver en la Figura 4.5. La primera visualización es de tipo Stat y muestra el valor más reciente de la variable. Para consultar los datos se utiliza la función `last("distance_cm")`, que obtiene el último valor en la serie temporal. La segunda visualización es de tipo Time series, mostrando el gráfico histórico de valores consultando todos los valores de la base de datos.

```

1750966777403000000
> select * from distance_readings limit 5;
name: distance_readings
time          device          distance_cm timestamp
----          -
1750965755942871967 batea-device 22          1750965755710000000
1750965785174014746 batea-device 22          1750965784950000000
1750966748426869526 batea-device 23          1750966748200000000
1750966777620924094 batea-device 23          1750966777403000000
1750966806819686241 batea-device 23          1750966806598000000
    
```

Figura 4.4: Consulta los 5 primeros datos de lecturas de distancia en la base de datos.



Figura 4.5: Cuadro de mando con visualizaciones actuales y temporales de distancia, temperatura y humedad. Se puede acceder a una snapshot interactiva del dashboard en [DASHBOARD](#).

## 4.3. Construcción e instalación del sistema

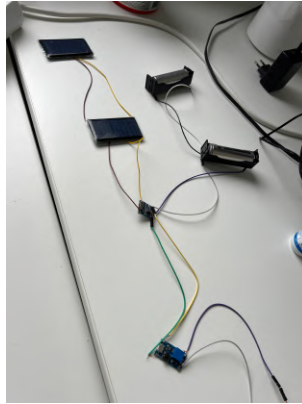
### 4.3.1. Proceso de construcción

El sistema inicial, que se ve en la Figura 4.6a, constaba únicamente del ESP32 alimentado a través de microUSB por el ordenador y el sensor HC-SR04 conectado a este. Este sistema sirvió para llevar a cabo las primeras pruebas de funcionamiento del sensor en tierra y agua y las pruebas de cobertura en tierra.

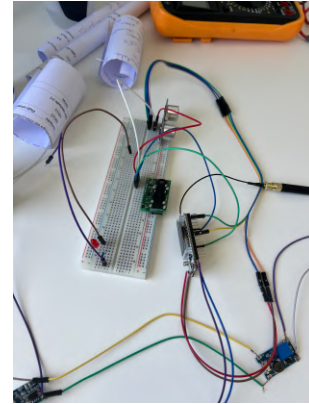
A continuación se construyó el sistema de energy harvesting y almacenamiento de energía, como se ve en la Figura 4.6b. Se compraron dos celdas para baterías, que se soldaron en paralelo. Esto hacía que el intercambio de baterías fuese mucho más sencillo que si se soldaban directamente. El circuito final se construyó en la Figura 4.6c, utilizando además una protoboard para fijar lo máximo posible la posición del sensor y los cables. El principal problema encontrado en estas etapas eran las conexiones de los cables. Se había hecho una soldadura de los pines del ESP32, pero esta no estaba



(a) Montaje inicial de placa de desarrollo y sensor de ultrasonidos.



(b) Montaje inicial del sistema de energy harvesting.



(c) Uso de protoboards para fijación del sensor.

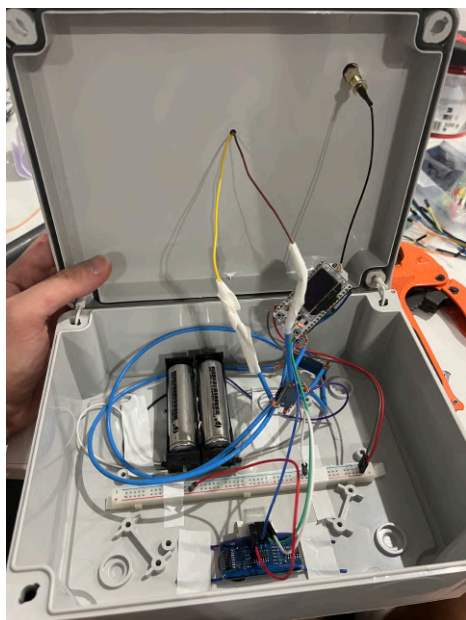
Figura 4.6: Proceso de construcción del sistema.

bien ejecutada y había mucha variabilidad en el contacto. Los cables del sistema de harvesting no habían sido soldados, por lo que ocurría lo mismo. Solo las placas solares pudieron ser soldadas. Ante la imposibilidad de disponer de un kit de soldadura se decidió retirar los pines de alimentación del ESP32, para conectar cables directamente en las perforaciones del mismo, y utilizar un cable de cobre (el azul de la Figura 4.7a) con muchos más hilos. Así, el sistema que no cargaba ni era capaz de leer información del sensor por momentos, comenzó a funcionar de manera correcta.

El sistema construido anteriormente se volvió a montar dentro de la caja estanca de la forma que se ve en la Figura 4.7a. Para ello, se hicieron los agujeros utilizando destornilladores eléctricos, cutters y lijas. Intentando hacer que el montaje fuese lo más versátil y flexible posible se instalaron los canales positivo y negativo de una protoboard en el medio de la caja; para así poder alimentar todos los sensores a utilizar en el presente y a futuro. Se cortaron también parte de las protoboards para sujetar los sensores de la forma más estática posible. En esta imagen no se ve el sensor de temperatura, ya que se instaló más adelante, pero este utilizaba además una resistencia conectada entre el pin de datos y vcc, como se hace habitualmente para obtener datos correctos. En la Figura 4.7b se puede ver la caja desde fuera. Las placas solares se cubrieron con cinta aislante blanca (para evitar lo máximo posible la abrasión del sol por el color) manteniendo las partes de captura de energía expuestas. También la antena de LoRa fue recubierta de cinta aislante en su parte inferior, evitando la inserción de agua dentro del sistema. Finalmente, se fijaron dos tubos de PVC de 30 cm cada uno a las bocas del sensor de ultrasonidos y se recubrió toda la zona con cinta aislante. Al final de los dos tubos se utilizó un trozo de poliestireno para que se mantuviese una distancia de alrededor de 1 cm en los tubos, la distancia original existente entre las bocas.

#### 4.3.2. Instalación en batea

Una vez construido el sistema y realizadas todas las pruebas y experimentaciones previas en tierra y mar era momento de instalar el dispositivo en una batea. Este fue instalado en la batea María Joaquina I del polígono Grove C1, la más cercana a la costa, a 1,17 km de la zona de trabajo, como se ve en la Figura 3.2. Se solicitó permiso al dueño para poder llevar estos trabajos a cabo. El acceso



(a) Interior sistema final.



(b) Exterior sistema final.

Figura 4.7: Sistema final.

a esta se hizo a través del mar en un kayak, tardando unos 15 minutos en llegar desde la playa más cercana.

Se fijó el dispositivo a uno de los travesaños de la batea utilizando dos uniones de dos bridas a cada lado, como se ve en la Figura 4.8a. Por debajo del sistema, pegados al travesaño, quedaban los dos tubos de PVC que protegían el sensor de ultrasonidos, como se ve en la Figura 4.8b. Hubo que cortar in situ la longitud de los tubos a la mitad (sobre 15 cm), porque aunque su funcionamiento en el laboratorio de pruebas había sido correcto, con el mar no conseguía medir bien las distancias. El dispositivo quedó expuesto a luz solar directa y se mantuvo de un tamaño reducido, como se aprecia en la Figura 4.8c.

Pasada una hora desde la instalación, se empezaron a recibir datos en TTN, pudiendo visualizarse en Grafana. El sistema, por tanto, había sido instalado con éxito y estaba funcionando correctamente.



(a) Sistema final en batea de cerca.



(b) Sistema final en batea desde abajo.



(c) Sistema final en batea de lejos.

Figura 4.8: Sistema final instalado en la batea.

