

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**

**DESARROLLO DE PROTOTIPO UNDIMOTRIZ PARA
ENERGIZAR SISTEMA DE SENSORAMIENTO REMOTO DE
CALIDAD DE AGUA EN LA LAGUNA DE BURLAN –
UTCUBAMBA – AMAZONAS**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

Autor (es): **Bach.** Bravo Quispe Edinson Raul.
Bach. Guevara Requejo Luis Fernando.

Asesor (es): **Mg.** Ing. Henry Oswaldo Pinedo Nava.

Línea de investigación: Energías Alternativas.

JAÉN – PERÚ

2025




2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe


- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
104 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN


Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
Ley de Creación N° 29304
Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo N° 002-2018-
SUNEDU/CD

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día **20** de **noviembre** del año **2025**, siendo las **15:30** horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente : **Mg. Lenin Franchescoeth Núñez Pintado**
Secretario : **Mg. Frans Fuentes Maza**
Vocal : **Mg. Jannier Alberto Montenegro Juárez**, para evaluar la Sustentación del Informe Final:

- () Trabajo de Investigación
(**X**) Tesis
() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: **DESARROLLO DE PROTOTIPO UNDIMOTRIZ PARA ENERGIZAR SISTEMA DE SENSORAMIENTO REMOTO DE CALIDAD DE AGUA EN LA LAGUNA DE BURLAN - UTCUBAMBA - AMAZONAS**

Presentado por estudiante/egresado o Bachiller **Edinson Raul Bravo Qulapa y Luis Fernando Guevara Requejo**, de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica y Eléctrica**




Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

- (**X**) Aprobar () Desaprobar (**X**) Unanimidad () Mayoría

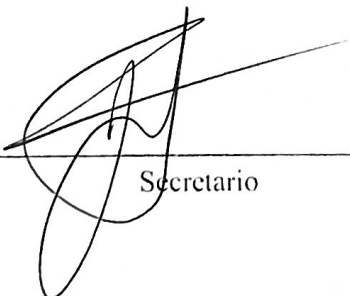
Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|---------------|
| a) Excelente | 18, 19, 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | (16) |
| c) Bueno | 14, 15 | () |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |

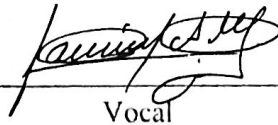
Siendo las **16:30**... horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.



Presidente



Secretario



Vocal

“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

ANEXO N°06:

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO
DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)**

Yo, **Edinson Raul Bravo Quispe** y **Luis Fernando Guevara Requejo**, egresados de la carrera Profesional de **Ingeniería Mecánica y Eléctrica** de la Facultad de **Ingeniería** de la Universidad Nacional de Jaén, identificados con DNI **73481559** y **75174761**.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

“DESARROLLO DE PROTOTIPO UNDIMOTRIZ PARA ENERGIZAR SISTEMA DE SENSORAMIENTO REMOTO DE CALIDAD DE AGUA EN LA LAGUNA DE BURLAN – UTCUBAMBA – AMAZONAS”.

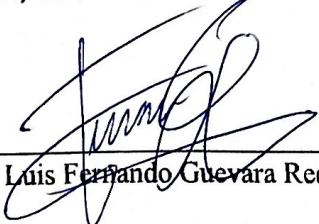
Asesorado por el Mg. Henry Oswaldo Pinedo Nava.

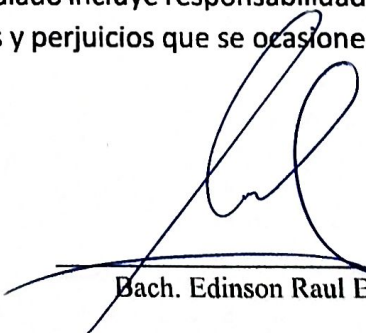
El mismo que presento bajo la modalidad de Bachiller para optar; el Título Profesional/Grado Académico de ingeniero mecánico electricista.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 18 de diciembre del 2025


Bach. Luis Fernando Guevara Requejo


Bach. Edinson Raul Bravo Quispe

RESUMEN

La monitorización ambiental en cuerpo de agua remoto, como la Laguna de Burlan, enfrentan el desafío de la falta de fuentes de energía continuas. El presente proyecto, el cual se inspiró en el prototipo HiWave-5, un prototipo diseñado para aprovechar la energía cinética de las olas y convertirla a energía eléctrica, acondicionándolo a un entorno de cuerpos de agua interiores y con la función de alimentar energéticamente los sensores de monitoreo de calidad de agua.

La investigación se centró en el diseño, implementación y evaluación de la posibilidad de una boya energética autosuficiente, capaz de alimentar un sistema de sensoramiento remoto para la calidad del agua (TDS y Temperatura). La metodología incluyó la caracterización del recurso energético de la laguna, donde, a partir de mediciones de viento de hasta 4.2 m/s y un *Fetch* estimado de 900 metros, se estimó una densidad de potencia máxima de 4.18 w/m.

Se diseñó e implementó un sistema electrónico de bajo consumo que utiliza un microcontrolador ESP32-S3, un sistema de telemetría LoRa que validó la comunicación a distancias modeladas; un generador electromagnético pendular de imanes y bobinas, que pudo generar una potencia de 0.181 W. Las pruebas funcionales del prototipo en la laguna demostraron su capacidad para medir los parámetros de calidad del agua y transmitirlos exitosamente al canal de la plataforma ThingSpeak. Los resultados manifiestan que a pesar de que la laguna cuenta con un potencial undimotriz pequeñamente aprovechable, este no es del todo idóneo para suministrar energéticamente un ecosistema de sensores y telemetría, pero, si es un campo de energía renovable que con un mayor campo de estudio y presupuesto puede ser aprovechado.

Palabras Clave: Energía Undimotriz, monitoreo de calidad de agua, telemetría, energía electromagnética. Boya, Laguna de Burlan.

ABSTRACT

Environmental monitoring in remote bodies of water, such as Laguna de Burlan, faces the challenge of a lack of continuous energy sources. This project, inspired by the HiWave-5 prototype, was designed to harness the kinetic energy of waves and convert it into electrical energy, adapting it to an inland water environment and powering water quality monitoring sensors.

The research focused on the design, implementation, and evaluation of the possibility of a self-sufficient energy buoy capable of powering a remote sensing system for water quality (TDS and temperature). The methodology included characterizing the energy resources of the lagoon, where, based on wind measurements of up to 4.2 m/s and an estimated fetch of 900 meters, a maximum power density of 4.18 W/m² was estimated.

A low-power electronic system was designed and implemented using an ESP32-S3 microcontroller and a LoRa telemetry system that validated communication at modeled distances. An electromagnetic pendulum generator with magnets and coils, which was able to generate 0.181 W of power. Functional tests of the prototype in the lagoon demonstrated its ability to measure water quality parameters and successfully transmit them to the ThingSpeak platform channel. The results show that although the lagoon has a small wave energy potential, it is not entirely suitable for powering a sensor and telemetry ecosystem. However, it is a renewable energy field that could be exploited with a larger study field and budget.

Keywords: Wave energy, water quality monitoring, telemetry, electromagnetic energy. Buoy, Burlan Lagoon.

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN	9
1.1.	Antecedentes	10
1.2.	Realidad Problemática	14
1.2.1.	Planteamiento del Problema	15
1.3.	Justificación	15
1.3.1.	Justificación Social	15
1.3.2.	Justificación Económica	15
1.3.3.	Justificación Tecnológica.....	16
1.3.4.	Justificación Ambiental.....	16
1.4.	Objetivos	16
1.4.1.	Objetivo General.....	16
1.4.2.	Objetivos Específicos (O.E.).....	17
II.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
2.1.	Objetivo de Estudio.....	17
2.2.	Ubicación del área de estudio	17
2.3.	Método, tipo y diseño de la investigación empleada	18
2.4.	Población, muestra y muestreo.	19
2.5.	Bases Teóricas.....	19
2.5.1.	Energía Renovable	19
2.5.2.	Energía Undimotriz.....	21
2.5.3.	Principio de Conversión de Energía Electromagnética.....	22
2.5.4.	Red de Sensores Inalámbrica (<i>Wireless Sensor Network</i> - WSN).	22
2.5.5.	El Microcontrolador.....	23
2.5.6.	La plataforma ThingSpeak.....	24
2.5.7.	Procesamiento de datos en Sistemas de Monitoreo.	24
2.5.8.	Principio de Conversión de Energía (AC a DC) para Fuentes de Energía Renovables.....	25
2.5.9.	Evaluación del Potencial de cuerpos de agua interiores	26
2.5.10.	Medidor de Total de sólidos disueltos (TDS): Principio de Funcionamiento y Aplicación.	27

2.5.11.	Temperatura en agua	28
2.5.12.	Sistema de telemetría	28
2.5.13.	Diseño asistido por computadora (CAD).....	29
2.6.	Metodología	29
2.6.1.	O.E.1. Definir Requerimientos del Prototipo.....	32
2.6.2.	O.E.2. Diseñar la electrónica para mediciones, telemetría, sistema electromagnético para la generación de energía.	35
2.6.3.	O.E.3. Manufacturar el prototipo de la boya a escala para validar su funcionalidad y ensamble.	48
2.6.4.	O.E.4. Evaluar el prototipo en laboratorio y en la Laguna de Burlan.....	48
2.7.	Técnicas, procedimiento y materiales para la recolección de datos	48
2.7.1.	Técnicas	48
2.7.2.	Procedimiento	49
2.7.3.	Materiales.....	49
2.8.	Análisis de datos	53
III.	RESULTADOS	54
3.1.	O.E.1. Definir requerimientos del prototipo.	54
3.1.1.	Definir y validar el conjunto de requerimientos para el Prototipo propuesto.....	54
3.2.	O.E.2: Diseñar la electrónica para mediciones, telemetría, sistema electromagnético para la generación de energía.....	56
3.2.1.	Realizar la inspección, estudio visual y mediciones para establecer una referencia del posible potencial undimotriz presente en la Laguna de Burlan.	56
3.2.2.	Diseñar sistema electrónico con dispositivos de medición y monitoreo de parámetros de calidad de agua que se ocupará en la implementación de la Boya Energética teniendo en cuenta su tamaño y eficacia.....	62
3.2.3.	Diseño preliminar de telemetría para transmisión de datos.....	66
3.2.4.	Diseñar el sistema de conversión, almacenamiento y consumo de Energía Eléctrica. 71	
3.3.	O.E.3: Manufacturar el prototipo de la boya a escala para validar su funcionalidad y ensamble.	86
3.3.1.	Modelar el diseño externo de la boya energética.....	86
3.3.2.	Implementar el diseño de la Boya a una escala de prototipo.....	88
3.3.3.	Ensamblar las piezas impresas del Prototipo.	90

3.4.	O.E.4: Evaluar el prototipo en laboratorio y en la Laguna de Burlan.	91
3.4.1.	Probar el funcionamiento del prototipo y realizar el monitoreo de la calidad de agua en la Laguna de Burlan.....	91
IV.	DISCUSIÓN	101
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
5.1.	Conclusiones	103
5.2.	Recomendaciones	104
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
VII.	DEDICATORIA.....	106
VIII.	AGRADECIMIENTOS	110
IX.	ANEXOS	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Ubicación geográfica de la Laguna de Burlan</i>	17
Figura 2 <i>Tipos de Energía Renovable</i>	20
Figura 3 <i>Imagen de un captador undimotriz</i>	21
Figura 4 <i>Imagen representativa de la energía electromagnética</i>	22
Figura 5 <i>Sensor de Temperatura Encapsulado</i>	23
Figura 6 <i>Microcontrolador Arduino</i>	23
Figura 7 <i>Canal en la plataforma ThingSpeak de los datos del Proyecto</i>	24
Figura 8 <i>Imagen de los procesos de Data Cleaning</i>	25
Figura 9 <i>Imagen de la conversión de energía de AC a DC</i>	26
Figura 10 <i>Fotografía de la Laguna de Burlan</i>	27
Figura 11 <i>Lectura del Total de Sólidos Disueltos en el Agua</i>	28
Figura 12 <i>Imagen de un sistema de telemetría</i>	29
Figura 13 <i>Metodología del Proyecto</i>	30
Figura 14 <i>Puntos donde se estableció el Fetch</i>	38
Figura 15 <i>Ubicación del anemómetro durante el periodo de mediciones</i>	39
Figura 16 <i>Diseño preliminar interno de la boya</i>	42
Figura 17 <i>Anemómetro Sauermann</i>	50
Figura 18 <i>Multímetro digital</i>	51
Figura 19 <i>Impresora 3D</i>	52
Figura 20 <i>Interfaz de Google Earth PRO</i>	53
Figura 21 <i>Gráfico de la altura de la ola en la laguna en relación al viento</i>	57
Figura 22 <i>Gráfico del Potencial Undimotriz en relación al viento</i>	58
Figura 23 <i>Velocidad del Viento</i>	59
Figura 24 <i>Potencial Undimotriz</i>	60
Figura 25 <i>Gráfico de correlación de la Velocidad del viento y el Potencial Undimotriz</i>	61
Figura 26 <i>Diagrama de conexiones del circuito</i>	63
Figura 27 <i>Diagrama de Conexiones del Nodo Emisor</i>	67
Figura 28 <i>Diagrama de Conexiones del Nodo Receptor</i>	67
Figura 29 <i>Canal de Monitoreo de Parámetros de Calidad de Agua en ThingSpeak</i>	68
Figura 30 <i>Sistema electrónico de conversión y almacenamiento de energía</i>	71
Figura 31 <i>Diseño del Elemento que aloja a los Imanes</i>	72
Figura 32 <i>Diseño del Elemento en el que se ubicará las Bobinas</i>	73
Figura 33 <i>Análisis pendular</i>	74
Figura 34 <i>Modelado completo de la Boya</i>	87
Figura 35 <i>Mallado del diseño hidrodinámico</i>	88
Figura 36 <i>Acceso superior</i>	89
Figura 37 <i>Acceso Central</i>	90
Figura 38 <i>Ensamble final del prototipo</i>	91
Figura 39 <i>Imagen de la prueba del dispositivo en el Rio Amojú</i>	92

Figura 40 <i>Gráfico de los Resultados de los Parámetros de Calidad de Agua en el Rio Amojú ..</i>	93
Figura 41 <i>Gráfico de los Resultados de los Parámetros de Calidad de Agua en el Rio Amojú ..</i>	94
Figura 42 <i>Imagen de las pruebas tomadas en la Laguna de Burlan</i>	96
Figura 43 <i>Datos de Temperatura en la Laguna de Burlan (28-09-2025)</i>	98
Figura 44 <i>Datos de TDS en la Laguna de Burlan (28-09-25)</i>	98
Figura 45 <i>Datos de Temperatura en la Laguna de Burlan (29-09-2025)</i>	99
Figura 46 <i>Datos de TDS en la Laguna de Burlan (29-09-25)</i>	99
Figura 47 <i>Datos de Temperatura en la Laguna de Burlan (30-09-2025)</i>	100
Figura 48 <i>Datos de TDS en la Laguna de Burlan (30-09-25)</i>	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Leyenda de Símbolos</i>	31
Tabla 2 <i>Requerimientos del Prototipo</i>	34
Tabla 3 <i>Datos técnicos del Anemómetro</i>	50
Tabla 4 <i>Multímetro digital</i>	51
Tabla 5 <i>Impresora 3D Creality</i>	52
Tabla 6 <i>Resultados de los requerimientos del prototipo</i>	54
Tabla 7 <i>Datos técnicos del Microcontrolador Emisor</i>	64
Tabla 8 <i>Datos técnicos del módulo de medición de TDS</i>	65
Tabla 9 <i>Datos técnicos del sensor de Temperatura</i>	65
Tabla 10 <i>Datos técnicos del Microcontrolador Receptor</i>	69
Tabla 11 <i>Datos técnicos del Módulo LoRa</i>	70
Tabla 12 <i>Datos técnicos de la Antena</i>	70
Tabla 13 <i>Energía total de la batería de litio</i>	78
Tabla 14 <i>Tiempo de recarga completa</i>	79
Tabla 15 <i>Consumo diario total</i>	79
Tabla 16 <i>Balance energético diario</i>	80
Tabla 17 <i>Autonomía de reserva (días)</i>	80
Tabla 18 <i>Datos técnicos de los Imanes</i>	81
Tabla 19 <i>Alambre de cobre esmaltado</i>	82
Tabla 20 <i>Datos técnicos del Puente de Diodos</i>	82
Tabla 21 <i>Datos técnicos del Condensador</i>	83
Tabla 22 <i>Datos técnicos del Módulo Cargador</i>	84
Tabla 23 <i>Datos técnicos de la Batería</i>	84
Tabla 24 <i>Datos técnicos del Step-Up</i>	85
Tabla 25 <i>Datos técnicos del Rodamiento</i>	86
Tabla 26 <i>Promedio de Resultados de TDS</i>	96
Tabla 27 <i>Promedio de Resultados de Temperatura</i>	97