# Capítulo 5

## Pruebas y discusión de resultados

Una vez se ha construido el sistema final, se describen a continuación la serie de pruebas llevadas a cabo para demostrar su funcionamiento y utilidad en la práctica. Esto incluye pruebas del funcionamiento y adecuación del sensor, pruebas de consumo del sistema, pruebas de cobertura de las comunicaciones, pruebas de monitorización de condiciones ambientales de funcionamiento y pruebas de uso del sistema en condiciones reales.

### 5.1. Pruebas del sensor en tierra y agua

Antes de continuar con el desarrollo del proyecto se llevaron a cabo varias pruebas para determinar si el uso del sensor de ultrasonidos sería adecuado para su propósito. Primeramente se llevaron a cabo pruebas de precisión sobre superficies sólidas en tierra. Así, se vio que la precisión en un rango entre 2 y 200 cm (lo máximo de distancia esperable en una batea) era bastante buena, cumpliendo con los 3 mm de margen que se especifican en la hoja de especificaciones.

La siguiente prueba realizada pretendía comprobar el comportamiento del sensor en agua, tanto agua estanca como ante oleaje. Para ello, se utilizó una piscina pequeña de 29 cm de alto total en la que el agua estaba a 16 cm. Esta se puede ver en la Figura 5.1. En agua estancada la medición era extremadamente precisa, dando 13 cm de diferencia. Al simular oleaje en el sistema, sin embargo, la precisión disminuyó. La mayor parte de los datos eran correctos, pero por momentos aparecían datos atípicos de 40 cm. Esto se debe, probablemente, al desvío exagerado de las ondas de sonido al reflejarse en el agua con diferentes inclinaciones. A causa de dichas pruebas se determinó tomar 10 medidas a intervalos de 1 segundo para después agregarlas. Con ello, se decidió que probablemente agregar los datos por días eliminando datos atípicos fuese una buena política para el sistema final.

### 5.2. Pruebas de consumo

Aunque se hizo una aproximación teórica del consumo del sistema, es importante medirlo en el uso real del sistema, ya que puede haber muchos factores variables que afecten al consumo, como la temperatura de operación o ineficiencias derivadas de la mala optimización del código, por ejemplo. Para ello se utilizó el Power Profiler Kit II de Nordic [69], un dispositivo que se conecta



Figura 5.1: Pruebas del sensor HC-SR04 sobre agua.

al ESP32, como se ve en la Figura 5.2, para alimentarlo y recibir datos sobre su gasto energético. Esta información puede visualizarse en la aplicación Power Profiler del programa nRF Connect for Desktop [70].

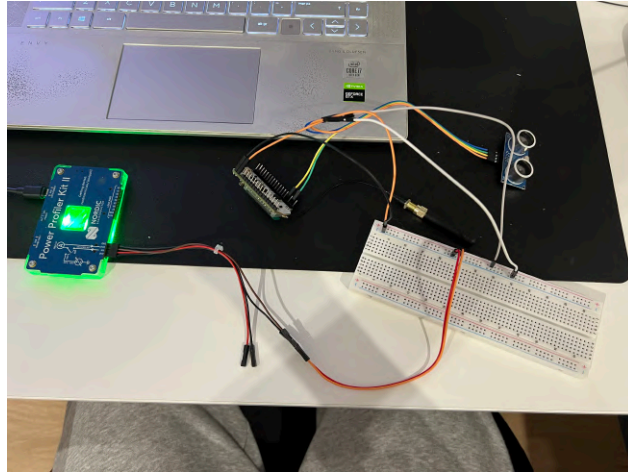


Figura 5.2: Nordic Power Profiler Kit II conectado a ESP32 para realizar la prueba de consumos.

El gráfico resultante de las pruebas se puede ver en la Figura 5.3. Durante los periodos de inactividad, en modo de sueño profundo, el sistema consume de media 4,5 mA. Durante el tiempo de actividad los consumos son:

- Wakeup: Se consumen 64 mA de media durante casi 1 segundo (943 ms) con un pico máximo de 128,5 mA.
- Unión a la red LoRaWAN: la placa tarda 5.21 segundos en unirse a la red, consumiendo de media 61,06 mA, con picos máximos de 87,49 mA.
- Toma de medidas: se tardan 10 segundos en tomar todas las medidas, con un consumo promedio de 49,72 mA y picos máximos de 81,53 mA.
- Envío de datos: Tras la última medición, se tardan 2,85 segundos en preparar y enviar los datos. Durante este tiempo el consumo medio es de 50,77 mA, existiendo un pico máximo durante el envío del dato en 133,23 mA.

El consumo final del sistema, teniendo en cuenta los datos anteriores, sería por tanto de:

- Activo wakeup:

$$1/3600 * 64mA = 0,017mAh$$

- Activo unión:

$$5/3600 * 61,06mA = 0,085mAh$$

- Activo sensor:

$$10/3600 * 49,72mA = 0,138mAh$$

- Activo transmisión:

$$3/3600 * 50,77mA = 0,04mAh$$

### 5.3. Pruebas de cobertura

- Inactivo:

$$3581/3600 * 4,5mA = 4,476mAh$$

En total serían  $4,756mAh$ , lo que supone un consumo diario de  $24 * 4,756 = 114,144mAh/día$ . Este consumo final es menor al de la estimación, que era de  $128,88mAh/día$ .

Sin embargo, hay que tener en cuenta que en la estimación se daban 50 segundos al tiempo de conexión de LoRaWAN. Por lo que se ha visto en la práctica, en las pruebas de cobertura, los tiempos de unión y transmisión pueden ser incluso bastante más grandes que 50 segundos, por la gran cantidad de paquetes que se pierden a largas distancias en el mar. Esto provocaría un consumo mucho más elevado del sistema. Suponiendo, por ejemplo, que tarda 2 minutos en unirse el consumo diario llegaría hasta los  $157,7mAh/día$ . Con el material que se está utilizando finalmente en el proyecto, las placas solares y las baterías, se seguiría teniendo capacidad más que de sobra para mantener el funcionamiento del sistema durante días, incluso sin luz solar.

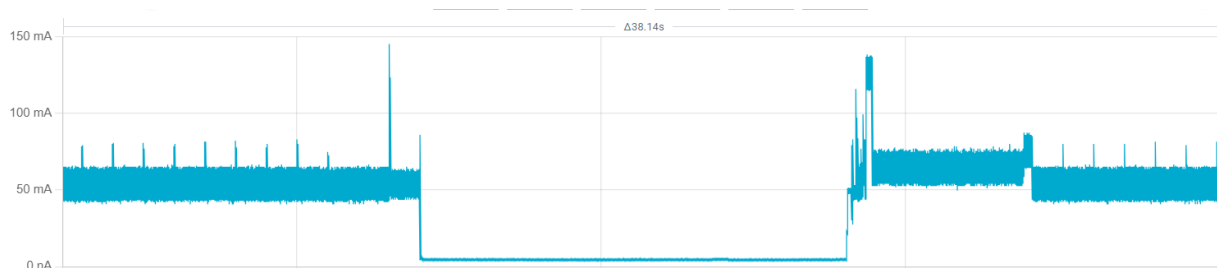


Figura 5.3: Gráfica de consumo ESP32 tomando datos del sensor de ultrasonido y enviándolo a través de LoRa.

Sería interesante llevar a cabo una medición de consumos en el mar, tanto para ver los tiempos reales de conexión y transmisión de datos como para ver cómo afectan las condiciones climáticas al consumo final. También sería muy interesante analizar la curva de carga y descarga de las baterías.

### 5.3. Pruebas de cobertura

Para ver cómo se cumplían las especificaciones y el rango teórico de los gateways, y para entender si el gateway UG65 propio sería realmente útil para montar el sistema ECO, se llevaron a cabo varias pruebas de disponibilidad de señal.

Las primeras pruebas fueron realizadas en tierra. Se instaló el UG65 en el lugar de trabajo, un punto relativamente elevado y con pocos obstáculos alrededor. A continuación se hicieron pruebas de conexión en los puntos que se ven en la Figura 5.4. Los resultados fueron sorprendentes, ya que a pesar de la gran cantidad de obstáculos existentes en un área no tan rural y con presencia de bosques, se consiguieron conexiones a 2,5 kilómetros de distancia. También en la playa, a casi 1km de distancia, se consiguió tener cobertura. La batea más cercana a la playa está a tan solo 350 metros del lugar en que se probó. Los puntos en que no se consiguió cobertura son lugares o demasiado bajos y por tanto con muchos obstáculos, o con suficiente concentración de edificios cercanos como para degradar la fuerza de la señal. Haciendo las pruebas a 2,5 kilómetros ya se notaba como los tiempos

de conexión a la red aumentaban significativamente, tardando cerca del minuto en establecerse la conexión.



Figura 5.4: Pruebas de cobertura en tierra. En verde los destinos en los que había cobertura y en rojo en los que no.

Una vez se construyó el sistema final, antes de instalarlo en la batea se hicieron varias pruebas de cobertura en diferentes puntos de la ría. No se tuvo la oportunidad de ir mucho más lejos, al transportarse en kayak, lo que hubiera sido interesante. El mapa de conexiones se puede ver en la Figura 5.5. Hubo cobertura en todos los casos con el gateway de Sálvora. Aunque el gateway propio UG65 se encontraba más cerca, a 2 kilómetros del punto de prueba más alejado, las instalaciones de Sálvora serán probablemente mucho más potentes y costosas, por lo que es más rápido acceder a este punto.

En este caso, se recogieron además los datos de calidad de la señal, cuya comparativa puede verse en la Tabla 5.1. El RSSI mide la potencia de la señal recibida, cuanto más negativo, peor. Los valores conseguidos, de -118 o -120 dBm indican una señal bastante débil, pero que aún así es funcional. El SNR mide la calidad de la señal con respecto al ruido. Valores negativos indican más ruido que señal. A partir de -10 dB la calidad comienza ser crítica. Estos datos comprueban lo que se mencionaba en el artículo [19] sobre el rango conseguido de 8,33 km y sobre que el mejor spreading factor para estas aplicaciones es 7, ya que es el que se está configurando de forma automática en todos los mensajes.

Lo que más que probablemente ocurra al intentar hacer pruebas de cobertura más exhaustivas, con localizaciones más alejadas, es que deje de haber cobertura. En este caso podría entrar en juego el uso del UG65 como gateway oportunista en el borde. Podría instalarse y moverse por la costa o en un barco para dar cobertura a los dispositivos que estén en las zonas vacías de cobertura.

## **5.4. Pruebas de monitorización de temperatura y humedad**

Ya se ha mencionado cómo se incorporó un sensor DHT11 al sistema con el fin de monitorizar la temperatura y humedad internas. La electrónica que se está utilizando soporta unas condiciones

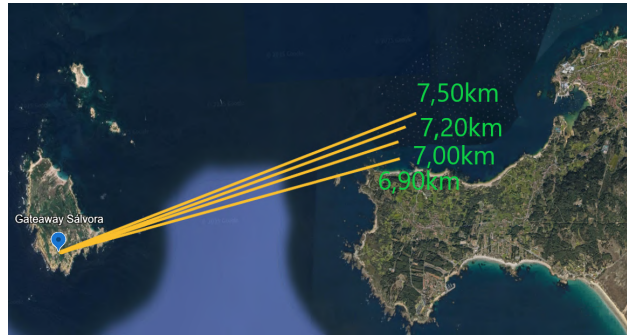


Figura 5.5: Pruebas de cobertura en el mar. En verde los destinos en los que había cobertura.

Punto	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Comentario
6,90 km	-118	-5.8	Señal débil pero dentro de lo aceptable. SNR algo bajo, pero usable.
7,00 km	-118 / -120	-10.5 / -11.2	Señal aún más débil, con niveles críticos de SNR. Posiblemente afectado por interferencias.
7,20 km	-119	-4.8	Mejor SNR que el punto intermedio, aunque con RSSI similar. Mejores condiciones locales de propagación.
7,50 km	-120	-7.0	El peor RSSI, aunque el SNR es mejor que el del punto intermedio. Límite de recepción fiable.

Tabla 5.1: Comparativa de calidad de señal LoRa (RSSI y SNR) en función de la distancia al gateway.

máximas de temperatura. El ESP32 de Heltec, por ejemplo, soporta un rango entre  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $70^{\circ}\text{C}$ . Por ello, resultaba de mucho interés conocer las condiciones a las que está expuesta dicha electrónica en su uso en una batea, a la intemperie.

Los gráficos dibujados durante los dos últimos días por el sistema se pueden ver en la Figura 5.6. Durante este periodo, la temperatura máxima dentro del sistema ha sido de  $26^{\circ}\text{C}$ , y la mínima de  $18^{\circ}\text{C}$ . Unos rangos perfectamente asumibles para el buen funcionamiento de los dispositivos. El tiempo durante los días en que se realizaron las pruebas fue de máximas de  $26^{\circ}\text{C}$ , con índices UV de 9. El sistema, por tanto, no acumula calor en su interior. La humedad máxima ha sido del 93 %, y la mínima del 69 %. Este valor sí es algo más extremo. Teniendo en cuenta que los porcentajes buscados en los hogares son de entre 40 y 60 %, un 93 % se hace excesivo, pudiendo provocar la aparición de moho en el dispositivo y daños a los equipos electrónicos. Sería interesante estudiar con mayor detenimiento su impacto al largo plazo y valorar la opción de instalar una capa de aislamiento externa o interna.

Los gráficos de temperatura y humedad, como era de esperar, se mueven al contrario. En las horas puntas del día la temperatura es la mayor y la humedad la menor. Durante la noche la humedad se dispara y las temperaturas bajan.



Figura 5.6: Gráficos de temperatura y humedad a lo largo de los dos últimos días.

## 5.5. Pruebas de uso en condiciones reales

Más allá de las pruebas particulares que se hayan podido llevar a cabo, el objetivo principal era construir el sistema y poder instalarlo durante aunque fuese unos días en una bodega real, para ver si realmente funcionaba, si el producto era viable y si podría aportar un valor real a la industria.

Tras 3 días en funcionamiento, el sistema ha sido capaz de enviar datos de distancias de forma periódica. Los tiempos de conexión han resultado ser muy elevados, habiendo recibido mensajes de intento de conexión incluso 10 minutos después del primero. En algunos casos, los datos enviados se han perdido y no se han recogido datos en esa hora del día, como se aprecia en la Figura 5.7.