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. <i>Imagen Satelital de la Laguna de Burlan – Utcubamba – Amazonas</i>	111
Anexo 2. <i>Código en Python de la potencial Undimotriz de la Laguna de Burlan</i>	111
Anexo 3. <i>Código Python del gráfico de dispersión</i>	114
Anexo 4. <i>Código del nodo emisor</i>	118
Anexo 5. <i>Código del nodo receptor</i>	121
Anexo 6. <i>Código en Python de los parámetros de calidad de agua en la Laguna de Burlan</i> ..	125
Anexo 7. <i>Código en Python de los parámetros de calidad de agua en el Río Amojú</i>	127
Anexo 8. <i>Plano de Circuito Esquemático y Placa de nodo Emisor</i>	130
Anexo 9. <i>Plano de circuito Esquemático y Placa de nodo Receptor</i>	131
Anexo 10. <i>Plano de Parte Inferior de Boya</i>	132
Anexo 11. <i>Plano de Parte Superior de Boya</i>	133
Anexo 12. <i>Plano de Antena de Boya</i>	134
Anexo 13. <i>Plano de Base para Bobinas</i>	135
Anexo 14. <i>Plano de Base para Imanes</i>	136
Anexo 15. <i>Fresado de placa de circuito (PCB)</i>	137
Anexo 16. <i>Soldando componentes a la placa de circuito</i>	137
Anexo 17. <i>Armado interno de la boya parte inferior</i>	138
Anexo 18. <i>Ensamblado de la electrónica interna de la Boya</i>	138
Anexo 19. <i>Ensamblado de la antena al LoRa</i>	139
Anexo 20. <i>Actualización de código al borde de la Laguna de Burlan</i>	139
Anexo 21. <i>Pruebas realizadas en la laguna de Burlan</i>	140
Anexo 22. <i>Fotografía de los testistas junto a la Boya en la Laguna de Burlan</i>	140
Anexo 23. <i>Prueba y rectificación de la toma de datos dentro de la Laguna</i>	141
Anexo 24. <i>Pruebas de la Boya en el Río Amojú</i>	141
Anexo 25. <i>Funcionamiento de Boya dentro del Río Amojú</i>	142
Anexo 26. <i>Prueba de toma de datos en el Río Amojú junto al Asesor</i>	142

I. INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía renovable es un imperativo global para mitigar el cambio climático y asegurar la autonomía energética. En este contexto, el Perú, con su vasta riqueza de recursos hídricos, posee un potencial significativo para la exploración y desarrollo de tecnologías energéticas no convencionales. Si bien la energía fotovoltaica se ha consolidado como una solución viable para el abastecimiento de energía en zonas aisladas, su rendimiento está intrínsecamente ligado a factores climáticos, presentando intermitencias que limitan su fiabilidad para aplicaciones que demandan un suministro eléctrico constante y sin interrupciones, como los sistemas de monitoreo ambiental remoto (Bonkaney et al., 2017).

Esta intermitencia energética es una barrera crítica para el despliegue de sistemas de sensoramiento remoto, los cuales requieren energía continua para la adquisición, procesamiento y transmisión de datos. Ante esta problemática, surge la necesidad de explorar fuentes de energía locales, de alta disponibilidad y menor intermitencia. La energía undimotriz, que convierte la energía cinética del oleaje, ofrece una alternativa teórica de alta previsibilidad, aunque su desarrollo se ha centrado casi exclusivamente en entornos marítimos de alta potencia (Jaramillo, 2019; Villanueva, 2022).

Este enfoque ha dejado un vacío tecnológico en la integración de sistemas de monitoreo de baja potencia con fuentes de energía adaptadas a entornos de bajo potencial energético, como las lagunas. El desafío no radica únicamente en la generación de energía, sino en el diseño de un sistema completo, robusto y energéticamente eficiente capaz de operar en dicho entorno.

El presente trabajo de investigación se inscribe en este desafío, abordando el diseño, desarrollo y validación de un prototipo de sistema de sensoramiento remoto para el monitoreo de la calidad del agua (TDS y Temperatura) en la Laguna de Burlan (Utcubamba, Amazonas). Para solucionar el problema energético, el proyecto evalúa la viabilidad de implementar un convertidor undimotriz a escala, adaptado a las olas de bajo *fetch* de la laguna. El objetivo central es validar la arquitectura del sistema de monitoreo (sensores, control y telemetría LoRa) y, simultáneamente, caracterizar experimentalmente el potencial real de la energía undimotriz en este entorno, determinando sus límites y su aporte real a la autonomía del sistema.

1.1. Antecedentes

(Garcia, 2020), realiza una tesis de posgrado, en la cual se plantea como objetivo el desarrollar una metodología independientemente del dispositivo para la optimización geométrica de los convertidores de energía undimotriz, permitiendo de esta manera la generación de formas mejoradas que reduzcan el coste inicial de implementación, basándose en las modificaciones de la estructura del dispositivo, ya que se estipula que esto tiene un alto impacto en los costos. Las optimizaciones realizadas se llevan a cabo bajo condiciones específicas del oleaje en el mar, además, se tomaron como puntos a analizar figuras geométricas simples, como esferas o cilindros. Los softwares utilizados en el desarrollo de este proyecto fueron Matlab y WAMIT, los cuales permitieron el desarrollo de una metodología basada en la reconstrucción geométrica y modelo hidrodinámico. Durante los procesos de optimización se emplearon algoritmos genéticos. El software WAMIT, fue de mucha importancia para examinar las interacciones de las ondas superficiales con las estructuras flotantes, esto con el objetivo de tener una mejor eficiencia y precisión de la optimización. Uno de los puntos principales en los cuales se basó la investigación fue también la potencia media anual extraída del mar, de la cual se pudieron obtener las siguientes expresiones: $f_1 = -\bar{P}$ (Potencia media anual), $f_2 = -\frac{\bar{P}}{\sqrt[3]{V}}$ (Potencia media anual por raíz cúbica del volumen sumergido), $f_3 = -\frac{\bar{P}}{V}$ (Potencia media anual por volumen sumergido), siendo estos últimos utilizados especialmente es dispositivos de un mayor tamaño, $f_4 = -\frac{\bar{P}}{V^{2/3}}$ (Potencia media anual por raíz cúbica del volumen elevado al cuadrado sumergido), $f_5 = -\frac{\bar{P}}{A}$ (Potencia media anual por área de la superficie sumergida), $f_6 = -\frac{\bar{P}}{\sqrt{A}}$ (Potencia media anual por raíz de área de la superficie sumergida). Estas expresiones fueron puestas a prueba bajo distintas condiciones y lugares. Algunos de los puntos a analizar fueron el oleaje, sobretensión, empuje y cabeceo, de los convertidores de energía undimotriz, y las condiciones del mar de North osea y Noruega. Algunos de los resultados de optimización in términos de Potencia en relación de volumen, y Potencia en relación de área, en los ámbitos de sobretensión, empuje y cabeceo, obteniéndose los siguientes valores de potencial en unidades de (W/m^3) : $f_1 = 105,021$; $f_2 = 669,392$; $f_3 = 881,903$; $f_4 = 881,015$; $f_5 = 238,513$; $f_6 = 136,962$, y los valores

tomando en cuenta la sobretensión, empuje y cabeceo: : $f_1 = 421,894$; $f_2 = 3\ 100,901$; $f_3 = 3\ 056,609$; $f_4 = 3\ 132,408$; $f_5 = 2\ 020,783$; $f_6 = 2\ 707,938$. Los resultados de optimización para dispositivos que oscila en sobretensión en la ubicación frente a la costa de Noruega y de North Sea fueron los siguientes, para un f_1 en Noruega, se tiene una potencia (kW) 1159,314, un volumen de (m^3) de 2 746,303 y un área (m^2) de 774,463. Mientras que los valores para el North Sea son: una potencia (kW) 636752, un volumen de (m^3) de 2 989,560 y un área (m^2) de 856,589. Dentro de los resultados de análisis del proyecto, encontramos que cuando se utilizaba más de un modo de movimiento para la extracción de la energía, se obtenían superficies bastante planas en relación con grandes superficies de agua y altas contribuciones de elevación en rendimiento total de la potencia. La combinación de los análisis de empuje y cabeceo para la extracción de potencia, se beneficia más para la evaluación del tamaño del dispositivo. En el ámbito de la ubicación, se demostró que afecta en el tamaño del dispositivo, ya que la forma se determinará por los modos de movimientos presentes. En manufactura, se determinó que lo opcional es fabricar los convertidores en láminas de acero, además, se demostró que la curvatura es una restricción, pero que se pueden solucionar durante el proceso de optimización.

(Lau, 2017), en la universidad politécnica de Cataluña, desarrolla una tesis de pregrado, con el propósito de utilizar el movimiento oscilatorio de las olas (energía undimotriz) para la generación de electricidad en condiciones de mareas bajas. El dispositivo se construyó para estar en presencia de condiciones marítimas, por lo cual, para el desarrollo se emplearon datos de OBSEA, para poder reconstruir estas condiciones del oleaje en un estanque de agua y probar la operatividad y evaluar el rendimiento del dispositivo. El sistema de conversión energético está constituido por imanes y bobinas, colocados en un armazón, unido con un rodaje al péndulo, el cual se encarga de transferir la energía cinética de las olas a mecánica, posteriormente el movimiento produce energía magnética por la presencia de las bobinas e imanes, la cual se convierte en energía eléctrica. Para la obtención de los resultados en la presente investigación, se realizaron 2 pruebas experimentales (2 vueltas e 8 espiras y 6 vueltas e 12 espiras) en los cuales se modificaron la distribución de las bobinas, realizadas con 1 mm y 0.5 mm de cobre respectivamente. La

investigación concluye con los datos de funcionamiento de la boya, que es capaz de generar 3,8 mJ, además de, una potencia de 126,15 μW en el periodo de tiempo de una hora.

(Silva et al., 2022), publica un artículo científico, en el cual se investigó el potencial eléctrico a gran escala del prototipo HiWave-5, implementado en la zona de Aguçadoura. Para esto, se implementó un modelo de reanálisis ERA5, de datos obtenidos entre los años 1950 a 2020, que fueron comparados con los datos de viento-oleaje recolectados entre los años 2012 a 2019, y datos obtenidos de boyas registrados en los mismos años. Para la comparación de estos datos, de establecieron 2 puntos de estudios siendo uno de ellos Aguçadoura y el otro Leixões. Dentro de los cálculos a resaltar, encontramos la estimación del potencial undimotriz $P = 0.491 H_s^2 T_e$; el potencial del dispositivo $P_{CPOWEC} = 0.491 H_s^2 T_e \eta C_w$; el potencial mensual $P_{mensual} = P_{CPOWEC} \times (24_{horas}) \times (N^{\circ}_{dias}) \frac{1MW}{1000 kW}$; así como la inversión anual total = $60 \sum_{Enero}^{Diciembre} \times P_{mensual}$. Obteniendo resultados de una producción media anual en el lugar de implementación de 25.84 kW/m, con valores que oscilaron entre los 18,29 y 35,47 kW/m, valores de una variabilidad anual, mientras, que los valores medios de producción fueron entre los 8.03 y 47.57 kW/m. Dentro de otros valores obtenidos, podemos resaltar, la captura de la energía del dispositivo (119.45 kW), en estacones de rendimientos bajos un valor anual acumulado de 1048.09 Mwh, los costos de nivelado de energía (60 euros/MWh) y la inversión anual estimada (62.9 euros). En el apartado de las conclusiones se determinó una buena concordancia entre los valores reanalizados con los valores obtenido por las boyas marítimas, con una variación de un 7.20%.

(Caro, 2022), publica una investigación de pregrado, en la cual se desarrolla un diseño de una boya fluvial que aloja sensores de monitoreo de oxígeno disuelto (DO) en el río Júcar – Valencia, estos son alimentados por la energía solar (paneles solares); además, se menciona que este tiene como función la toma de datos cada 10 minutos, y la transmisión de estos datos a una red una vez al día. Dentro de los implementos que se usan para el desarrollo de este proyecto, podemos encontrar un sensor de oxígeno disuelto (MAX 3232), un microcontrolador (STM32WLESCUG), un módem GSM (ZETA – GEP – LTE4), un GPS (MFGPS) con una comunicación RS - 323, un sensor de intrusión y un sistema de alimentación solar, compuesto de 4 paneles de 60W/12V, batería de plomo ácido

(CSB – GP12340), un regulador solar (SS20L) y un convertidor DC – CD. Los softwares empleados son Coolterm, el cual ayudo a establecer la conexión de los dispositivos, y Arduino IDE para la programación del microcontrolador. Para el desarrollo del sistema se enfocan principalmente en tres factores, dentro de los cuales se encuentran el diagrama de bloques, encargado de la interconexión de los componentes, el diseño electrónico, mediante el cual se permite la conexión del microcontrolador, modem, GPS, y los instrumentos mencionados anteriormente, y por último el software de control, centrado en establecer el código que estará presente en el microcontrolador. Cabe recalcar que se establecieron condiciones iniciales para que el proyecto se ejecutara, dentro de las cuales encontramos rangos de temperatura del agua entre 10 y 20 °C, para garantizar una correcta medición, así como, un rango de temperatura del aire entre 2 y 30 °C, para la transmisión segura de datos. El dispositivo fue ensamblado y fabricado, teniendo un costo de implementación aproximado de € 15 990.62, dentro de las pruebas realizadas en campo, obtenemos una lectura de concentración de oxígeno disuelto de $2.4 \pm 0.3 \text{ mg/L}$ de saturación.

(Tirado, 2015), en su investigación de pregrado, realiza una Red inalámbrica de sensores con la capacidad de monitorear los niveles de pH, oxígeno disuelto (DO) y potencial de óxido reducido, con el objetivo de que proporcione datos en tiempo real sobre parámetros clave de calidad del agua. Dentro de los elementos utilizados, podemos destacar los sensores de pH (ENV – 40 – pH), de oxígeno disuelto (ENV – 40 – DO), potencial de oxido reducido (ENV – 40 – ORP), así como un microcontrolador (PIC16F887) para el procesamiento de datos y un módulo XBee (serie 1) para la comunicación inalámbrica; el microcontrolador se programó mediante el software Bascom AVR, para la calibración de los sensores se utilizó Atlas Scientific, y para los módulos XBee fue el software (X-CTU). El diseño del prototipo se basó en 3 etapas fundamentales, dentro de las cuales se encuentra, el diagrama de cableado de los circuitos (sensores y microcontrolador), el diagrama de conexiones (conexiones físicas de los sensores, microcontrolador y módulo XBee), la alimentación de los dispositivos (reguladores de voltaje 7805 y LM1117T). El dispositivo fue patentado, y tuvo un coste aproximado de \$ 2 003.3, además se realizaron pruebas del dispositivo en 2 puntos, siendo uno de ellos para determinar el nivel de calidad del agua para el lavado de hortalizas y otro punto para verificar el nivel de contaminación del agua,

siendo los valores los siguientes: pH 7.2 y 6.8; oxígeno disuelto 8.5 mg/l y 7.2 mg/l; potencial de óxido reducido 150 mV y 120 mV para ambos puntos de muestreo.