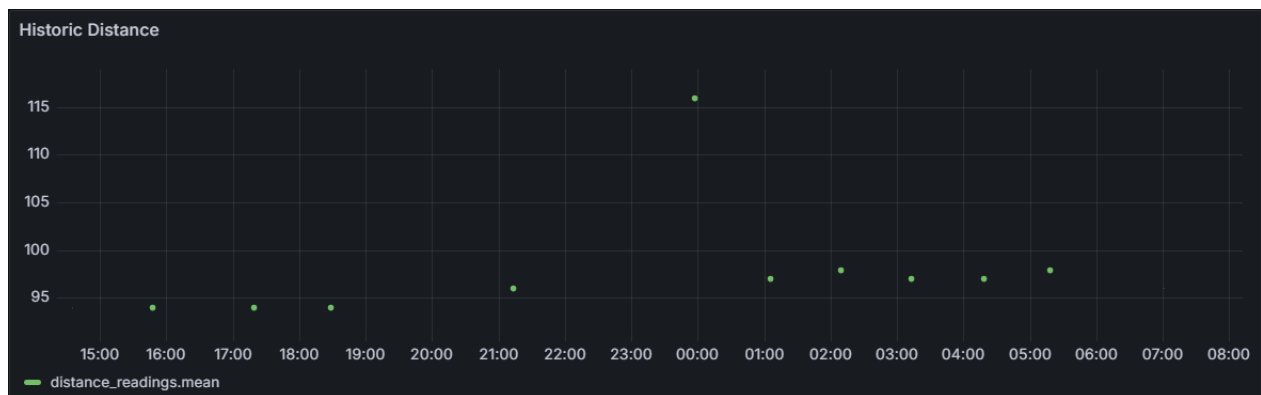
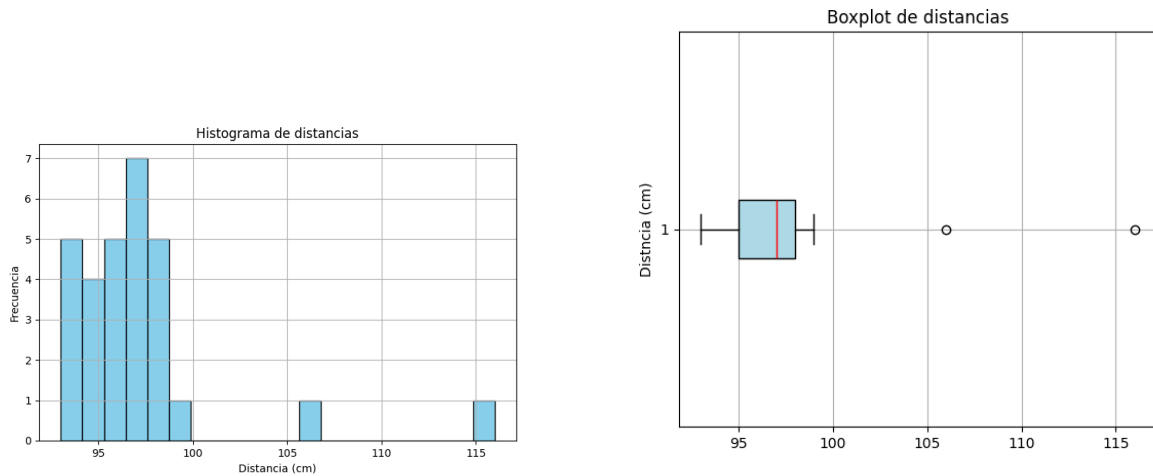


Figura 5.7: Gráfica temporal de distancias con mensajes no enviados en algunas horas (como las 22:00 y las 23:00).

Sin embargo, a pesar de los problemas mencionados, el dispositivo final ha funcionado de forma muy correcta la mayor parte del tiempo. El proceso de captura de los datos ha solventado los posibles problemas mencionados en capítulos anteriores. Utilizando los datos almacenados en InfluxDB (lo que supone otro uso probado más del sistema, más allá de la visualización de los datos en Grafana) y Python con la librería influxdb se han podido dibujar dos diagramas que muestran la distribución



(a) Histograma de datos de distancias tomados en los últimos 3 días. (b) Diagrama de caja de datos de distancias tomados en los últimos 3 días.

Figura 5.8: Estadísticas de los datos de distancias tomados en los últimos 3 días.

de los datos. Un histograma en la Figura 5.8a y un diagrama de caja en la Figura 5.8b. La mayor parte de los datos se encuentran entre 93 y 98 cm de distancia. Con una media muy clara en los 97 centímetros. Solo ha habido dos datos atípicos por encima de 100. Estos datos se produjeron el último día, por culpa probablemente de las grandes rachas de viento que hubo. La agregación de datos por día, eliminando los datos atípicos, se comprueba así que tendría sentido de cara a su uso en un contexto mensual o anual. Las diferencias que deberíamos ver en las distancia en ese contexto serían lo suficientemente significativas como para que no influya una desviación estándar en las medidas de 2 o 3 centímetros.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajo futuro

Tras la prueba en diferentes contextos del sistema se han obtenido una serie de resultados que ya han sido discutidos. Sobre dicha discusión se llega a una serie de conclusiones que serán explicadas en este capítulo.

### 6.1. Conclusiones

Este proyecto surge como respuesta al tradicionalismo, la falta de innovación y de digitalización del sector primario y en concreto del sector bateiro. El miedo al cambio y la complejidad en la implementación de soluciones en un ambiente extremo como es el mar, y su coste, son el motivo principal de estas carencias. Se planteó diseñar, construir y probar un sistema basado en electrónica barata que pudiese funcionar a la intemperie de la forma más flexible posible. En concreto, el foco se puso en estimar la carga de producto de la batea según la diferencia en el hundimiento de la batea a lo largo del proceso de engorde del mejillón.

El proyecto se desarrolló en los polígonos de bateas de O Grove. Lo primero que se hizo fue determinar la tecnología de comunicaciones a utilizar, que sería LoRaWAN, por su disponibilidad de cobertura con un gateway público y un gateway propio y por la gratuidad del servicio. Se utilizó una placa de desarrollo de Heltec con capacidades LoRa para llevar a cabo la comunicación. Este sistema de comunicación se construyó como una arquitectura de Edge Computing Oportunista, que lleva a cabo la mayor parte del procesamiento en el borde, enviando solo la información útil a la nube y no asume la constante conectividad de los dispositivos, pudiendo adaptar la localización de los gateways según las necesidades de cobertura en el mar. Los datos son enviados a The Things Network a través de los gateways disponibles. Desde aquí, se envían a través de MQTT utilizando una arquitectura de procesamiento de datos que vuelve de nuevo al borde. Se instaló una Raspberry Pi 4 en el lugar de trabajo con tres servicios diferentes: Node-RED para recibir los mensajes del broker MQTT y dirigirlos a InfluxDB, a través de una lógica versátil y flexible; InfluxDB para almacenar los datos en forma de series temporales y Grafana para acceder a estos datos y visualizar tanto su estado actual como su evolución histórica en un Dashboard.

A continuación, se estudió la electrónica que sería necesaria para construir el sistema, más allá de la placa de desarrollo. Primeramente se investigó sobre el proceso de producción de las bateas,

determinando que la distancia de hundimiento podría ser un buen indicador de la carga de producto. Sabiendo esto, se buscaron diferentes alternativas de sensores de distancia en el mercado, decantándose por el HC-SR04 de ultrasonidos al final por su bajo consumo, suficiente precisión y buen funcionamiento en el mar. El sistema debía ser alimentado a través de la cosecha de energía, o Energy Harvesting, por lo que se hicieron los cálculos teóricos de consumo y se diseñó el sistema de captura de energía, basado en placas solares, y de almacenamiento, con dos baterías de litio. Se necesitaron también un módulo cargador y un convertidor de voltaje para garantizar el funcionamiento y la seguridad del sistema.

Toda la electrónica anterior fue instalada, tras una construcción y pruebas paulatinas del sistema, en una caja estanca. Así, las placas solares y la antena se situaban en la parte superior, protegidas y aisladas lo máximo posible por cinta aislante blanca. Dentro de la caja se encontraban la placa de desarrollo, los módulos cargador y convertidor de voltaje y el sensor de ultrasonidos (además de un DHT11 para controlar la temperatura y humedad interiores). Las dos bocas de este sensor sobresalen del recipiente por debajo, por lo que fue necesario protegerlas con dos tubos de PVC, del tamaño que permitía el correcto funcionamiento del sensor, y con cinta aislante alrededor. Se diseñó un modelo 3D de recipiente creado ad hoc para el sistema, buscando optimizar lo máximo posible el aprovechamiento del espacio y la seguridad. Este incluía el diseño un módulo separado para el sensor, de manera que el sistema final fuese flexible al momento de cambiar este sensor por otro en diferentes usos. No se pudo llegar a utilizar, sin embargo, por falta de tiempo y la presencia de errores en el diseño por causa de la inexperiencia. El sistema construido, tras múltiples pruebas, fue instalado en una batea para analizar su correcto funcionamiento en un entorno real.

Para cerciorarse del correcto funcionamiento y de la utilidad del dispositivo final en un contexto real se llevaron a cabo varias pruebas. Se probó el funcionamiento del sensor sobre el agua en un ambiente de laboratorio, comprobando que el sistema de tomar 10 medidas y agregar los datos por día era un buen enfoque, ya que evitaba datos atípicos derivados de la reflexión de las ondas ultrasónicas en diferentes ángulos causada por el oleaje. Se hicieron también pruebas de consumo de energía, para ver que los cálculos teóricos, a pesar de no ser exactos, habían derivado en el uso de un material adecuado para el propósito, garantizando energía suficiente al sistema incluso durante varios días sin sol. También se hicieron pruebas de cobertura en tierra para ver el rendimiento del gateway UG65, el cual llegó hasta un rango de 2,5km en tierra, a pesar de la presencia de multitud de obstáculos. Esto demostró que sería útil para su uso como dispositivo para proporcionar cobertura oportunista, instalándolo o movimiéndolo cerca de la costa o en un barco. Se hicieron pruebas de cobertura en el mar, hasta a 7,5 km de distancia del gateway público de Sálvora, obteniendo una cobertura limitada pero suficiente para enviar datos. Finalmente, tras la instalación del dispositivo final en una batea cerca de la costa se comprobó su correcto funcionamiento en un contexto de uso real. Las condiciones climáticas monitorizadas en el interior del dispositivo (temperatura y humedad) permitieron su correcto funcionamiento, con rangos de temperaturas muy adecuados y rangos de humedades algo más peligrosos; hasta de un 93 %, lo que podría llegar a dañar algunos componentes electrónicos. Los tiempos de conexión fueron mucho más lentos de los esperados en la mayor parte de casos, debido a la exposición a condiciones climáticas como excesivo viento, niebla y el propio mar. Se tardó hasta 10 minutos en conseguir la conexión, lo que aumenta considerablemente el consumo del sistema. Algunos datos se perdieron en su envío. Sin embargo, en todos los días se consiguieron datos suficientemente estables como para, quitando algún dato atípico, encontrar el valor real de hundimiento a través de la agregación. La arquitectura de procesamiento de datos

funcionó correctamente, permitiendo desde el borde utilizar los datos almacenados en la base de datos de InfluxDB y visualizarlos a través de Grafana.

A través de todo el proceso de desarrollo descrito a lo largo del documento se ha demostrado la consecución de todos los objetivos propuestos. Se ha diseñado un sistema barato, de reducido tamaño, capaz de tomar energía del sol y autoalimentarse, flexible y resistente ante condiciones climáticas adversas. Se ha seleccionado el hardware y software más adecuados para el propósito buscado, manteniendo siempre el compromiso entre coste y durabilidad. Se ha construido el sistema y se ha probado tanto en un contexto de laboratorio como en un entorno real, instalándolo en una batea, para comprobar el correcto funcionamiento de los sensores, de las comunicaciones, y del sistema en general.

Como conclusión de este trabajo se ha conseguido construir un dispositivo IoT capaz de trabajar en el mar (en barcos o bateas) de forma autónoma aportando información muy valiosa a los profesionales de un sector muy poco digitalizado. Se ha demostrado como con un simple sensor de distancias, entendiendo el proceso de producción del mejillón en una batea, se podría intentar estimar la carga de producto, lo que impulsaría enormemente la eficiencia del sector. Todo ello manteniendo un coste perfectamente asequible sin perjudicar a la resistencia del sistema.

## **6.2. Trabajo futuro**

Se plantean una serie de posibles ampliaciones que serían interesantes de cara a comprobar la utilidad y viabilidad reales del sistema y a aumentar sus prestaciones:

- Realizar un análisis exhaustivo de la utilidad de las medidas tomadas: debería mantenerse el sistema funcionando durante varios meses para conocer así si realmente se aprecian las variaciones en el hundimiento de las bateas. Además, los datos de distancias deberían cotejarse con los de entradas y salidas de cuerdas de las empresas bateeiras para ver si existe una relación entre el crecimiento y el hundimiento; y de ser así poder diseñar un algoritmo que traduzca la diferencia de hundimiento en kilos de producción de mejillón.
- Aumentar el número de sensores por batea: sería interesante no contar solo con un único sensor de distancias por instalación, sino poder instalar varios por cada batea, como mínimo uno por esquina. Un solo ESP32 central podría servir a todos los sensores, pero habría que tener cuidado al instalar los cables con su protección y la distancia de transmisión de los datos. De esta forma, podría distinguirse no solo la producción total de la batea, sino la localización de esta dentro de la misma en diferentes sectores, según unos hayan sufrido un hundimiento mayor o menor que el resto.
- Encontrar nuevos usos para el dispositivo: ya que el sistema se ha planteado como una solución flexible y expansible, sería interesante buscarle nuevos usos, tanto en las bateas como en otras instalaciones como barcos. Se podrían utilizar otros sensores para medir la calidad del agua, la cantidad de nutrientes en ella, etc.
- Estudiar la degradación del sistema con el tiempo: Debería realizarse un estudio más en profundidad del rendimiento del sistema a lo largo del tiempo. No solo de la utilidad real del sensor de distancias, sino también de la degradación de la electrónica del sistema con el tiempo.

Esto incluiría un análisis más detallado y exacto del consumo (acompañado de una optimización del mismo, a ser posible) y un análisis en profundidad de las condiciones climáticas para analizar la pérdida de rendimiento o el daño a los circuitos que podría producir, por ejemplo, la humedad ambiente, que ya se ha visto que es bastante elevada. Esto podría acompañarse finalmente de sistemas para mejorar el aislamiento del sistema ante dichas condiciones.

# Apéndices



# Apéndice A

## Planificación temporal y costes

Se detalla a continuación la planificación inicial del tiempos de trabajo y los costes requeridos para el proyecto.

### A.1. Planificación temporal de trabajo

En esta sección se hace un breve resumen de cómo se planificaron los tiempos de trabajo a priori para cada una de las fases de desarrollo. Con un trabajo diario de 4 horas, para las 125 horas de trabajo total esperadas (6 créditos \* 25 horas cada uno), se esperaría que el proyecto durase poco más de un mes, 37,5 días. La estructura de desarrollo planteada se basa en una investigación inicial y una serie de fases sucesivas a incrementos. Cada incremento supondría el diseño, la implementación y la prueba de una nueva parte del sistema final:

- Fase 1 - Investigación inicial de soluciones, definición de objetivos y contexto de trabajo: Durante esta primera fase se pretendía conocer el sector industrial del mar, para descubrir su estado de digitalización y encontrar soluciones y retos tecnológicos existentes. Ello permitiría definir los objetivos y contexto del trabajo. Se esperaba que esta fase llevase alrededor de 1 semana.
- Fase 2 - Diseño y construcción del sistema inicial (ESP32, gateway y sensor ultrasonidos): En un primer momento se quería construir un sistema básico no autónomo capaz de tomar y enviar datos. Este permitiría realizar las pruebas iniciales de funcionamiento. Se esperaba que esta fase durase 2 semanas.
- Fase 3 - Incorporación de energy harvesting al sistema: Se investigaría el consumo del sistema y diseñaría y construiría un sistema de cosecha de energía para abastecer al sistema. Se esperaba que esta fase durase 1 semana.
- Fase 4 - Instalación y pruebas finales del dispositivo: se probaría el dispositivo tanto en el laboratorio como en condiciones reales para comprobar su correcto funcionamiento. Se esperaba que esta fase durase 1 semana.
- Fase 5 - Escritura de la memoria: Una vez terminado el proyecto se escribiría la memoria