(Villanueva, 2022), realiza proyecto de pregrado, en el cual propone un diseño de generación undimotriz tipo captador puntual, el cual por las ubicaciones geográficas, se podría ubicar en la zona costera de Paita – Piura. Para el desarrollo del proyecto se realizaron algunas mediciones de los parámetros de altura y longitud de las olas en todo el año 2018, donde se obtuvo alturas máximas y mínimas de las olas, siendo 2.5m y 1.5m respectivamente, además, determinaron un promedio energético de $76\,708.75\text{ kJ/m}^2$. En este proyecto se declinan por el uso de una boya MB-9000 que tiene un diámetro de 3m y una altura de 2.8m; en general, todo el sistema cuenta con 6 boyas oscilantes, que aprovechan el movimiento generado por la energía undimotriz para inyectar agua a presión y romper la inercia de una turbina Pelton, estimándose una potencia de 5MW. La inversión inicial total que se calcula para la implementación de este diseño es de S/ 1 680 073.464, además, se señala que el proyecto tiene una vida útil estimada de 25 años, con un flujo anual aproximado de S/ 529 462.216 y una tasa de interés del 12%, por lo tanto, el valor neto es de S/ 1 043 434.051 y la tasa de retorno es de un 20%, teniendo de esta manera la recuperación de la inversión en un aproximado de 5 años.

1.2.Realidad Problemática

En la actualidad, la monitorización continua de parámetros ambientales en cuerpos de agua remotos, como la laguna de Burlan, enfrenta una barrera significativa: la falta de una fuente de energía eléctrica constante y fiable para alimentar los sistemas de sensores. La dependencia de la red eléctrica convencional es inviable debido a la ubicación aislada de estos puntos de monitoreo. Aunque los paneles solares son una alternativa renovable, su rendimiento es inconsistente y vulnerable a factores ambientales como la nubosidad o la acumulación de polvo, lo que compromete la recolección ininterrumpida de datos críticos para la evaluación de la calidad del agua. Por otro lado, la energía undimotriz, generada por el movimiento de las olas, presenta una solución prometedora para una alimentación energética continua. Sin embargo, la mayoría de los desarrollos existentes en el Perú están enfocados en la generación a gran escala en el mar y no han sido adaptados o diseñados

para operar en condiciones de oleaje de baja intensidad, como el que se encuentra en lagunas, dejando un vacío tecnológico para aplicaciones de baja potencia en estos entornos.

1.2.1. Planteamiento del Problema

A partir de lo mencionado, se plantea la siguiente pregunta:

¿Cómo se puede desarrollar un sistema de generación de energía undimotriz a pequeña escala, adaptado a las condiciones de bajo oleaje de la laguna de Burlan, para garantizar la alimentación energética autónoma y continua de un sistema de monitoreo de la calidad del agua?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación Social

El presente proyecto está diseñado para llevar a cabo pruebas en software, desarrollarse en laboratorio y realizar experimentos en la Laguna de Burlan. Esto nos permitirá determinar los campos de aplicación reales, con un enfoque principal en las mareas bajas, especialmente en lagunas. El objetivo es monitorear la calidad del agua en estos lugares, que pueden tener contacto con la población, turistas, fauna, entre otros, contribuyendo así al bienestar social de la comunidad.

1.3.2. Justificación Económica

Actualmente, para el monitoreo de parámetros de calidad del agua, se suelen emplear paneles solares. Sin embargo, esta alternativa presenta costos algo significativos que justifican la búsqueda de nuevas soluciones. Un sistema solar básico para el monitoreo (Panel, batería y controlador), tiene un costo de adquisición inicial aproximado que oscila entre los S/ 400.00 y S/ 1 400.00. Además, se tiene que considerar costos de mantenimiento, debido a que no son los adecuados para este entorno, requiriendo limpieza profesional frecuentemente, teniendo un costo anual aproximado de S/ 1 200.00. En contraste, el prototipo basado en energía undimotriz se adapta a esta necesidad, ofreciendo un costo de producción y mantenimiento estimado de S/ 900.00, demostrando una ligera ventaja económica.

1.3.3. Justificación Tecnológica

En el ámbito tecnológico, se propone la implementación de un sistema de generación undimotriz basado en un convertidor de tipo pendular. Este mecanismo aprovecha las oscilaciones de baja frecuencia para accionar un sistema de imanes y bobinas, produciendo energía de manera continua.

Este desarrollo tecnológico, que integra un convertidor de energía undimotriz adaptado a lagunas con una plataforma de telemetría de bajo consumo. Se prevé que el sistema tenga una detección precisa y automatizada de los parámetros de calidad del agua, logrando así una toma de datos de alta calidad. Al establecer este sistema en zonas con oscilaciones bajas, se estará implementando esta energía renovable en un nuevo campo de estudio, especialmente lagunas.

1.3.4. Justificación Ambiental

En el ámbito ambiental, este sistema permitirá el monitoreo de distintos parámetros de calidad de agua, temperatura, minerales y sales, entre otros. Se prevé que su implementación se realice en estanques, lagunas y otros cuerpos de agua interiores.

Con la implementación del sistema, se espera lograr un mejor control de los parámetros del agua, lo que contribuirá a la protección de la población, así como de la fauna y flora de la Laguna de Burlan. De esta manera, se promoverá la conservación y el cuidado del medio ambiente, asegurando que los cuerpos de agua se mantengan en condiciones óptimas para sustentar la vida.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar un prototipo undimotriz para el suministro de energía hacia sensores de monitoreo de parámetros de calidad de agua que se implementarán en la Laguna de Burlan – Utcubamba – Amazonas con la búsqueda de eficiencia y aplicación de la energía undimotriz en este ámbito.

1.4.2. Objetivos Específicos (O.E.)

- O.E.1: Definir los requerimientos del prototipo.
- O.E.2: Diseñar la electrónica para mediciones, telemetría, sistema electromagnético para la generación de energía.
- O.E.3: Manufacturar el prototipo de la boya a escala para validar su funcionalidad y ensamble.
- O.E.4: Evaluar el prototipo en laboratorio y en la Laguna de Burlan.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Objetivo de Estudio

Desarrollo de un prototipo undimotriz para el suministro de energía hacia sensores de monitoreo de parámetros de calidad de agua que se implementarán en la Laguna de Burlan – Utcubamba – Amazonas con la búsqueda de eficiencia y aplicación de la energía undimotriz en este ámbito.

2.2. Ubicación del área de estudio

El presente proyecto se desarrolló en la Laguna de Burlan (Figura 1), ubicada en el distrito de Bagua Grande, provincia de Utcubamba, región Amazonas, Perú; Aproximadamente a unos 776 m.s.n.m. en las coordenadas $5^{\circ}47'06''S$ $78^{\circ}23'14''W$.

Figura 1

Ubicación geográfica de la Laguna de Burlan



Nota: Extraído de Google Earth Pro.

2.3.Método, tipo y diseño de la investigación empleada

Método de la investigación

El método empleado en la presente investigación es el sintético, el cual orienta el desarrollo de una solución tecnológica integral a partir de la articulación de sus partes constituyentes. Este método se seleccionó debido a que el objetivo del proyecto es estructurar y unificar diversos dominios de conocimiento y componentes en un sistema cohesivo y funcional. Para su aplicación, el proceso partió del análisis por separado de los subsistemas fundamentales: generador electromagnético, circuitos de carga y sistema de sensores. Posteriormente, mediante un razonamiento lógico, estos elementos fueron integrados y ensamblados para componer el sistema final (un prototipo de boya autosustentable). Este enfoque es consistente con la definición de (Sampieri, 1996), quien nos menciona que el método sintético representa un proceso de composición de un todo mediante la unión y relación de sus elementos, transitando de los componentes simples a la conformación de una totalidad compleja.

Tipo de investigación

El presente proyecto se enfoca en el diseño y la construcción de un prototipo tecnológico funcional para resolver el desafío práctico de la autonomía energética en un dispositivo de monitoreo. Esta orientación hacia la creación de una solución tangible, en lugar de la formulación de las nuevas teorías, define la naturaleza de la presente investigación como Aplicada. De acuerdo (Bunge, 2004), la investigación aplicada es aquella que utiliza el conocimiento científico existente con fines de utilidad inmediata, buscando controlar procesos y resolver problemas técnicos. Este proyecto se alinea plenamente con dicha definición, ya que materializa principios de electromagnetismo, electrónica y diseño estructural de una boya auto – sostenible con una finalidad específica y práctica.

Diseño de la investigación

La metodología de este estudio se define como un diseño experimental en enfocado al desarrollo tecnológico. El propósito central es el desarrollo de un prototipo funcional, lo cual se consigue con la modificación de variables de diseño para cuantificar el impacto en

el rendimiento del sistema. Concretamente, se manipularon variables independientes, tales como las propiedades del generador, para medir su efecto causal sobre indicadores de desempeño dependientes, como el voltaje y la corriente generada. Este enfoque centrado en el establecimiento de la relación causa – efecto. Resulta indispensable para la optimización del dispositivo. Como mencionan (Sampieri et al., 1996), el diseño experimental permite al investigador no solo describir un fenómeno, sino también comprender su origen y predecir su comportamiento a través de la manipulación de sus causas, un principio fundamental para la ingeniería y el desarrollo de tecnología.

2.4.Población, muestra y muestreo.

El desarrollo del prototipo undimotriz tiene un propósito fundamental: Aprovechar la energía del oleaje generado en la laguna de Burlan-Utcubamba-Amazonas, para energizar un sistema de sensores remoto con la finalidad de realizar un monitoreo a la calidad del agua de esta misma. En este contexto, hemos decidido no incluir población en el presente proyecto de tesis, debido a que el enfoque principal es evaluar el funcionamiento del prototipo. Al no considerar una población, tampoco es necesario incluir una muestra, dado que esta se define como un subgrupo de la población. De igual manera el muestreo, que se utiliza para seleccionar la muestra.

2.5.Bases Teóricas

2.5.1. Energía Renovable

El modelo energético global, históricamente dependiente de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) se revela como insostenible debido a su rol como principal fuente de emisiones de gases invernaderos y, por ende, motor del calentamiento global. Frente a este desafío, la transición hacia las energías renovables se alza como la alternativa técnica y económicamente viable para reemplazar la generación eléctrica convencional y reducir la huella de carbono a nivel global (Ballesteros & Gallego, 2019).

Las energías renovables se definen como aquellas fuentes cuya energía se obtiene de recursos naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales a

un ritmo superior al de su explotación. Se clasifican principalmente en: Fuentes no gestionables, como la energía solar (fotovoltaica y termosolar) y la eólica, cuya producción depende de las condiciones climáticas; Y Fuentes gestionables, como la energía hidráulica, la biomasa, la geotérmica y la energía oceánica (mareomotriz, undimotriz), que pueden ofrecer una producción más estable y predecible (Navntoft et al., 2019; Pereira Blanco, 2015).

Su implementación a gran escala no solo representa la vía más eficaz para la mitigación climática y el cumplimiento de los objetivos del Acuerdo de París, sino que también aborda imperativos estratégicos clave: fortalece la seguridad y soberanía energética al disminuir la dependencia de los volátiles mercados internacionales de combustibles fósiles (Energy Agency, 2024) y, a su vez, impulsa un modelo de desarrollo económico sostenible a través de la innovación tecnológica y la creación de empleos verdes, posicionándose como el pilar fundamental para la construcción de un futuro energético resiliente, seguro y climáticamente neutro (Renewable Energy Agency, 2024).

Figura 2

Tipos de Energía Renovable



Nota. Algunos tipos de energía renovable que podemos aprovechar en el mundo.

2.5.2. Energía Undimotriz

La energía undimotriz es una forma de energía marina que se obtiene de la captura de la energía contenida en la oscilación de la superficie oceánica. Esta representa una de las formas más prometedoras de energía marina, aprovechando la energía cinética y potencial inherente al movimiento oscilatorio de la superficie oceánica (Lifschitz & Tomazín, 2019; Pire, 2018).

Este recurso es una manifestación concentrada de la energía eólica transferida al mar (fenómeno conocido como *fetch*), destacando por su alta densidad energética que se cuantifica en kilovatios por metro de frente de ola (kW/m) y por una predictibilidad superior a otras fuentes renovables variables, lo que permite pronósticos fiables con varios días de antelación y facilita su gestión en la red eléctrica. La conversión a electricidad se realiza a través de una diversa gama de tecnologías conocidas como Convertidores de Energía de las Olas (*Wave Energy converters - WEC*), cuyos principios de funcionamiento varían ampliamente e incluyen absorbedores puntuales, columnas de agua oscilante y dispositivos de rebase (Pelissero, 2011).

Figura 3

Imagen de un captador undimotriz



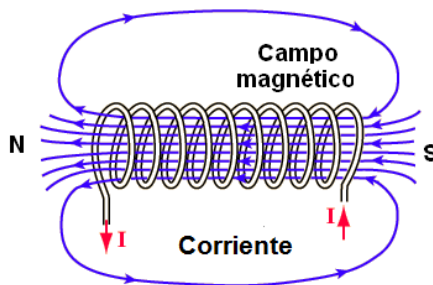
Nota. Generador undimotriz marino en Valparaíso, Chile.

2.5.3. Principio de Conversión de Energía Electromagnética.

La conversión de energía mecánica en eléctrica se rige fundamentalmente por la Ley de Inducción Electromagnética de Faraday, la cual establece que una variación en el flujo magnético (Φ_B) a través de un circuito conductor induce una fuerza electromotriz (\mathcal{E}) o voltaje en el mismo. En el diseño de un generador, este principio se materializa al utilizar la energía mecánica para crear un movimiento relativo entre un campo magnético, generado por imanes en el rotor, y un conjunto de conductores (bobinas) dispuestos en el estator. Esta rotación provoca una variación temporal continua del flujo magnético que atraviesa las bobinas, induciendo una corriente eléctrica de acuerdo con la ecuación $\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$ (Griffiths, 2017). Este fenómeno de inducción es, por tanto, el mecanismo transductor esencial que permite la generación de prácticamente toda la electricidad que consumimos a gran escala.

Figura 4

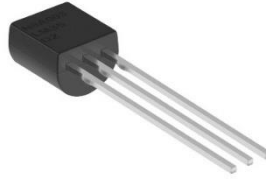
Imagen representativa de la energía electromagnética



Nota. En la imagen se puede apreciar de manera representativa como se obtiene energía mediante imanes y bobinado.

2.5.4. Red de Sensores Inalámbrica (*Wireless Sensor Network* - WSN).

Una Red de Sensores Inalámbrica (WSN) es un sistema compuesto por nodos autónomos distribuidos, equipados con sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales. Cada nodo recolecta los datos y los transmite de forma inalámbrica a través de la red hasta una estación base. Su principal ventaja de las WSN es su flexibilidad de despliegue en áreas de difícil acceso, su bajo costo y su capacidad de autoorganización, siendo una tecnología muy útil para el monitoreo (Fraden, 2016).

Figura 5*Sensor de Temperatura Encapsulado*

Nota. Imagen referencial de un sensor de temperatura.

2.5.5. El Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado que constituye un sistema computacional autónomo en un único chip (MCU) con una arquitectura compacta conocida como *System on a Chip* (SoC). A diferencia de un microprocesador, que es exclusivamente la unidad central de procesamiento, el MCU integra en una misma pastilla de silicio un núcleo de CPU, memoria de programa no volátil (Flash/ROM), memoria de datos volátil (RAM) y, fundamentalmente, un conjunto de periféricos integrados como puertos de E/S (GPIO), convertidores analógico-digital (ADC) e interfaces de comunicación (UART, SPI, I²C) (Wendling, 2010). Esta integración le permite interactuar directamente con el mundo físico, leyendo datos de sensores y controlando actuadores sin necesidad de hardware externo complejo (Mazidi et al., 2012).

Figura 6*Microcontrolador Arduino*

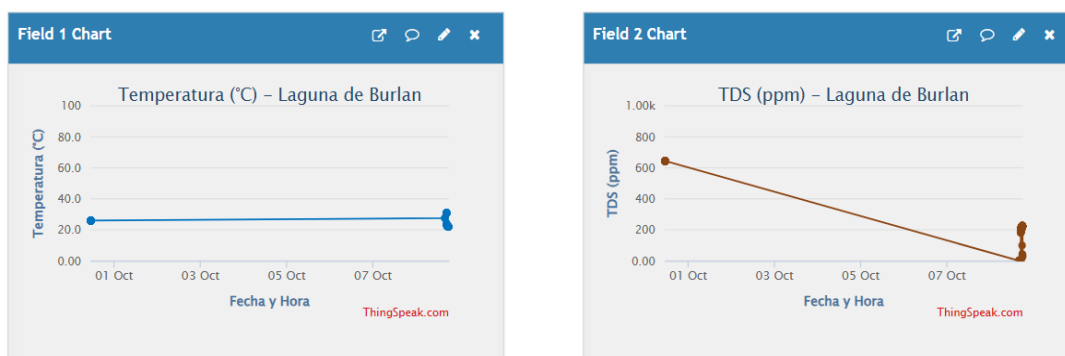
Nota. Microcontrolador Arduino Arduboard R3.

2.5.6. La plataforma ThingSpeak

ThingSpeak es una plataforma de servicios en la nube (cloud platform) y una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) diseñada para la recolección, almacenamiento, análisis y visualización de datos obtenidos mediante sensores remotos. Esta plataforma destaca por su capacidad de generar visualización en tiempo real y por integrar el entorno de análisis de Matlab, permitiéndose un monitoreo remoto más rápido y accesible.

Figura 7

Canal en la plataforma ThingSpeak de los datos del Proyecto



Nota. En la imagen se muestra los gráficos de mediciones de los parámetros del proyecto utilizando ThingSpeak.

2.5.7. Procesamiento de datos en Sistemas de Monitoreo.

El procesamiento de datos es el conjunto de operaciones que transforman los datos crudos (raw data) provenientes de sensores en información útil y de calidad. En el contexto del censado, los datos a menudo son imperfectos, por lo que este paso es crucial. Aquí se Incluye tareas como la limpieza, la transformación y la reducción, con el fin de preparar datos para un análisis o visualización efectivos (Van De Velde & Pérez, 2006).

Figura 8

Imagen de los procesos de Data Cleaning



Nota. En la imagen se pueden apreciar algunos de los procesos realizados en el presente proyecto para la obtención de resultados.

2.5.8. Principio de Conversión de Energía (AC a DC) para Fuentes de Energía Renovables.

Cuando la corriente alterna (AC) proviene de una fuente de energía renovable como un generador undimotriz, eólico o de una microturbina hidráulica, su naturaleza es distinta a la de la red eléctrica. No es una señal estable de 50/60 Hz con un voltaje constante, sino que es una "AC salvaje", cuyas características varían directamente con la fuente de energía primaria.

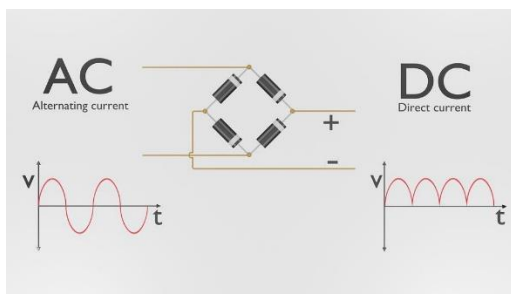
El principal desafío es que tanto la amplitud (voltaje) como la frecuencia de la corriente alterna generada son variables. Por ejemplo, en un convertidor de energía undimotriz: Una ola grande y rápida hará girar el generador a alta velocidad, produciendo un voltaje y frecuencia elevada, pero una ola pequeña y lenta producirá un voltaje y frecuencia baja. Esta variabilidad hace que la AC generada sea inútil para ser conectada directamente a la red o a la mayoría de los aparatos. Por lo tanto, la conversión a DC no es solo una opción, sino un paso indispensable (Abu-Rub, 2014).

El objetivo principal de la conversión AC/DC en este contexto es crear un enlace de corriente continua estable (Hernán, 2003). Este proceso sigue 3 etapas: rectificación, filtrado y regulación. Etapa de Rectificación. Al igual que en una fuente convencional, se utiliza un rectificador, casi siempre un puente de diodos de onda

completa, para convertir la AC variable en DC pulsante. Dado que el voltaje de entrada fluctúa, la salida de DC pulsante también tendrá una amplitud muy variable. Etapa de Filtrado. Un banco de condensadores se coloca después del rectificador para absorber la energía de los pulsos de alto voltaje (olas grandes) y suministrar energía durante los valles de bajo voltaje (olas pequeñas). El resultado es una tensión de DC relativamente estable en sus terminales, aunque todavía puede tener fluctuaciones y un rizado considerable. Etapa de Regulación. Esta es la etapa más importante en aplicaciones renovables. El voltaje, aunque filtrado, sigue siendo demasiado inestable para ser utilizado directamente (por ejemplo, para cargar una batería). Por ello, se utiliza un convertidor DC/DC controlado por un microcontrolador (Un Step Up por ejemplo).

Figura 9

Imagen de la conversión de energía de AC a DC



Nota. En la imagen se puede apreciar el uso de un rectificador para convertir de alterna a continua.

2.5.9. Evaluación del Potencial de cuerpos de agua interiores

El potencial energético de los cuerpos de agua interiores, como lagos y embalses, representa una frontera emergente en la generación de energía renovable, enfocada en aprovechar las olas de origen local generadas por el viento. A diferencia del recurso oceánico, este se caracteriza por olas de periodo corto y menor altura, lo que resulta en una densidad de potencia inferior (expresada en kW/m). Sin embargo, su viabilidad no reside en la alta densidad, sino en ventajas estratégicas como la proximidad a los centros de consumo, la reducción de costos de infraestructura y la posibilidad de operar en condiciones ambientales menos severas, lo que simplifica el diseño y mantenimiento de los dispositivos de conversión energética. La cuantificación

del potencial depende directamente del *fetch* y los regímenes de viento locales, siendo un área de investigación activa para la generación de energía distribuida y la hibridación con otras tecnologías renovables como la solar (Hansen & Márquez-Pacheco, 2012).

Figura 10

Fotografía de la Laguna de Burlan



Nota. La laguna de Burlan es un claro ejemplo de aguas interiores.

2.5.10. Medidor de Total de sólidos disueltos (TDS): Principio de Funcionamiento y Aplicación.

El medidor de TDS es un instrumento analítico portátil diseñado para estimar la concentración combinada de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas disueltas en un líquido, principalmente agua. Se expresa en miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm) y su medición es fundamental en el monitoreo ambiental (ANA, 2018).

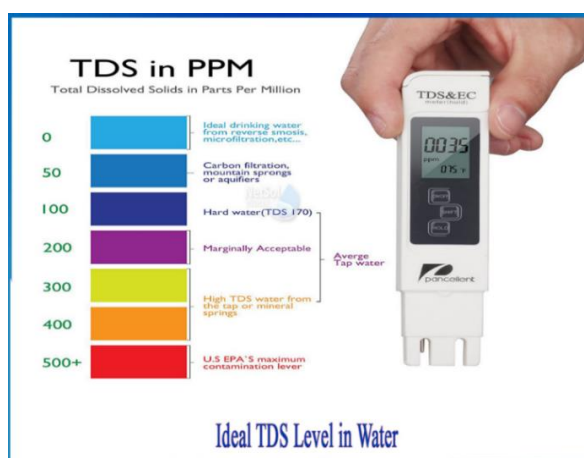
Los sólidos disueltos son principalmente minerales que el agua recoge de manera natural, entre ellos tenemos el calcio, potasio y magnesio. El nivel de TDS es un indicador fundamental de la calidad del agua, ya que afecta directamente su conductividad eléctrica y puede influir en su sabor.

El TDS es una medida de la concentración agregada de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas disueltas en el agua. Se compone principalmente de sales, minerales y metales. El TDS se utiliza como un indicador general de la calidad del

agua, ya que afecta directamente su conductividad eléctrica y puede influir en su sabor. Se expresa en miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm) y su medición es fundamental en el monitoreo ambiental. Para tener un campo de visión general, el agua resulta ser potable cuando la lectura del medidor de TDS es entre 50 a 250 ppm, y se considera contaminada y no apta para su consumo cuando la lectura es superior a 500 ppm.

Figura 11

Lectura del Total de Sólidos Disueltos en el Agua



Nota. Valores estándares de lectura de TDS para saber los parámetros del agua.

2.5.11. Temperatura en agua

La temperatura es un parámetro físico maestro en los ecosistemas acuáticos, ya que regula prácticamente todos los procesos biológicos y químicos. Afecta la solubilidad de gases vitales como el oxígeno, la velocidad de las reacciones químicas, las tasas metabólicas de los organismos y la toxicidad de los contaminantes. Por esta razón el monitoreo de la temperatura es un componente esencial en cualquier evaluación de la calidad y la salud de un cuerpo de agua (ANA, 2018).

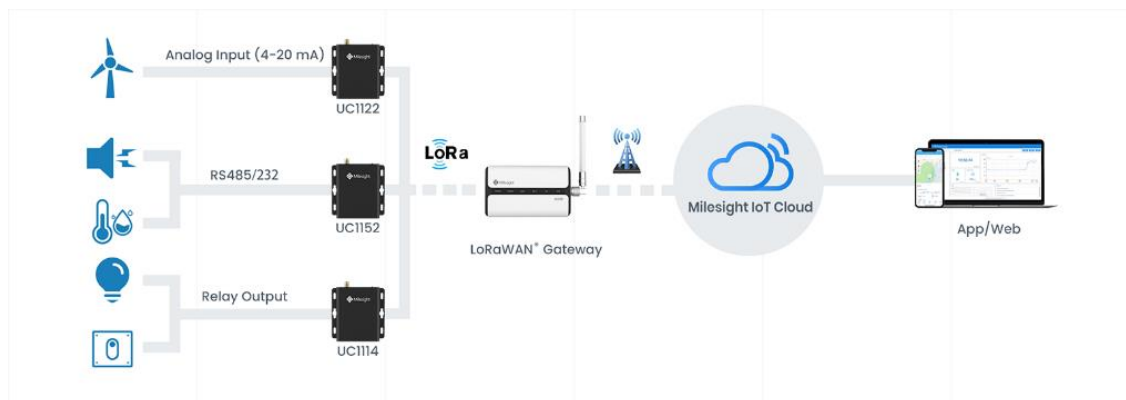
2.5.12. Sistema de telemetría

Un sistema de telemetría permite la medición de datos en una ubicación remota y su transmisión a un punto central para su análisis y monitoreo. Consta de tres componentes clave: Un conjunto de sensores y un transductor para la adquisición de

datos; una unidad de transmisión que envíe la información; y una estación receptora que decodifica y presenta los datos (Castro, 2004).

Figura 12

Imagen de un sistema de telemetría



Nota. Imagen del sistema de telemetría, que incorpora nodos emisores, nodo receptor, nube de almacenamiento y web.

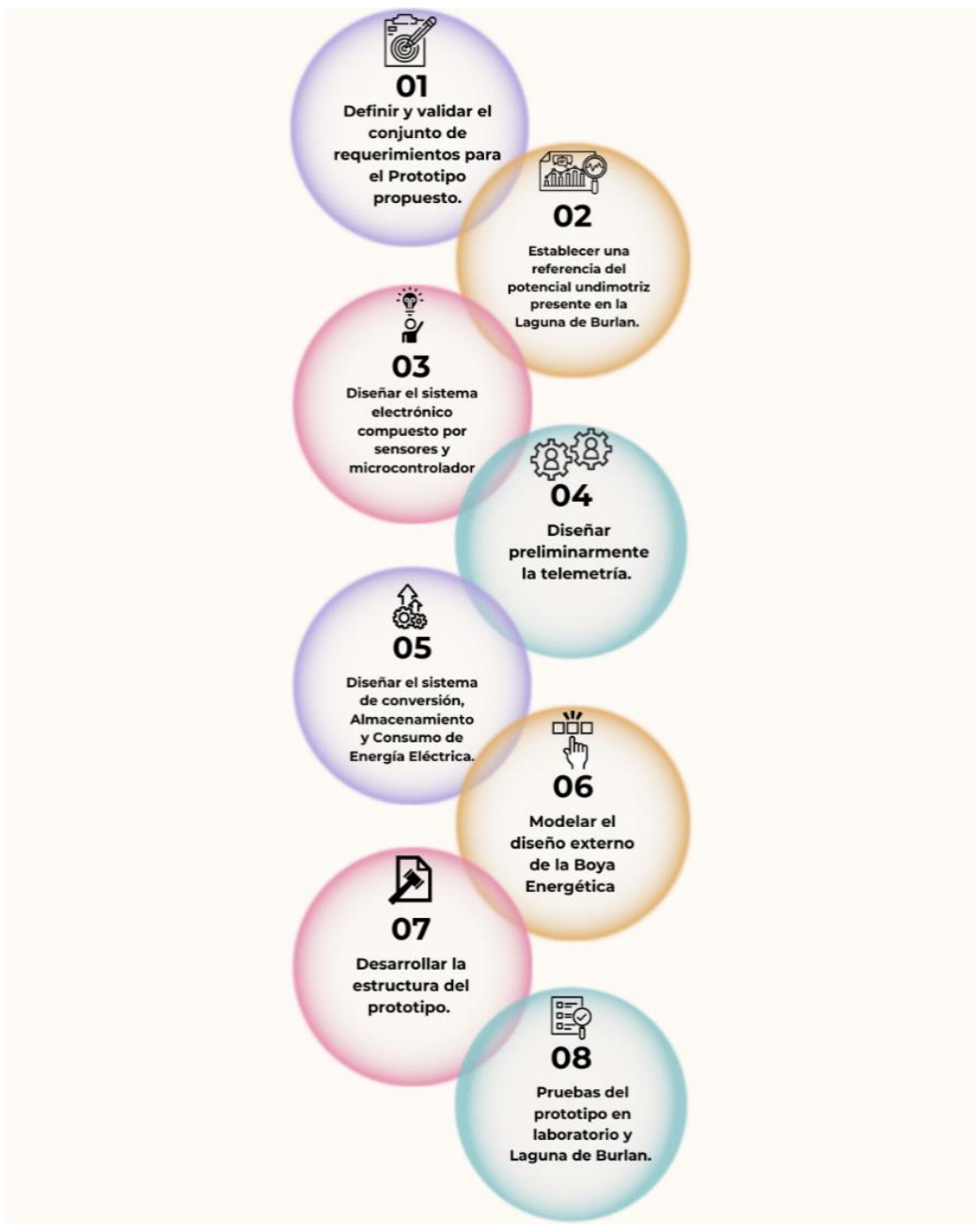
2.5.13. Diseño asistido por computadora (CAD)

Los sistemas CAD han reemplazado el dibujo técnico manual, permitiendo un diseño de mayor precisión y eficiencia. Un modelo CAD no es solo una representación visual, sino una base de datos geométrica que sirve como punto de partida para el análisis de ingeniería y la manufactura permitiéndonos crear, modificar, analizar y documentar representaciones geométricas de objetos en dos y tres dimensiones (Rojas & Rojas, 2006).

2.6. Metodología

En la siguiente Figura 13 podemos apreciar una vista general de cuál fue la metodología utilizada en el proyecto.

Figura 13
Metodología del Proyecto



Nota. Se aprecia en la figura la metodología utilizada de forma ordenada.