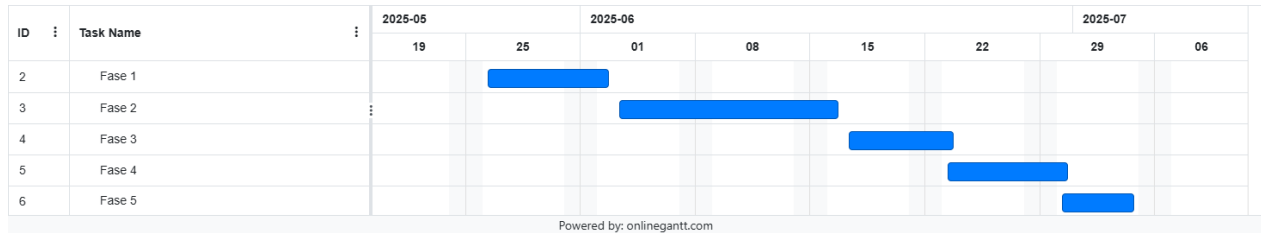


Figura A.1: Diagrama de Gantt de la planificación temporal.

(aunque ya se podrían haber introducido o anotado contenidos previamente durante las fases anteriores. Se esperaba que esta fase durase 5 días.

El cronograma esperado, por tanto, es el reflejado en la Figura A.1. La realidad en la práctica fue algo diferente, el proyecto comenzó más tarde de lo esperado, por falta de tiempo. La fase 1 duró menos de lo esperado, ya que se pudo hablar con profesionales del sector que facilitaron bastante el trabajo. La fase 2 sí llevó el tiempo esperado. La fase 3 llevó algo menos de tiempo. La fase 4 llevó más tiempo del esperado, por varias complicaciones en el montaje como problemas en las conexiones entre los módulos. Al final solo quedaron 3 días para realizar la fase 5, por lo que las horas de trabajo en estos tres días fueron muchas.

## A.2. Costes estimados

En esta sección se detallan todos los recursos que fueron necesarios para la construcción y consecución del proyecto. En la Tabla A.1a se desglosa el coste de todos los componentes utilizados para la construcción del dispositivo final. Los costes totales y separados entre electrónica y construcción se registran en la Tabla A.1b. Como se puede apreciar, el sistema final desarrollado es realmente muy barato, para lo que es la producción de una batea. Una empresa, por ejemplo, con 30 bateas, que tendrá un volumen de negocio bastante grande, solo necesitaría incurrir en unos gastos de 1200 € para digitalizar todas sus bateas. Ello suponiendo precios al minorista.

El coste de los recursos humanos utilizados durante el proyecto podría resumirse en la contratación de un jefe de proyecto, un analista y diseñador, un experto informático y un experto en electrónica como equipo de trabajo durante las 125 horas del proyecto. Esto supondría los gastos reflejados en la Tabla A.2.

Dispositivo	Precio
Heltec ESP32	11,60 €
Sensor HC-SR04	1,73 €
Placas solares	2 x 2,45 €
Cargador HW-168	0,98 €
Convertidor MT3608	2,77 €
Baterías Li-ion 18650	2 x 2,18 €
Sensor DHT11	1,82 €
Cables finos y breadboard	2,99 €
Recipiente estanco	5,38 €
Cables gordos, cinta aislante, tubos PVC	5 €
Gateway UG65	261,53 €
Raspberry Pi 4	68,24 €

(a) Coste aproximado de los componentes del dispositivo.

Dispositivo	Precio
<b>Total Electrónica</b>	27,86 €
<b>Total Construcción</b>	13,37 €
<b>Total</b>	41,23 €

(b) Costes totales del sistema sin incluir el gateway ni la Raspberry Pi.

Tabla A.1: Resumen de componentes y costes del sistema.

Rol	Coste/hora (€)	Horas	Coste total (€)
Jefe de proyecto	21	30	630,00
Analista/diseñador	19	40	760,00
Experto informático	19	25	525,00
Experto en electrónica	21	30	570,00
<b>Total</b>			2485,00

Tabla A.2: Coste estimado de recursos humanos para el desarrollo del proyecto (125 horas).



## Apéndice B

# Acceso y uso del repositorio de código del proyecto

Todos los códigos y archivos utilizados durante la construcción del sistema se han puesto a disposición en el siguiente repositorio de GitHub: [REPOSITORIO](#). En concreto, los archivos que están disponibles son:

- Código LoRaWAN: el código utilizado en la placa de desarrollo Heltec en el archivo `codigo_sin_licencias.ino` (se han eliminado las referencias a las claves de uno del dispositivo dentro de TTN por seguridad) en la carpeta `final_code_without_license`.
- Procesamiento de datos: en los archivos `node-red-flow.json` y `grafana.json` se puede acceder al flujo creado en Node-RED y al dashboard creado en Grafana respectivamente.
- Modelo 3D de la caja: el archivo “3D Model.skp” contiene el modelo 3D generado ad hoc para el sistema.
- Consumos sistema: el archivo `Energy_Consumption.ppk2` contiene los datos de consumos leídos por el Power Profiler Kit II de Nordic..
- Acceso a los datos de influxdb: el código de Python `Obtain_data_from_influx_in_python.py` es un ejemplo de acceso a los datos de influxdb para mostrar un histograma de los datos de distancia capturados por el sistema en los últimos 2 días.

Se puede acceder a una snapshot del dashboard en el siguiente enlace: [DASHBOARD](#).



# Bibliografía

- [1] Juan Ramón Vidal Romaní. (2024) La producción marisquera de galicia, contra el cambio climático. Publicado en La Voz de Galicia, accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: [https://www.lavozdeg Galicia.es/noticia/opinion/2024/08/20/produccion-marisquera-galicia-contr-a-cambio-climatico/0003\\_202408G20P11992.htm](https://www.lavozdeg Galicia.es/noticia/opinion/2024/08/20/produccion-marisquera-galicia-contr-a-cambio-climatico/0003_202408G20P11992.htm)
- [2] E. Benages, J. F. de Guevara, L. Hernández, and otros, “La economía digital en España: avances y retos por regiones y sectores,” 2025, accedido el 25 de junio de 2025. [Online]. Available: [https://cotec.es/wp-content/uploads/2025/01/La-economia-digital-en-Espana-2024\\_cotec\\_FINAL.pdf](https://cotec.es/wp-content/uploads/2025/01/La-economia-digital-en-Espana-2024_cotec_FINAL.pdf)
- [3] O. Sotomayor, E. Ramírez, and H. Martínez, “Digitalización y cambio tecnológico en las mipymes agrícolas y agroindustriales en América Latina,” 2021, accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/787ce64b-7f95-4a27-aad9-0a3dc9a3bb70/content>
- [4] N. Mosiashvili and J. Pareliussen, “Digital technology adoption, productivity gains in adopting firms and sectoral spill-overs: Firm-level evidence from Estonia,” OECD Economics Department, Paris, Working Paper 1638, 2020, accessed: 2 July 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1787/ba9d00be-en>
- [5] M. Balboni, S. Rovira, and S. Vergara, “ICT in Latin America: A microdata analysis,” Santiago de Chile, 2011, accessed: 2 July 2025.
- [6] Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD), “Transporte marítimo: Unctad publica nuevas estadísticas,” 2025, accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://unctad.org/es/news/transporte-maritimo-unctad-publica-nuevas-estadisticas>
- [7] Wikipedia contributors, “Lrit (barcos) — Wikipedia, la enciclopedia libre,” 2025, accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/LRIT\\_%28barcos%29](https://es.wikipedia.org/wiki/LRIT_%28barcos%29)
- [8] Green4T, “Tecnología: la brújula del futuro del transporte marítimo,” 2022, accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.green4t.com/es/archivos/11627>
- [9] T. Inkinen, R. Helminen, and J. Saarikoski, “Port digitalization with open data: Challenges, opportunities, and integrations,” *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 5, no. 2, p. 30, 2019, accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2199-8531/5/2/30>

- [10] Cadena SER. (2024) El puerto de valencia se convierte en un referente con su propia red de conexión 5g. Accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2024/12/23/el-puerto-de-valencia-se-convierte-en-un-referente-con-su-propia-red-de-conexion-5g-radio-valencia>
- [11] Cuerva Energía. (2025) Smart port: puertos sostenibles y eficientes. Accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://cuervaenergia.com/es/comunidad/smart-port-puertos-sostenibles-y-eficientes/>
- [12] Satlink. (2025) Boya inteligente ecosonda slx+. Accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://satlink.es/es/soluciones/soluciones-para-la-industria-pesquera/boyas-ecosonda-via-satelite/boya-inteligente-slx-eco>
- [13] P. He and P. Suuronen, “Technologies for the marking of fishing gear to identify gear components entangled on marine animals and to reduce abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 129, no. 1, pp. 253–261, 2018, accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X18301218>
- [14] UEstudio. (2023) Sector pesquero en españa: tradición, innovación y motor económico ante la amenaza de la dependencia de importaciones pesqueras. Publicado en El Mundo, accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.elmundo.es/uestudio/2023/11/21/655cd752fc6c83d4058b458d.html>
- [15] R. D. Rahayani and A. Gunawan, “Proposed design of an automatic feeder and aerator systems for shrimps farming,” *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, vol. 6, no. 4, pp. 277–280, 2018.
- [16] M. N. Uddin, M. Rashid, M. Mostafa, H. Belayet, S. Salam, N. Nithe, M. Rahman, and A. Aziz, “Development of automatic fish feeder,” *Global Journal of Researches in engineering: A mechanical and Mechanics Engineering*, vol. 16, no. 2, p. 11, 2016.
- [17] F. M. Pratiwy, M. D. Cahya, and Y. Andriani, “Digitization of aquaculture: A review,” *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, vol. 10, no. 1, pp. 18–22, 2022.
- [18] X. Zhu, D. Li, D. He, J. Wang, D. Ma, and F. Li, “A remote wireless system for water quality online monitoring in intensive fish culture,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 71, pp. S3–S9, 2010.
- [19] L. Parri, S. Parrino, G. Peruzzi, and A. Pozzebon, “A lorawan network infrastructure for the remote monitoring of offshore sea farms,” in *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [20] Manuel Méndez. (2025) Este es el balance oficial de la producción de mejillón en 2024. Publicado en Faro de Vigo, accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.farodevigo.es/arousa/2025/05/10/bateiros-despachan-179-000-toneladas-mejillon-balance-2024-117223007.html>
- [21] M. S. Millán and A. F. Huerta, “El csic indaga en las amenazas para el cultivo del mejillón en galicia y en las perspectivas del sector,” <https://iim.csic.es/es/news-events/>

- [news/el-csic-indaga-en-las-amenazas-para-el-cultivo-del-mejillon-en-galicia-y-en-las](#), marzo 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [22] Consellería do Mar, Xunta de Galicia. (2024) Anuario de acuicultura mariña 2024, sección 5.1.3. Accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.pescadegalicia.gal/Publicaciones/AnuarioAcuicultura2024/Informes/5.1.3.html>
- [23] La Voz de Galicia. (2019) Llega la era del marisqueo digital. Accedido el 4 de julio de 2025. [Online]. Available: [https://www.lavozdeg Galicia.es/noticia/pontevedra/2019/11/30/llega-era-marisqueo-digital/0003\\_201911P30C1992.htm](https://www.lavozdeg Galicia.es/noticia/pontevedra/2019/11/30/llega-era-marisqueo-digital/0003_201911P30C1992.htm)
- [24] Redacción Faro de Vigo. (2025) La batea de hormigón irrumpe en las rías por la falta de eucalipto. Publicado en Faro de Vigo, accedido el 2 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.farodevigo.es/mar/2025/06/09/batea-hormigon-irrumpe-rias-falta-eucalipto-118384168.html>
- [25] F. de Vigo, “Cetmar y las bateas 4.0: el futuro del mejillón,” <https://www.farodevigo.es/mar/2025/04/20/cetmar-bateas-4-0-futuro-mejillon-116528744.html>, abril 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [26] J. T. Palacín, “Los mejillones que viven en la ola digital,” <https://www.innovaspain.com/mar-span-mejillones-bateas/>, enero 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [27] INTECMAR, “Mapa interactivo del estado de las zonas de producción de moluscos en galicia,” <http://sig.intecmar.gal/EstadoZonas/?sm=a1>, 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [28] M. Technologies, “Lorawan range explained: Coverage & 4 tips to maximize,” <https://www.minew.com/lorawan-range-overview/>, febrero 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [29] T. Mapper, “Ttn coverage heatmap,” <https://ttnmapper.org/heatmap/>, 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [30] Milesight, “Ug65 lorawan gateway datasheet,” <https://resource.milesight.com/milesight/iot/document/ug65-datasheet-en.pdf>, 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [31] M. IoT, “Product accesories for gateways,” <https://www.milesight.com/product/accessories/#gateway>, 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [32] S. Corporation, “Sx1276 lora connect transceiver datasheet,” <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276>, 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [33] H. Automation, “Wifi lora 32 development board datasheet,” [https://resource.heltec.cn/download/WiFi\\_LoRa\\_32/WiFi%20Lora32.pdf](https://resource.heltec.cn/download/WiFi_LoRa_32/WiFi%20Lora32.pdf), 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [34] E. Wireless, “Lora temperature & humidity transmitter - external probe (en-tx-th-ext-600-034),” <https://enless-wireless.com/wp-content/uploads/2022/06/EN-TX-TH-EXT-600-034-2.pdf>, 2022, accedido el 2 de julio de 2025.
- [35] H. Automation, “Heltec wifi lora 32 (v2) placa de desarrollo usb tipo c con sx1262 esp32-s3, pantalla oled, wi-fi, ble y lora,” <https://es.aliexpress.com/item/1005006902338879.html>, 2025, accedido el 2 de julio de 2025.