Se ha creado la siguiente tabla para mayor comprensión con los símbolos que se utilizaran a lo largo de la metodología empleada:

Tabla 1*Leyenda de Símbolos*

Símbolo	Significado	Unidad de medida
$V_{ACgenerado}$	Voltaje generado en corriente Alterna	Voltios (V)
$V_{ind,pico}$	Voltaje inducido	Voltios (V)
N_{total}	Número total de bobinas	Adimensional
R_{total}	Resistencia total del conductor	Ohmios (Ω)
ρ	Resistividad del material	Ohmios por metro ($\Omega \cdot m$)
L	Longitud del conductor	Metros (m)
$A_{conductor}$	Área de la sección transversal del conductor	Metros cuadrados (m^2)
$P_{generada}$	Potencia Generada	Watts (W)
V_{DC}	Voltaje transformado en corriente continua	Voltios (V)
V_d	Caída de voltaje de diodo rectificador	Voltios (V)
$P_{neta,carga}$	Potencia neta	Watts (W)
η_{rect}	Eficiencia del rectificador	Adimensional
η_{MT3608}	Eficiencia del módulo del <i>Step Up</i>	Adimensional
η_{TP4056}	Eficiencia del módulo de carga	Adimensional
$E_{generada,diario}$	Energía generada al día	Watts-hora/día (Wh/día)
t	Tiempo de uso	Horas (h)
E_{bat}	Energía de la batería	Watts por hora (Wh)
$V_{nominal}$	Voltaje nominal de la batería	Voltios (V)
T_{carga}	Tiempo de carga	Horas (h)
$E_{consumo,diario}$	Energía consumida al día	Watts-hora/día (Wh/día)
E_{activo}	Energía consumida activamente	Watts por hora (Wh)
E_{sleep}	Energía consumida en modo <i>sleep</i>	Watts por hora (Wh)
t_{activo}	Tiempo que funciona activamente	Horas (h)
$t_{inactivo}$	Tiempo que funciona en modo <i>sleep</i>	Horas (h)
g	Gravedad	Metros/Segundo (m/s)
H_s	Altura de la Ola	Metros (m)
U_L	Velocidad del Viento	Metros/Segundo (m/s)

F	Distancia continua que el viento sopla sobre el agua	Metros (m)
ρ_{Agua}	Densidad del agua dulce	kg/m^3
P_{Olas}	Potencial undimotriz	Watts por metro (W/m)
Te	Periodo de Energía	Segundos (S)
$\rho_{x,y}$	Coefficiente de correlación de Pearson	Adimensional
x_i y y_i	Valores de variables	-
\bar{x} y \bar{y}	Medias muestrales de las Variables	-
n	Número de observaciones	Adimensional
M_t	Valor suavizado en el tiempo	Adimensional
$y_t + j$	Valores de la serie original	-
N	Tamaño de la Ventana	Adimensional

Nota. Esta Tabla muestra todos los símbolos utilizados en la metodología, así como su descripción y su unidad de medida.

2.6.1. O.E.1. Definir Requerimientos del Prototipo.

1. Definir y validar el conjunto de requerimientos para el Prototipo propuesto.

Para cumplir con el objetivo general del proyecto, se establecieron los siguientes requerimientos de diseño, mismos que sirvieron como base para la selección de componentes y la arquitectura del sistema. Estos se clasificaron en: Requerimientos Funcionales, Requerimientos No Funcionales y Requerimientos Operacionales.

Requerimientos Funcionales (RF): Definieron las tareas específicas que el sistema ejecutó. Se estableció que el prototipo debe:

- Convertir la energía cinética del oleaje (energía undimotriz) en energía eléctrica.
- Medir la concentración de Sólidos Totales Disueltos (TDS) en el agua de la laguna.
- Medir la Temperatura del agua dentro de la laguna.

- Transmitir los datos medidos de forma inalámbrica a una estación base a orillas de la laguna.
- Permitir la visualización gráfica de los datos recopilados en una plataforma en la nube.

Requerimientos No Funcionales (RNF): Definieron las propiedades, atributos y restricciones del sistema. Se estableció que el prototipo debe:

- Ser de **bajo costo**, utilizando componentes comerciales y manufactura accesible como lo es la impresión 3D para asegurar la viabilidad económica del proyecto y su potencial replicabilidad.
- Garantizar la hermeticidad del exterior o carcasa de la boya, protegiendo los componentes electrónicos internos de la infiltración de agua.
- Asegurar la flotabilidad y estabilidad hidrodinámica de la boya en las condiciones de oleaje de la laguna.
- Operar con autonomía energética, donde la energía generada debe ser igual o superior a la energía consumida por el sistema.

Requerimientos Operacionales (RO): Definieron el entorno y las condiciones bajo las cuales el prototipo debe operar.

- El prototipo debe ser capaz de operar de forma continua bajo las condiciones ambientales específicas de la Laguna de Burlan (viento, oleaje de bajo *fetch*).

Para tener una mejor organización de los requerimientos del prototipo se ha creó una tabla que facilitó la visualización de los requerimientos nombrados anteriormente:

Tabla 2

Requerimientos del Prototipo

Requerimientos Funcionales (RF)	Categoría	Requerimiento	Métrica de Validación
RF-01	Generación	El prototipo debe ser capaz de convertir la energía cinética del oleaje (movimiento undimotriz) en energía eléctrica.	Medición de Voltaje (V) y Potencia (W) en la salida del generador.
RF-02	Medición	El prototipo debe ser capaz de medir la concentración de Sólidos Totales Disueltos (TDS) en el agua.	Obtención de lecturas en ppm.
RF-03	Medición	El prototipo debe ser capaz de medir la Temperatura del agua.	Obtención de lecturas en °C.
RF-04	Telemetría	El prototipo debe transmitir los datos de los sensores de forma inalámbrica a una estación base remota.	Recepción de paquetes de datos en la estación base.
RF-05	Plataforma	Los datos recibidos deben ser visualizados en una plataforma de Internet en la nube.	Visualización de gráficas en ThingSpeak.
Requerimientos No Funcionales (RNF)	Categoría	Requerimiento	Métrica de Validación
RNF-01	Costo	El prototipo debe ser construido utilizando componentes de bajo costo y técnicas de manufactura accesibles (Impresión 3D).	Costo de materiales dentro del presupuesto del proyecto y disponibilidad de los autores.
RNF-02	Hermeticidad	La carcasa de la boya debe proteger los componentes electrónicos de la filtración de agua hacia su interior.	Inspección visual post-prueba (ausencia de humedad dentro de la boya).

RNF-03	Hidrodinámica	Garantizar la flotabilidad y estabilidad hidrodinámica.	1. Análisis de estabilidad y flotabilidad mediante simulación CFD (Ansys). 2. Validación experimental en campo.
RNF-04	Autonomía	El prototipo debe ser energéticamente autosuficiente, es decir, la energía generada debe ser igual o superior a la energía consumida.	Balance energético diario debe ser mayor o igual (\geq) a 0 Wh/día.
Requerimientos Operacionales (RO)	Categoría	Requerimiento	Métrica de Validación
RO-01	Entorno	El prototipo debe operar bajo las condiciones ambientales de la Laguna de Burlan (viento, oleaje de bajo <i>fetch</i>).	Funcionamiento continuo durante las pruebas de campo.

Nota. Esta Tabla muestra todos los requerimientos descritos y están organizados correctamente para su fácil comprensión.

2.6.2. O.E.2. Diseñar la electrónica para mediciones, telemetría, sistema electromagnético para la generación de energía.

2. Establecer una referencia del potencial undimotriz presente en la Laguna de Burlan.

Una de las fases fundamentales del proyecto, consistió en cuantificar el recurso energético primario en la Laguna de Burlan, con la finalidad de obtener un potencial energético de referencia.

El primer paso de la inspección fue determinar los parámetros geográficos de la Laguna, con el objetivo de decidir las mejores condiciones para calcular el potencial undimotriz. El factor más crítico que se definió en el cuerpo de agua fue el *Fetch* (F), que se define como la distancia continua sobre la cual el viento sopla sobre la superficie del agua. Simultáneamente, se usó un anemómetro como instrumento de medición para

registrar series temporales de la velocidad del viento (U), ya que es la fuente de energía que se transfiere el agua para generar las olas.

Modelamiento Teórico:

Los datos de velocidad del viento (U) y el valor del *Fetch* (F) sirvieron como variables de entrada para el modelo teórico. Este modelo se fundamenta en el uso de grupos adimensionales para establecer una relación entre la energía del viento y la energía resultante de la Ola (Elkhrachy et al., 2023).

- **Grupo de Energía de la Ola** $\left(g \cdot \frac{H_s}{U_L^2}\right)$: Relaciona la energía potencial de la ola, que es proporcional a su altura significativa, con la energía cinética del viento.
- **Grupo de *Fetch* Adimensional** $\left(g \cdot \frac{F}{U_L^2}\right)$: Vincula de la distancia del *Fetch* con la energía del viento.

La relación de proporcionalidad entre estos grupos se define como:

$$g \cdot \frac{H_s}{U_L^2} = C * \left(g \cdot \frac{F}{U_L^2}\right)^{0.5} \quad \text{--- [1]}$$

Para los fines de este estudio, el interés principal fue determinar la altura de la ola a partir de las mediciones de viento. Por lo tanto, se despejó la Altura significativa de la Ola de la ecuación, obteniendo la fórmula final utilizada para el cálculo del potencial referencial:

$$H_s = \left(\frac{U_L^2}{g}\right) * C * \left(g \cdot \frac{F}{U_L^2}\right)^{0.5} \quad \text{--- [2]}$$

Donde:

- H_s : Altura de la Ola.
- U_L^2 : La velocidad del viento en la Laguna Elevado al cuadrado.
- g : gravedad de 9.81 m/s
- F : Distancia continua que el viento sopla sobre el agua (Valor de 900 m)

- 0.0016: Constante de proporcionalidad empírica.

Así mismo también se determinó el potencial undimotriz disponible en las olas por la unidad de longitud obtenido en la anterior formula:

$$P_{Olas} = \left(\frac{\rho g^2}{64\pi} \right) H_s^2 T_e \text{ --- [3]}$$

Donde:

- P_{Olas} : Es el flujo de energía de las olas, conocido como potencia de las olas (W/m)
- ρ : Densidad del agua dulce (1000 kg/m^3)
- H_s^2 : Altura de la ola, elevado al cuadrado.
- T_e : Es el periodo de energía de la ola (Valor aprox 1.5 seg).

Fase de Inspección y Caracterización Visual.

Como primera acción que se realizó fue una inspección *in situ* de la Laguna. Este reconocimiento visual permitió comprender las condiciones específicas que rigen la generación del oleaje en el cuerpo de agua cerrado, además, el factor más crítico determinado durante esta fase se estableció un *Fetch* efectivo de 900 metros, este fue un componente directo en el cálculo de la altura y la energía de las olas generadas por el viento. Esto nos permitió establecer un lugar específico que facilitaba el estudio, que establecía el “*Fetch*” más largo y uniforme, y que tenía la menor intervención humana que pueda alterar o afectar las mediciones tomadas.

Figura 14

Puntos donde se estableció el Fetch



Nota. El Fetch se tomó desde la distancia aproximada más larga a hasta el punto establecido en el cual se realizó la medición.

Fase de Mediciones y Adquisición de Datos

Posteriormente, se procedió con la fase de mediciones empíricas, centrada especialmente en la recopilación de datos de la velocidad del viento, el cual es el principal motor energético del sistema. Se empleó el “ANEMÓMETRO SAUERMANN”, para registrar series temporales de los parámetros previamente mencionados (Aire y temperatura), generando un conjunto de datos crudos que sirvieron como entrada principal para el modelo de estimación del potencial.

Este anemómetro se ubicó a un aproximado de 2 metros en relación con la superficie de la laguna, logrando de esta manera conseguir los resultados más precisos posibles.

Figura 15

Ubicación del anemómetro durante el periodo de mediciones



(a)



(b)

Nota. En las imágenes se puede apreciar la ubicación del anemómetro y verificación de las mediciones que se estaban tomando.

Fase de Modelamiento y Procesamiento de Datos:

Para traducir los datos de viento recolectados en una estimación del potencial undimotriz, se aplicó el modelo teórico descrito anteriormente. Este modelo se basó en la relación entre el “Grupo de Energía de la Ola” y el “Grupo de Fetch adimensional”, resultando en la siguiente fórmula para el cálculo de la altura significativa de la Ola (H_s):

$$H_s = 0.0016 * \left(\frac{U_L^2}{g}\right) * \left(g * \frac{F}{U_L^2}\right)^{0.5} \text{ --- [4]}$$

La aplicación sistemática de esta fórmula a la serie de datos de viento permitió establecer una línea base cuantitativa y referencial del potencial undimotriz, permitiendo correlacionar directamente la velocidad del viento con la altura del oleaje.

A fin de obtener unos resultados con menor fluctuación de valores, también se empleó el método Running Average, el cual funciona como un filtro de los valores. Para ello se utilizó la siguiente formula:

$$M_t = \frac{1}{N} \sum_{j=-k}^k y_{t+j} \quad \text{--- [5]}$$

Donde:

- M_t : Valor suavizado en el tiempo.
- y_{t+j} : Valores de la serie original dentro de la ventana.
- N : Tamaño de la Ventana.

El coeficiente de correlación de Pearson es un parámetro que se utilizó para medir la relación lineal entre las variables de la Velocidad del Viento y el Potencial Undimotriz obtenidos previamente. Para esto se empleó lo siguiente:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{--- [6]}$$

Donde:

- $\rho_{X,Y}$: Coeficiente de correlación de Pearson.
- x_i y y_i : Valores individuales de las variables.
- \bar{x} y \bar{y} : Medias muestrales de las respectivas variables.
- n : Número de observaciones.

La exploración de datos, los cálculos de potencial energético y la generación de gráficos finales se realizaron utilizando el lenguaje de programación Python en un entorno local de Jupyter Notebook, en conjunto con las librerías científicas, incluyendo Pandas para el procesamiento de los datos de mediciones y Matplotlib/seaborn para la visualización, fueron gestionadas a través de la distribución Anaconda.

Este análisis cuantifica el potencial de la energía undimotriz en la laguna, basándose en un modelo que correlaciona la velocidad del viento con la altura del oleaje. Es importante mencionar que el alcance de este cálculo se limita al recurso de origen natural y renovable. Por consiguiente, no se consideraron las olas generadas por actividades humanas externas, como motos acuáticas, para no sobreestimar el potencial energético undimotriz.

3. Diseñar el sistema electrónico compuesto por sensores y microcontrolador.

El diseño del sistema electrónico fue un proceso de selección de componentes estratégicos para satisfacer los requerimientos del prototipo.

Para la selección de sensores y poder cumplir con los requerimientos de medición de TDS como de temperatura, se seleccionaron el módulo de medición de TDS Meter V1.0 y el sensor digital de temperatura DS18B20. Ambos componentes fueron elegidos por su fiabilidad y su capacidad de operar a bajo consumo.

Como unidad central de procesamiento, se seleccionó el microcontrolador ESP32. Esta decisión se fundamenta en su arquitectura optimizada para aplicaciones de gestión, procesamiento y análisis, esto responde a los requerimientos como lo es el de telemetría por la compatibilidad con el módulo LoRa y de bajo costo por su accesibilidad económica.

Finalmente, se esquematizó la arquitectura electrónica completa y sus interconexiones con la ayuda del software Fritzing para guiar el ensamblaje.

4. Diseñar preliminarmente la telemetría.

Para la transmisión remota de datos, se diseñó un sistema de telemetría, basado en la tecnología LoRa, este nos permitió un excelente balance entre largo alcance y bajo consumo energético, logrando de esta manera cumplir con el requerimiento de transmitir los datos de los sensores de forma inalámbrica. Se establecieron 2 nodos, un emisor, el cual se encuentra integrado en la boya, y un nodo receptor, encargado de recepcionar los datos obtenidos, y almacenarlos en un canal de la plataforma ThingSpeak. Durante la presente etapa también se realizó la programación en lenguaje Arduino IDE para cada uno de los nodos.

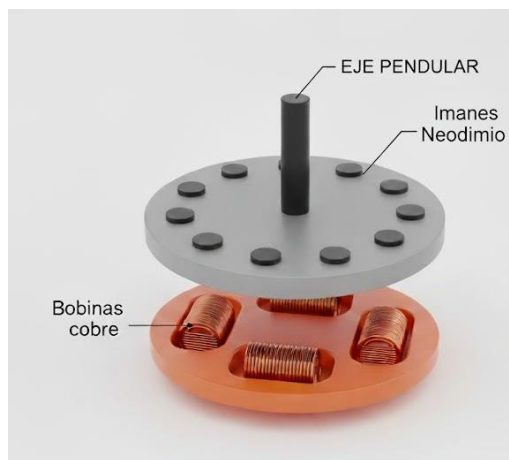
5. Diseñar el sistema de conversión, almacenamiento y consumo de Energía Eléctrica.

El diseño que se propuso para la captura de energía undimotriz y posterior conversión a energía utilizable para electrónica de la boya, fue un sistema basado en la captación de energía electromagnética, específicamente en el principio de la Ley de

Inducción Electromagnética de Faraday; esta consta de 2 partes, las cuales son: el bobinado y los imanes.

Figura 16

Diseño preliminar interno de la boya



Nota. Vista interna de los componentes que irán dentro de la boya.