- [36] E. Systems, “Esp32-wroom-32 datasheet,” [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf), 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [37] H. Automation, “Esp32\_lorawan github repository,” [https://github.com/HeITecAutomation/ESP32\\_LoRaWAN](https://github.com/HeITecAutomation/ESP32_LoRaWAN), 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [38] Statista, “Number of internet of things (iot) connected devices worldwide from 2022 to 2023, with forecasts from 2024 to 2034 (in billions),” <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>, 2025, accedido el 2 de julio de 2025.
- [39] A. AlTwaijiry, “Cloud computing present limitations and future trends,” *ScienceOpen Pre-prints*, 2021.
- [40] The Things Network, “The things network,” <https://www.thethingsnetwork.org/>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/>
- [41] MQTT.org, “Mqtt - the standard for iot messaging,” <https://mqtt.org/>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://mqtt.org/>
- [42] Raspberry Pi Ltd., “Raspberry pi 4 product brief,” <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>
- [43] Node-RED Project, “Node-red documentation,” <https://nodered.org/docs/>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://nodered.org/docs/>
- [44] InfluxData, “Influxdb - time series data platform,” <https://www.influxdata.com/products/influxdb/>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.influxdata.com/products/influxdb/>
- [45] Grafana Labs, “Grafana documentation,” <https://grafana.com/docs/grafana/latest/>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://grafana.com/docs/grafana/latest/>
- [46] JJ Chicolino, “Cuerdas gallegas,” <https://www.jjchicolino.com/cuerdas-gallegas/>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.jjchicolino.com/cuerdas-gallegas/>
- [47] Keystudio, “Ks0328 keystudio hr-sr04 blue ultrasonic module,” [https://wiki.keystudio.com/KS0328\\_Keyestudio\\_HR-SR04\\_Blue\\_Ultrasonic\\_Module](https://wiki.keystudio.com/KS0328_Keyestudio_HR-SR04_Blue_Ultrasonic_Module), 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: [https://wiki.keystudio.com/KS0328\\_Keyestudio\\_HR-SR04\\_Blue\\_Ultrasonic\\_Module](https://wiki.keystudio.com/KS0328_Keyestudio_HR-SR04_Blue_Ultrasonic_Module)
- [48] P. Spies, M. Pollak, and L. Mateu, *Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications*. Jenny Stanford Publishing, 2015.
- [49] Mapas Milhau, “Horas de sol al año en españa (2020),” <https://mapasmilhau.com/mapas-geograficos/horas-de-sol-al-ano-en-espana-2020/>, 2020, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://mapasmilhau.com/mapas-geograficos/horas-de-sol-al-ano-en-espana-2020/>
- [50] Satkit, “Batería pila recargable 18650 2400mah reales 3.7v battery litio li-ion,” <https://www.manomano.es/p/bateria-pila-recargable-18650-2400mah-reales-37v-battery-litio-li-ion-49013259>, 2025,

- accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.manomano.es/p/bateria-pila-recargable-18650-2400mah-reales-37v-battery-litio-li-ion-49013259>
- [51] BricoGeek, “Panel solar 300mw - 5v ak68x37,” <https://tienda.bricogeek.com/placas-solares/1367-panel-solar-300mw-5v-ak68x37.html>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://tienda.bricogeek.com/placas-solares/1367-panel-solar-300mw-5v-ak68x37.html>
- [52] Naylamp Mechatronics, “Módulo hw-168 cargador de batería litio tp4056 micro-usb,” <https://naylampmechatronics.com/baterias/194-modulo-hw-168-cargador-de-bateria-litio-tp4056-micro-usb.html>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://naylampmechatronics.com/baterias/194-modulo-hw-168-cargador-de-bateria-litio-tp4056-micro-usb.html>
- [53] NaylampMechatronics, “Tp4056 lithium battery charger module - datasheet,” <https://naylampmechatronics.com/img/cms/Datasheets/000194%20datasheet%20TP4056.pdf>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://naylampmechatronics.com/img/cms/Datasheets/000194%20datasheet%20TP4056.pdf>
- [54] AZ-Delivery, “Az-delivery mt3608 micro usb,” <https://www.amazon.es/Az-Delivery-MT3608-Micro-USB/dp/B0D2P5NZFK>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.amazon.es/Az-Delivery-MT3608-Micro-USB/dp/B0D2P5NZFK>
- [55] Leroy Merlin, “Caja estanca 220x170x85 sin conos,” <https://www.leroymerlin.es/productos/caja-estanca-220x170x85-sin-conos-86282866.html>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.leroymerlin.es/productos/caja-estanca-220x170x85-sin-conos-86282866.html>
- [56] Aosong Electronics, “Dht11 temperature and humidity sensor - technical data sheet,” <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>
- [57] Trimble Inc., “Sketchup: 3d design software,” <https://www.sketchup.com/en>, 2025, accedido el 4 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.sketchup.com/en>
- [58] Heltec Automation, “How to use license - heltec documentation,” [https://docs.heltec.org/general/how\\_to\\_use\\_license.html](https://docs.heltec.org/general/how_to_use_license.html), 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: [https://docs.heltec.org/general/how\\_to\\_use\\_license.html](https://docs.heltec.org/general/how_to_use_license.html)
- [59] Milesight, “Ug65 lorawan gateway - user guide,” <https://resource.milesight.com/milesight/iot/document/ug65-user-guide-en.pdf>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://resource.milesight.com/milesight/iot/document/ug65-user-guide-en.pdf>
- [60] The Things Network, “The things stack console,” <https://console.cloud.thethings.network/>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://console.cloud.thethings.network/>

- [61] Heltec Automation, “Connect to lora server using abp - heltec documentation,” [https://docs.heltec.org/general/lorawan\\_abp/connect\\_to\\_lora\\_server.html](https://docs.heltec.org/general/lorawan_abp/connect_to_lora_server.html), 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: [https://docs.heltec.org/general/lorawan\\_abp/connect\\_to\\_lora\\_server.html](https://docs.heltec.org/general/lorawan_abp/connect_to_lora_server.html)
- [62] The Things Industries, “Milesight ug65 gateway - the things industries documentation,” <https://www.thethingsindustries.com/docs/hardware/gateways/models/milesightug65/>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/hardware/gateways/models/milesightug65/>
- [63] HelTec Automation, “Lorawan\_hdc1080.ino - heltec esp32 lorawan examples,” [https://github.com/HelTecAutomation/ESP32\\_LoRaWAN/blob/master/examples/Sensor/LoRaWAN\\_HDC1080/LoRaWAN\\_HDC1080.ino](https://github.com/HelTecAutomation/ESP32_LoRaWAN/blob/master/examples/Sensor/LoRaWAN_HDC1080/LoRaWAN_HDC1080.ino), 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: [https://github.com/HelTecAutomation/ESP32\\_LoRaWAN/blob/master/examples/Sensor/LoRaWAN\\_HDC1080/LoRaWAN\\_HDC1080.ino](https://github.com/HelTecAutomation/ESP32_LoRaWAN/blob/master/examples/Sensor/LoRaWAN_HDC1080/LoRaWAN_HDC1080.ino)
- [64] T. Eckel, “Arduino new ping - wiki,” <https://bitbucket.org/teckel12/arduino-new-ping/wiki/Home>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://bitbucket.org/teckel12/arduino-new-ping/wiki/Home>
- [65] Adafruit, “Adafruit dht sensor library,” <https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library>
- [66] Adafruit Industries, “Adafruit ssd1306 library,” [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_SSD1306](https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306), 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_SSD1306](https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306)
- [67] N. del canal, “Título del video,” <https://www.youtube.com/watch?v=wgJLSu5wAnY>, 2025, accedido el 3 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=wgJLSu5wAnY>
- [68] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry pi imager and software,” <https://www.raspberrypi.com/software/>, 2025, accedido el 4 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/software/>
- [69] Nordic Semiconductor ASA, “Power profiler kit ii user guide,” [https://docs.nordicsemi.com/bundle/ug\\_ppk2/page/UG/ppk/PPK\\_user\\_guide\\_Intro.html](https://docs.nordicsemi.com/bundle/ug_ppk2/page/UG/ppk/PPK_user_guide_Intro.html), 2025, accedido el 4 de julio de 2025. [Online]. Available: [https://docs.nordicsemi.com/bundle/ug\\_ppk2/page/UG/ppk/PPK\\_user\\_guide\\_Intro.html](https://docs.nordicsemi.com/bundle/ug_ppk2/page/UG/ppk/PPK_user_guide_Intro.html)
- [70] Nordic Semiconductor, “nrf connect for desktop,” <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-tools/nRF-Connect-for-Desktop>, 2025, accedido el 4 de julio de 2025. [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-tools/nRF-Connect-for-Desktop>