En la figura 16, se puede apreciar ambas partes del diseño, en el cual, la estructura que aloja imanes realiza un movimiento pendular oscilatorio, a una altura de 0.5 cm con respecto a las bobinas, esto genera un campo electromagnético, por el cual se genera una corriente de energía alterna.

La base de los imanes va acoplada en la parte superior de la boya y detrás de este se encuentran una placa de circuito que contiene un microcontrolador ESP32 y el LoRa para la emisión de datos, mientras que la estructura que aloja a las bobinas se encuentra sujeta a la parte inferior de la boya.

Para diseñar el sistema de conversión de energía eléctrica

Para la presente actividad se fundamentó en el principio de la Ley de Inducción Electromagnética de Faraday (Sergio Ribotta; Raúl Peñaloza, n.d.). En la figura 16, se puede apreciar ambas partes del diseño, con estas podemos captar la energía eléctrica a través del movimiento pendular oscilatorio, producido por el oleaje de la laguna sobre la boya, haciendo que los imanes se muevan sobre el bobinado generando un campo electromagnético, obteniéndose corriente Alterna (AC). Esta corriente debemos

transformarla en corriente continua (DC) para poder utilizarla en la alimentación de la electrónica, es por ello que se usó un puente rectificador para su conversión, conectándole después un capacitor que ayuda a la entrega de voltaje. El voltaje que se obtuvo fue mínimo, así que se utilizó un Step Up que ayudo a elevar dicho voltaje, esto con el fin de poder hacer funcionar el módulo de carga de la batería que se le acopló, mismo que requiere una entrada específica de voltaje para su funcionamiento.

Para calcular el voltaje que es capaz de producir el circuito en funcionamiento, se aplicó el Principio de voltajes en serie (Floyd, 2007):

$$V_{AC,generado} = N_{total} \cdot V_{ind,promedio} \text{ --- [7]}$$

Donde:

- $V_{ACgenerado}$ = Voltaje generado en voltios (V).
- N_{Total} = Número de bobinas.
- $V_{ind,promedio}$ = Voltaje promedio inducido en voltios (V).

Seguidamente también se hallará la resistencia producida por el conductor, que en este caso se utilizó alambre esmaltado de cobre, entonces aplicando la ley de la resistencia eléctrica (Floyd, 2007):

$$R_{total} = N_{total} \cdot R_{conductor}$$

$$R_{total} = N_{total} \cdot \left(\rho \frac{L}{A_{conductor}} \right) \text{ --- [8]}$$

Donde:

- R_{total} = Resistencia total en ohmios [Ω].
- ρ = Resistividad del cobre ($1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)
- L = Longitud total del alambre por bobina en metros (m)
- $A_{conductor}$ = Área de la sección transversal del cable (0.5 mm es $1.963 \times 10^{-7} m^2$)

Una vez calculado el voltaje y resistencia, ya se puede hallar la potencia eléctrica que es capaz de producir la parte de inducción electromagnética. De acuerdo a la Ley de Potencia de Joule (Floyd, 2007):

$$P_{generada} = \frac{(V_{AC,generado})^2}{R_{total}} \text{ --- [9]}$$

Donde:

- $P_{generada}$ = Potencia generada en Watts (W)
- $V_{AC,generado}$ = Voltaje generado en voltios (V).
- R_{total} = en ohmios (Ω).

También hay que recordar que hay una caída de voltaje cuando pasa del bobinado al puente rectificador, aproximadamente 0.6 voltios según ficha técnica entonces:

$$V_{DC} = V_{AC,generado} - V_d \text{ --- [10]}$$

Donde:

- V_{DC} = voltaje transformado (V)
- $V_{AC,generado}$ = Voltaje generado (V)
- V_d = Caída de voltaje del diodo rectificador (0.6 V según ficha técnica)

Con la potencia generada, se pudo hallar la potencia incidente de la ola. Esta es la cantidad de potencia de la ola que golpea contra la boya, entonces multiplicando la potencia de la ola por el ancho de la boya diseñada, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$P_{incidente} = P_{ola} \cdot \text{Ancho de Boya} \text{ --- [11]}$$

Donde:

- $P_{incidente}$ = Es la potencia que logra capturar la boya, en Watts (W).
- P_{ola} = potencia disponible en el agua en watts por metro (W/m).
- Ancho de Boya = en metros (m).

Para el almacenamiento de energía del sistema

El objetivo fue calcular la energía diaria neta que realmente llega a la batería, descontando todas las pérdidas, por ello que se determinó la potencia neta de carga. Esta es la potencia generada que se pierde en el rectificador, el step up 1 y el módulo de carga (TP4056). Para ello se aplicó el principio de conservación de la energía, donde la potencia generada se multiplica por la eficiencia de cada componente que se han conectado consecutivamente, proporcionándonos así la potencia final que llega a la batería.

$$P_{neta,carga} = P_{generada} \cdot \eta_{rect} \cdot \eta_{MT3608} \cdot \eta_{TP4056} \text{ --- [12]}$$

Donde:

- $P_{neta,carga}$ = En Watts (W).
- η_{rect} = Eficiencia del rectificador (0.90).
- η_{MT3608} = Eficiencia del Step Up (0.90).
- η_{TP4056} = Eficiencia del módulo de carga (0.90).

Ahora se procedió a determinar la energía generada diariamente, midiendo la potencia neta multiplicada por el tiempo que se usa:

$$E_{generada,diaria} = P_{neta,carga} \cdot t \text{ --- [13]}$$

Donde:

- $E_{generada;diario}$ = En Watts-hora por día [Wh/día]
- $P_{neta,carga}$ = Potencia en watts [W]

Para el consumo de energía

Se acopló a la salida del módulo de carga otro step up (*Step Up 2*) y seguido un conector tipo USB-C, esto para que la batería entregue 5 voltios estables necesarios para la alimentación del microcontrolador ESP32-S3.

Se determinó primero la energía total de la batería que, según la definición de la capacidad energética, la energía total almacenada en una batería se obtiene multiplicando

su capacidad nominal en Amperio – hora (Ah) por su voltaje nominal (V), entonces la fórmula que se aplicó fue la siguiente:

$$E_{bat} = Cap. batería \cdot V_{nominal} \text{ --- [14]}$$

Donde:

- E_{bat} = Energía de la batería en watts por hora (Wh).
- $Cap. de batería$ = En amperios por hora (Ah).
- $V_{nominal}$ = Voltaje que entrega la batería en voltios (V)

Con el siguiente apartado se pudo determinar en cuanto tiempo se demoró la batería en recargarse, si esta estuviese descargada completamente, basta con dividir la energía de la batería entre la potencia neta de carga (Floyd, 2007).

$$T_{carga} = \frac{E_{bat}}{P_{neta,carga}} \text{ --- [15]}$$

Donde:

- T_{carga} = Tiempo que demora para recargarse, en horas (h).
- E_{bat} = Energía de la batería en watts por hora (Wh)

Para determinar cuánto es el consumo diario del sistema de sensores y electrónica en general, se basó en el consumo de la batería cuando el microcontrolador ESP32 permanece activo para la toma de datos. Aplicando la ley de potencia y eficiencia donde se obtuvo como resultados que la Energía consumida diariamente:

$$E_{consumo,diario} = E_{activo} + E_{sleep}$$

$$E_{consumo,diario} = t_{activo} \cdot \left(\frac{P_{activo}}{\eta_{Step Up 2}} \right) + t_{inactivo} \cdot P_{sleep}$$

$$E_{consumo,diario} = t_{activo} \cdot \left(\frac{V_{ESP32} \cdot I_{activo}}{\eta_{Step Up 2}} \right) + t_{inactivo} \cdot P_{sleep} \text{ --- [16]}$$

Donde:

- $E_{consumo,diario}$ = Energía consumida en watts-hora por día (Wh/día).
- V_{ESP32} = Voltaje en funcionamiento del ESP32.
- I_{activo} = Corriente de consumo de todos los artefactos conectados, incluido del ESP32.
- $\eta_{step\ Up\ 2}$ = La eficiencia del segundo step Up que estabiliza la entrada de voltaje (0.90).
- t_{activo} = El tiempo que permanece activo el ESP32 en horas (h).
- $t_{inactivo}$ = El tiempo que permanece inactivo el ESP32 en horas (h).
- P_{sleep} = Potencia que genera el ESP32 cuando no inactivo (Wh).

Con estos valores de generación y consumo es que se obtuvieron finalmente un balance energético por día, es por ello que de acuerdo al Principio de la viabilidad energética se compara las fuentes de energía con los sumideros de energía. Un resultado positivo implica autosuficiencia a largo plazo; un resultado negativo implica déficit energético. Para encontrar el balance que hay entre la energía que se genera diariamente respecto al consumo del mismo se aplicó la siguiente ecuación (Floyd, 2007).

$$Balance = E_{generada,diaria} - E_{consumo,diario} \text{ --- [17]}$$

Y respecto a la Métrica de Sostenibilidad, se determina que el número de días que la reserva de energía, es decir la batería, puede sostener la demanda energética sin ninguna fuente de recarga externa. Entonces:

$$Autonomía = \frac{E_{bat}(Wh)}{E_{consumo,diario}(Wh/dia)} \text{ --- [18]}$$

2.6.3. O.E.3. Manufacturar el prototipo de la boya a escala para validar su funcionalidad y ensamble.

6. Modelar el diseño externo de la Boya Energética.

Para la estructura externa de la boya, se empleó el software de Diseño Asistido por Computadora (CAD). El diseño se enfocó en lograr una forma hidrodinámica estable, con un bajo estructura rígida y reforzada. El modelo buscó un encapsulado hermético y modular, incluyendo uniones roscadas para el ensamblaje y dos puntos de acceso estratégicos.

7. Desarrollar la estructura del prototipo.

La manufactura del diseño se llevó a cabo mediante manufactura aditiva, se fabricó una estructura con un mayor espesor de pared y porcentaje de relleno en la parte inferior utilizando impresión 3D. El desarrollo culminó con el ensamble de las piezas impresas, utilizando las uniones roscadas previamente diseñada.

2.6.4. O.E.4. Evaluar el prototipo en laboratorio y en la Laguna de Burlan.

8. Pruebas del prototipo en laboratorio y Laguna de Burlan.

La fase de validación se dividió en dos etapas. Primero, se realizaron pruebas en un entorno de laboratorio controlado para verificar la correcta operación de toda la electrónica, la comunicación LoRa, la flotabilidad del prototipo y la estanqueidad del ensamblaje. Posteriormente, el prototipo funcional fue desplegado en la Laguna de Burlan para su prueba en condiciones reales. Durante esta fase se evaluó su rendimiento integral, confirmando su capacidad para generar energía, medir los parámetros del agua y transmitir los datos de forma autónoma y continua.

2.7. Técnicas, procedimiento y materiales para la recolección de datos

2.7.1. Técnicas

Para estimar el potencial undimotriz de referencia en la laguna de Burlan, se realizó una medición directa en dirección a la velocidad del viento, algo fundamental para caracterizar el recurso eólico directamente relacionado al recurso undimotriz. En

conjunto con las mediciones realizadas de las velocidades del viento, se realizó una estimación geográfica remota del cuerpo de la laguna, determinando el *fetch*.

En el apartado eléctrico, se hizo uso del multímetro digital, realizando una medición directa de las variables eléctricas (voltaje y corriente) para la validación funcional y cuantificación de la energía generada por el prototipo.

La impresión 3D se realizó en la máquina K1 Max, siguiendo la técnica de fabricación aditiva.

2.7.2. Procedimiento

Se realizaron mediciones de la velocidad del viento directamente en la laguna y conscientes de la variabilidad del recurso, es que se estableció un muestreo variable. Las mediciones se ejecutaron durante un periodo de 4 días; en cada día se registró la velocidad del viento durante aproximadamente 8 horas permitiendo así obtener un perfil representativo de las condiciones del viento.

Se utilizó la herramienta de medición de distancia del Google earth para trazar la longitud lineal máxima de la laguna en la dirección predominante del viento. Esto permitió obtener una medición aproximada del *fetch*, un parámetro importante para estimar el potencial undimotriz del oleaje de la Laguna.

Para evaluar el rendimiento del prototipo undimotriz, se utilizó el multímetro, para medir la salida de energía (AC y DC). Estas mediciones se llevaron a cabo en periodos de 2 a 4 horas durante un lapso de 5 días. Este procedimiento permitió establecer los valores de generación eléctrica del prototipo en condiciones reales de operación.

2.7.3. Materiales

✓ Anemómetro Sauermann

Instrumento que permitió realizar mediciones precisas de la velocidad del aire y la temperatura, otorgado por el Laboratorio de Medición de Recursos Energéticos Renovables, Calidad y Eficiencia Eléctrica de INRER, de la Universidad Nacional de

Jaén. A continuación, se adjuntan, los datos técnicos esenciales del dispositivo para el enfoque del proyecto, ver Tabla 3.

Figura 17

Anemómetro Sauermann



Nota. Fotografía del Anemómetro junto con el aplicativo con el que trabaja para la toma y almacenamiento de datos

Tabla 3

Datos técnicos del Anemómetro

ANEMÓMETRO SAUERMANN	
<i>Rango de Medición (Velocidad del Aire)</i>	0.15 a 30 m/s
<i>Precisión</i>	+- 3% de la lectura +-0.05 m/s
<i>Resolución</i>	0.01 m/s (de 0.15 a 3 m/s), 0.1 m/s (rangos mayores).

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

✓ **Multímetro digital**

Este instrumento fue de suma importancia, puesto que ayudó con las mediciones que se tomaron a lo largo de la ejecución del proyecto, específicamente en la electrónica; los valores que se obtuvieron usando el multímetro son voltaje, corriente

y continuidad. En la siguiente tabla (Tabla 4) se muestra la ficha técnica del dispositivo utilizado.

Figura 18

Multímetro digital



Nota. Se puede apreciar el modelo del multímetro que se utilizó en el siguiente proyecto.

Tabla 4

Multímetro digital

MULTIMETRO DIGITAL	
<i>Marca</i>	SUNSHINE
<i>Modelo</i>	DT-17N
<i>Dimensiones</i>	184*90*46 cm
<i>Peso</i>	320 g.
<i>Voltaje de multímetro digital automático</i>	9V
<i>Rango de medición de tensión</i>	AC700V/DC1000V
<i>Rango de medición de resistencia</i>	6000-60MO
<i>Rango de medición de capacitancia</i>	60nF-6000uF
<i>Ambiente de trabajo</i>	(0-40)°C

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

✓ Impresora 3D

La impresora 3D fue clave en este proyecto ya que con esta se lograron imprimir en 3 dimensiones las piezas previamente diseñadas del prototipo de boya. A continuación, se muestra la ficha técnica de la impresora 3D, ver Tabla 5.

Figura 19

Impresora 3D



Nota. Se puede apreciar la impresora 3D donde se imprimieron las piezas del prototipo.

Tabla 5

Impresora 3D Creality

IMPRESORA 3D	
<i>Marca</i>	CREALITY
<i>Modelo</i>	K1 MAX
<i>Área de trabajo</i>	300x300x300 mm.
<i>Ancho</i>	46.2 cm
<i>Alto</i>	52.6 cm
<i>Peso</i>	18 kg.
<i>Tecnología de impresión</i>	FDM
<i>Número de boquillas</i>	1
<i>Compatibilidad de material</i>	Filamento ABS, PLA, PETG, TPU, PA, ASA, PC, PLA-CF, PA-CF, PET-CF
<i>Velocidad de impresión</i>	600 mm/s

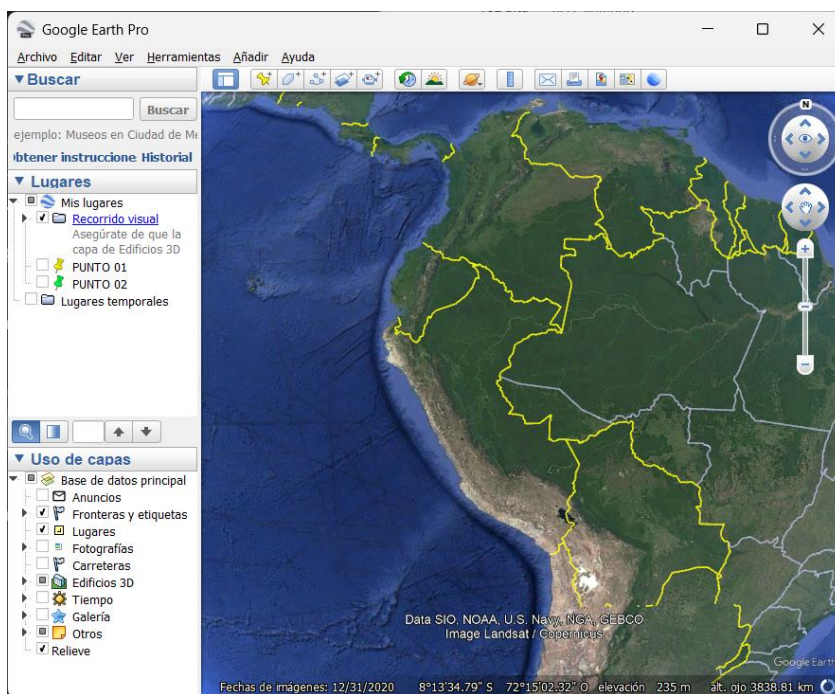
Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

✓ Google Earth

Esta aplicación permitió medir el *fetch* geográfico de la laguna de forma rápida, visual y muy precisa, lo cual fue fundamental para calcular el potencial undimotriz de la laguna. A continuación, se puede apreciar la figura de la interfaz de la aplicación.

Figura 20

Interfaz de Google Earth PRO



Nota. En la imagen se visualiza la interfaz que tiene el software de Google Earth Pro.

2.8. Análisis de datos

Organización y análisis de datos recopilados

Para poder organizar los datos que se obtuvo en el periodo de toma de datos, tanto de energía como los parámetros de calidad de agua, se empleó el software Excel.

Visualización de la información

En conjunto, se realizó la elaboración de gráficas que evidencian las variaciones de energía durante las pruebas realizadas, y en su conjunto, las variaciones de datos de los parámetros de calidad de agua.

III.RESULTADOS

Los resultados obtenidos se enfocan en cada uno de los objetivos plasmados en el proyecto, a continuación, se describen lo obtenido en cada uno de los resultados y actividades.

3.1. O.E.1. Definir requerimientos del prototipo.

3.1.1. Definir y validar el conjunto de requerimientos para el Prototipo propuesto.

Para validar el primer objetivo específico (O.E.1), se procedió a evaluar el prototipo final contra los requerimientos de diseño establecidos en la metodología (Tabla 02). La siguiente tabla resume el nivel de cumplimiento alcanzado para cada requisito.

Tabla 6

Resultados de los requerimientos del prototipo

Requerimientos Funcionales (RF)	Requerimiento	Resultado de la Validación	Cumplimiento
RF-01	Generación de Energía	El generador pendular produjo una potencia promedio de 0.181 W durante las pruebas.	Cumplido
RF-02	Medición TDS	El sensor TDS Meter V1.0 fue integrado y arrojó lecturas coherentes de ppm.	Cumplido
RF-03	Medición Temperatura	El sensor DS18B20 fue integrado y arrojó lecturas precisas de °C.	Cumplido
RF-04	Transmisión LoRa	Los datos fueron transmitidos exitosamente por el módulo Ra-02 a la estación base.	Cumplido
RF-05	Visualización en Nube	Los datos fueron recibidos y graficados correctamente en la plataforma ThingSpeak.	Cumplido
Requerimientos No Funcionales (RNF)	Requerimiento	Resultado de la Validación	Cumplimiento

RNF-01	Bajo Costo	El costo de manufactura se mantuvo bajo gracias a los componentes seleccionados y la impresión en 3D.	Cumplido
RNF-02	Hermeticidad	La carcasa impresa en 3D resistió la infiltración de agua durante las pruebas de corto plazo.	Cumplido
RNF-03	Hidrodinámica	1. La simulación CFD (Ansys) validó un centro de gravedad no muy bajo, lo que sugiere utilizar un soporte adicional. 2. Las pruebas de campo corroboraron la simulación; sugiriendo utilizar un soporte adicional ante la presencia de perturbaciones en el oleaje de la laguna de Burlan.	Cumplido
RNF-04	Autonomía Energética	El balance energético fue negativo (-5.072 Wh/día). La generación (0.528 Wh/día) solo cubrió el 9.43% de la demanda (5.6 Wh/día).	No cumplido
Requerimientos Operacionales (RO)	Requerimiento	Resultado de la Validación	Cumplimiento
RO-01	Operación en Entorno	El sistema operó según lo diseñado durante las pruebas de campo en la Laguna de Burlan.	Cumplido

Nota. En la tabla se puede apreciar si se logró con los requerimientos planteados anteriormente en la metodología.

3.2.O.E.2: Diseñar la electrónica para mediciones, telemetría, sistema electromagnético para la generación de energía.

3.2.1. Realizar la inspección, estudio visual y mediciones para establecer una referencia del posible potencial undimotriz presente en la Laguna de Burlan.

Los resultados de la presente actividad se obtuvieron mediante una herramienta computacional desarrollada en Python. Esta fue diseñada para procesar sistemáticamente la serie temporal de datos de viento, aplicando las fórmulas descritas en la metodología para cada registro y, consecuentemente, calcular la potencia de ola (W/m). Este enfoque automatizado no solo aseguró la precisión y la consistencia en el procesamiento de miles de puntos de datos, sino que también permitió una visualización clara de la dinámica del recurso, como se evidencia en el análisis gráfico resultante. Los valores de potencial undimotriz obtenidos al final fueron los siguiente:

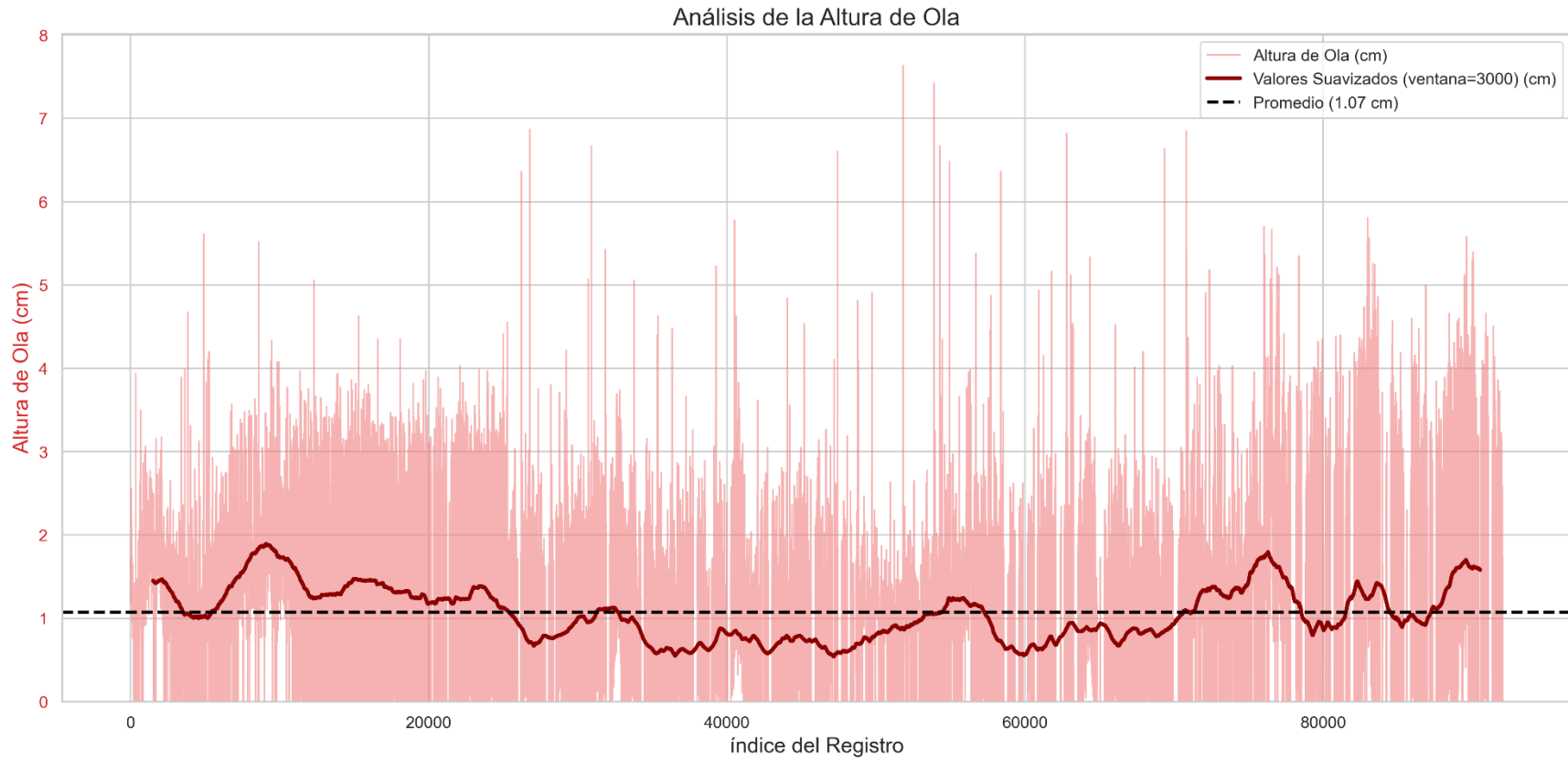
- Potencia de ola promedio: 0.16 W/m.
- Potencia de ola máxima: 4.18 W/m.

Para elaborar el gráfico de dispersión que nos permita una mejor comprensión de los valores obtenidos en la gráfica presentada (Ver Figura 22), se realizó un Runing Average, para los valores de velocidad del viento y del potencial undimotriz (Ver Figura 23 y 24), consiguiendo una gráfica que nos permite una mejor lectura de estos valores. Posteriormente, se procedió a seleccionar los valores del potencial undimotriz y velocidad del viento, para realizar el gráfico de dispersión (Ver Figura 25); simultáneamente, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (ρ), mediante la formula descrita en la metodología, y obteniéndose un Coeficiente de Correlación de Pearson de 0.9655 (96.55%), una correlación casi perfecta, debido a que el potencial undimotriz, está directamente relacionado directamente a la velocidad del viento.

En consecuencia, esta actividad logró establecer una referencia cuantitativa y una línea base del potencial undimotriz en la Laguna de Burlan, fundamentada en mediciones de campo, un modelo físico validado y un procesamiento de datos riguroso. Los resultados obtenidos son el pilar sobre el cual se desarrollan las actividades subsecuentes de diseño y evaluación del prototipo.

Figura 21

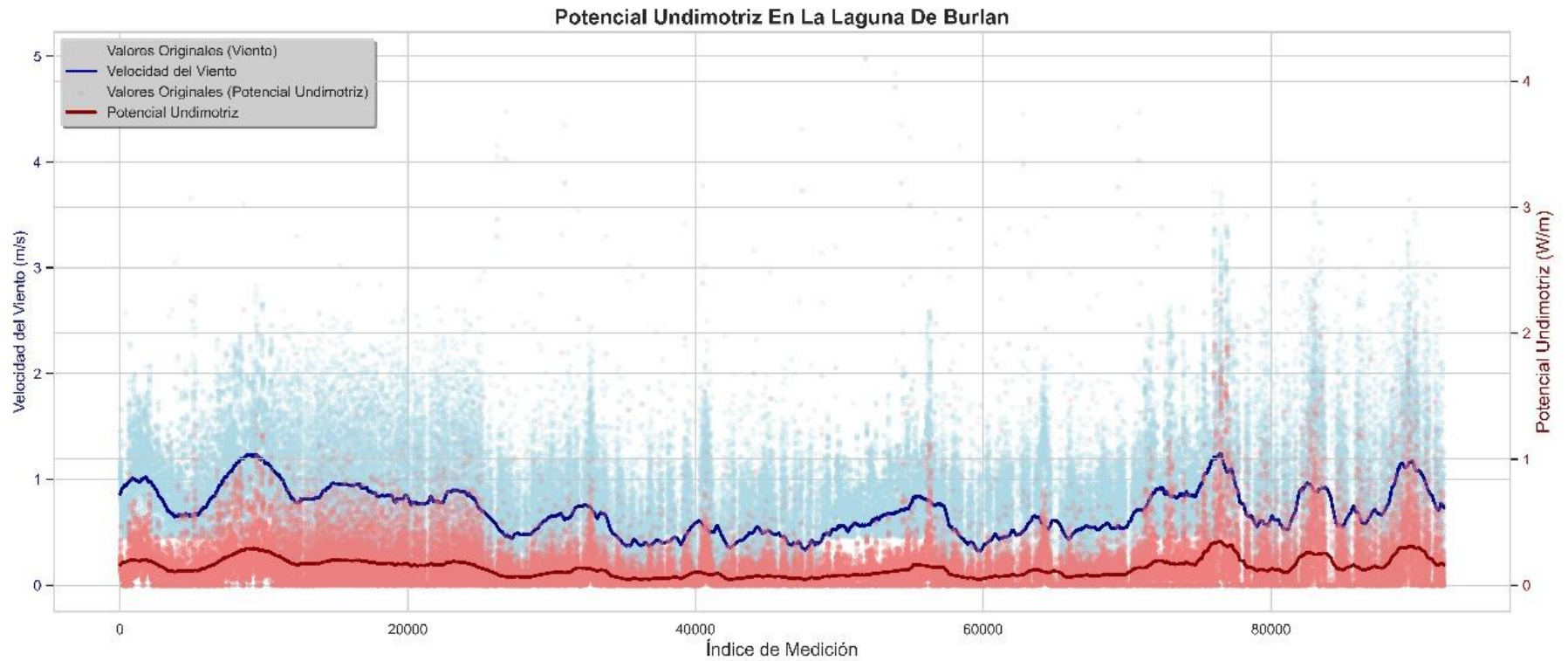
Gráfico de la altura de la ola en la laguna en relación al viento



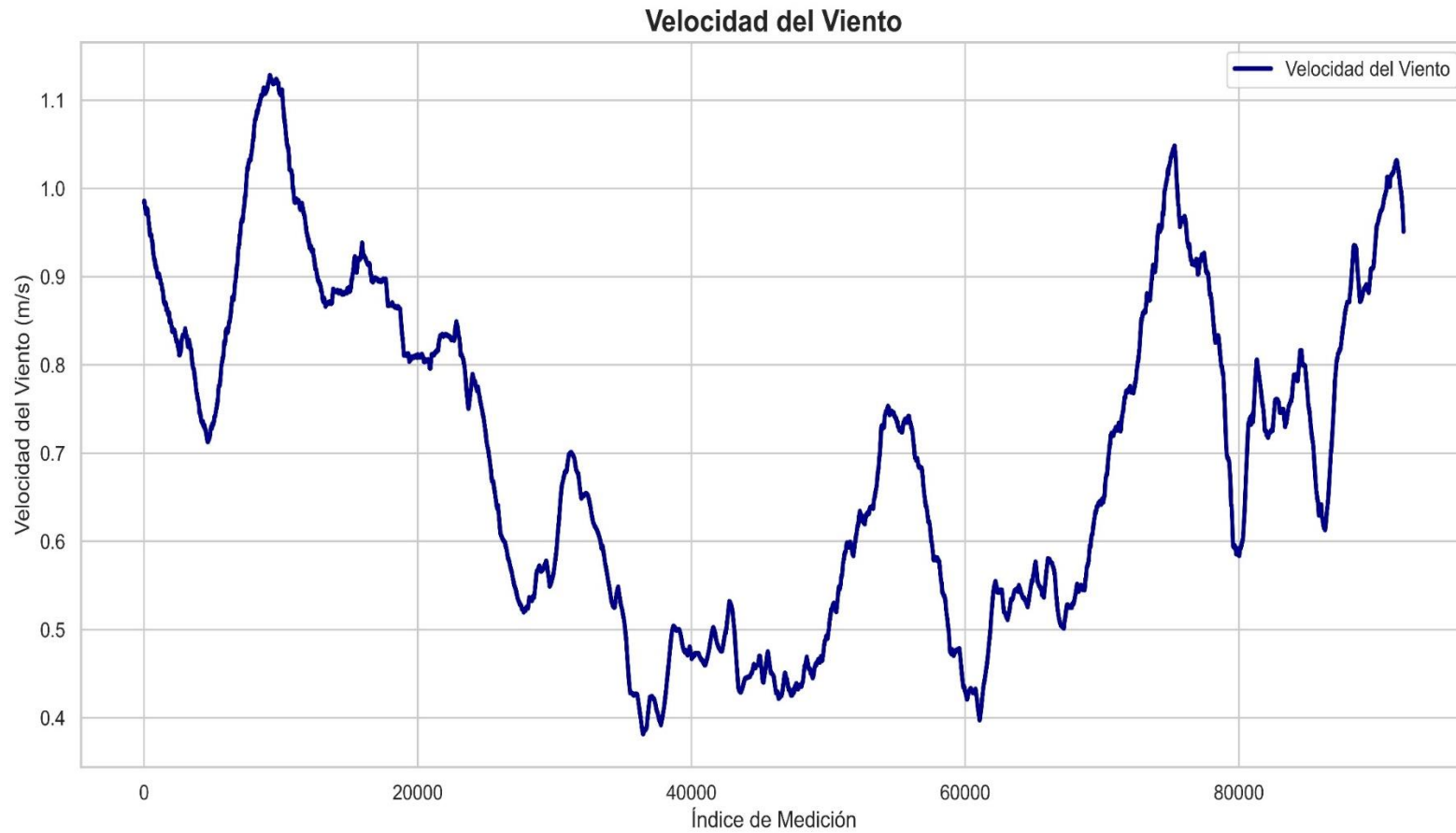
Nota. En el gráfico se puede apreciar el potencial undimotriz de la Laguna de Burlan, en relación a las mediciones de la velocidad del viento tomadas, empleando la formula anteriormente presentada.

Figura 22

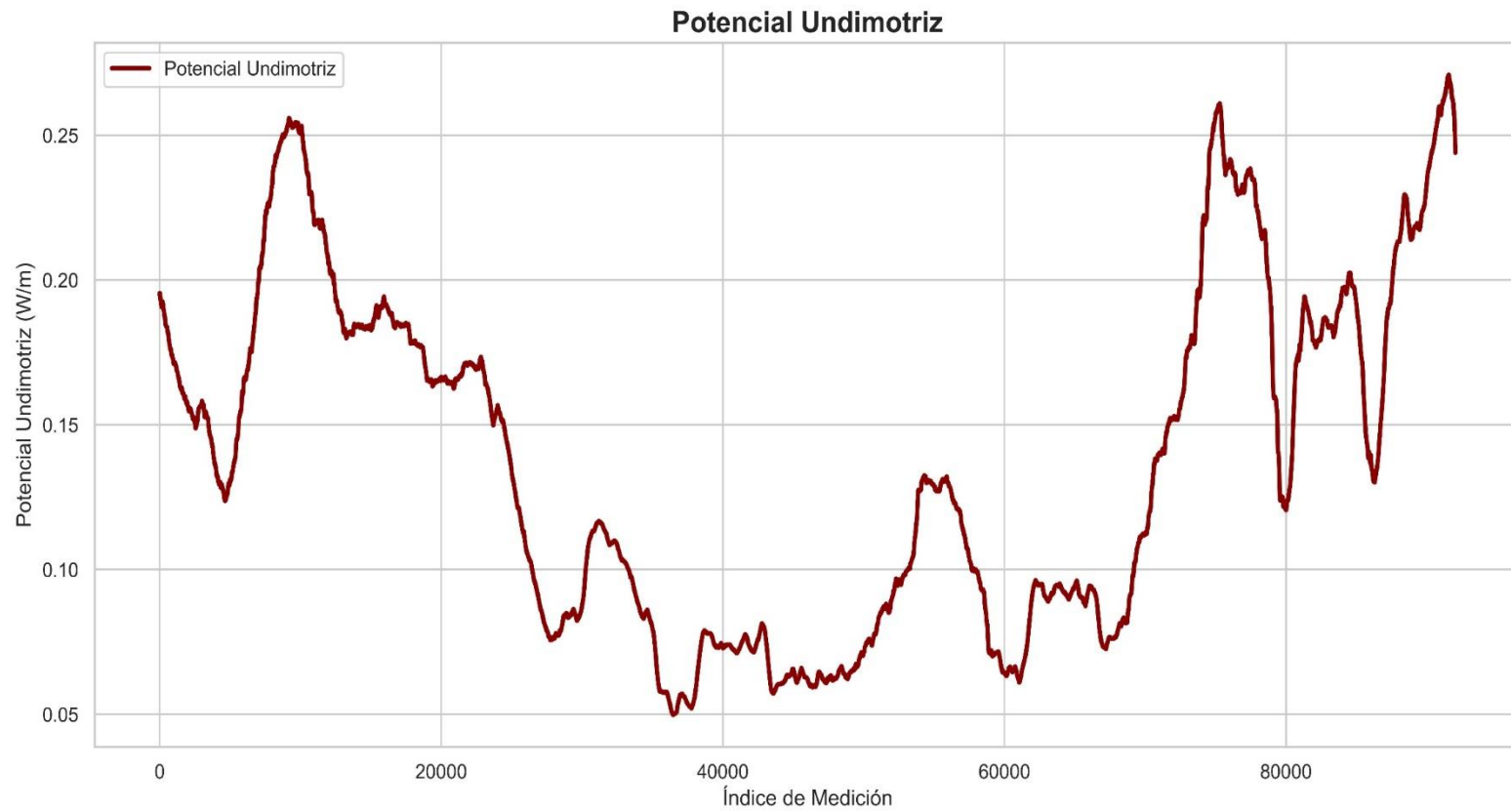
Gráfico del Potencial Undimotriz en relación al viento



Nota. En el gráfico se puede apreciar la relación del potencial energético undimotriz de la Laguna de Burlan, en relación a las mediciones del viento realizadas.

Figura 23*Velocidad del Viento*

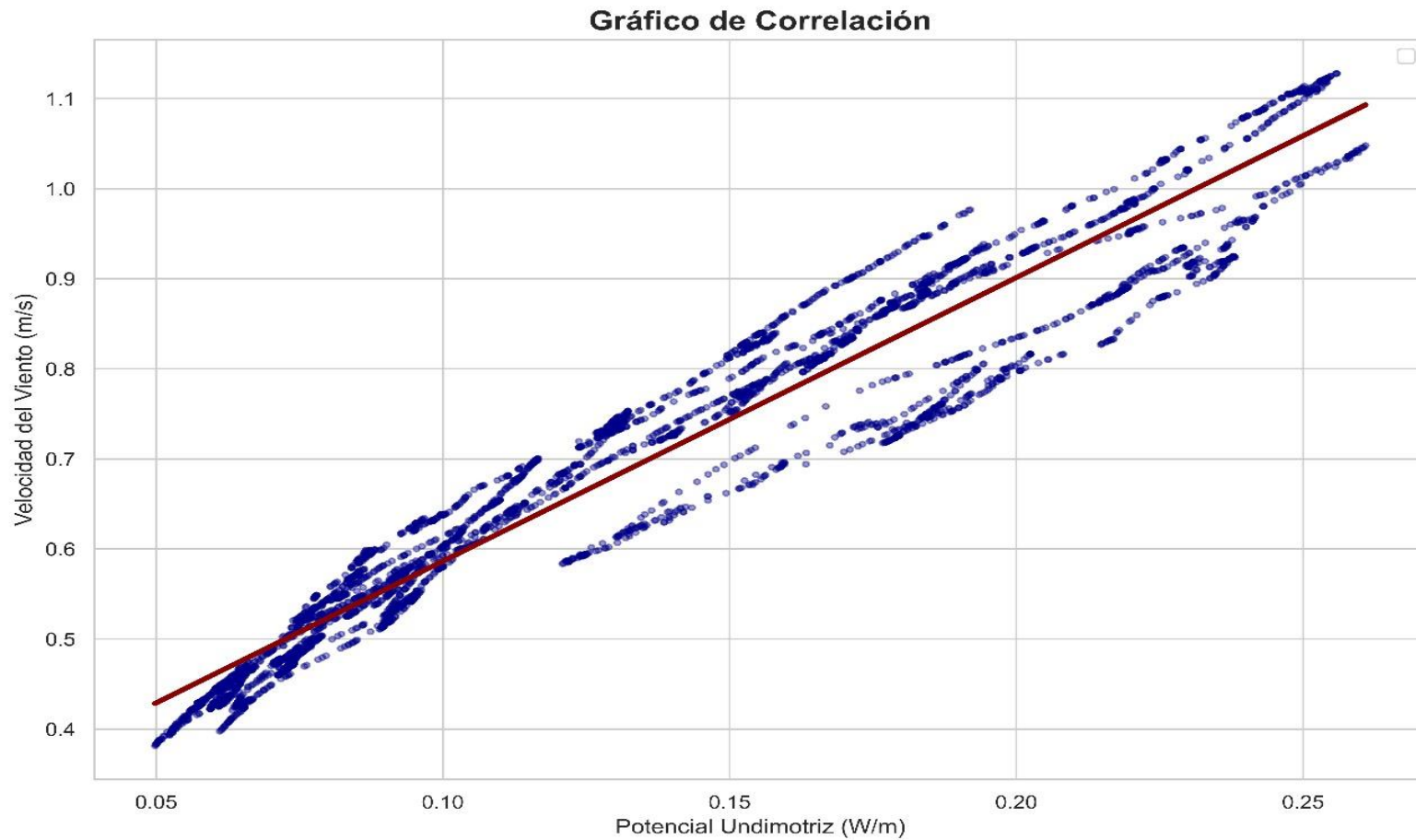
Nota. En el gráfico se puede apreciar la velocidad del viento presente en la Laguna de Burlan en metros por segundo (m/s).

Figura 24*Potencial Undimotriz*

Nota. En el gráfico se puede apreciar el potencial undimotriz presente en la Laguna de Burlan watts por metro (W/m).

Figura 25

Gráfico de correlación de la Velocidad del viento y el Potencial Undimotriz



Nota. En el gráfico se puede apreciar la correlación de la velocidad del viento y el potencial undimotriz de la Laguna de Burlan.

3.2.2. Diseñar sistema electrónico con dispositivos de medición y monitoreo de parámetros de calidad de agua que se ocupará en la implementación de la Boya Energética teniendo en cuenta su tamaño y eficacia.

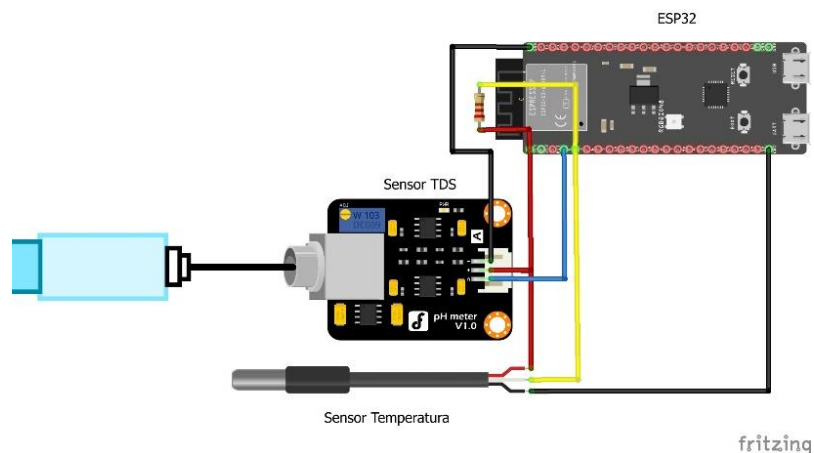
Los resultados obtenidos en esta actividad se enfocaron en la selección del cerebro electrónico de la boya, un sistema compacto y eficiente destinado a la adquisición y procesamiento de datos ambientales clave.

Selección estratégica de componentes

La selección del hardware fue una etapa crítica, guiada por los requisitos de bajo consumo energético, robustez y capacidad de procesamiento. Como unidad central de procesamiento, se seleccionó el microcontrolador ESP32-S3. Esta elección se fundamenta en sus características avanzadas, que incluyen un procesador de doble núcleo, conectividad Wi-Fi y Bluetooth integradas, y una arquitectura de bajo consumo, lo cual es indispensable para la aplicación autónoma energizada para un sistema unidimensional. Para el censado de los parámetros de calidad de agua, se seleccionó un sensor de Sólidos Totales Disueltos (TDS), para medir la concentración de sales y minerales, y un sensor de temperatura impermeable, ambos especificados en la lista de materiales.

Diseño del circuito

El diseño de la interconexión de estos componentes se realizó mediante el software de diseño electrónico Fritzing. Esta herramienta permitió esquematizar el circuito, planificar la disposición física de los componentes y optimizar las conexiones para garantizar la integridad de la señal y minimizar el espacio físico. El diseño se enfocó en la modularidad y la compactación, asegurando que el sistema electrónico pudiera ser integrado de manera eficiente dentro del encapsulado de la boya sin comprometer su flotabilidad o estructura.

Figura 26*Diagrama de conexiones del circuito*

Nota. Se seleccionaron los sensores de Temperatura y TDS.

Desarrollo de Firmware y Validación Funcional

En conjunto, se desarrolló un código de prueba para el microcontrolador ESP32-S3. El propósito de este código fue verificar la correcta operación e integración de los sensores seleccionados. El programa fue estructurado para inicializar los pines, establecer comunicación con los sensores de TDS y temperatura, y realizar lecturas cíclicas de sus valores. Estas pruebas funcionales fueron cruciales para probar los sensores y validar la fiabilidad de los datos adquiridos, confirmando que el sistema electrónico diseñado cumple con la eficacia requerida para un monitoreo ambiental preciso y confiable.

A continuación, se presenta los componentes seleccionados:

✓ **Microcontrolador ESP32-S3**

Placa de desarrollo con potente central de procesamiento, perteneciente a la familia ESP32. Este es el encargado de realizar los procesos de recolección de los parámetros de calidad de agua de ambos sensores (TDS y Temperatura), y ser enviados posteriormente mediante un módulo LoRa a un receptor. A continuación, se adjuntan los datos técnicos.

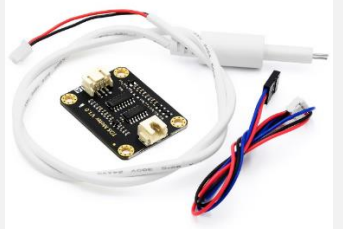
Tabla 7*Datos técnicos del Microcontrolador Emisor***Microcontrolador ESP32 – S3 (Módulo ESP32 – S3 – WROOM – 1)**

<i>Imagen</i>	
<i>Voltaje de Operación</i>	3.3V
<i>Voltaje de Alimentación</i>	5V DC
<i>Memoria SRAM</i>	512 KB
<i>Memoria ROM</i>	384 KB
<i>Memoria Flash</i>	8 MB
<i>PSRAM</i>	8 MB
<i>Pines Digitales I/O</i>	44 (GPIO programables)
<i>Pines de entrada analógica (ADC)</i>	2 * 12 bit SAR ADC (20 canales)
<i>Conectividad WiFi</i>	802.11 b/g/n (2.4 GHz)
<i>Conector USB</i>	Tipo C
<i>Dimensiones</i>	63.3mm * 25.4mm
<i>Peso</i>	15 gramos

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.✓ **Módulo de medición de TDS.**

Se empleó un medidor de Sólidos Disueltos Totales (TDS) para determinar la concentración de sales y minerales en la Laguna de Burlan. Este sensor mide la conductividad eléctrica del agua, que es directamente proporcional a la cantidad de sólidos disueltos, a continuación, se presentan los datos técnicos.

Tabla 8*Datos técnicos del módulo de medición de TDS*

SENSOR TDS METER V1.0	
<i>Imagen</i>	
<i>Voltaje de Operación</i>	3.3 V a 5.5 V.
<i>Señal de salida</i>	Analógica de 0V a 2.3V.
<i>Tipo de Sonda</i>	Sonda Analógica.
<i>Corriente de Operación</i>	3 – 6 mA
<i>Rango de medición de TDS</i>	0 – 1000 ppm
<i>Precisión de medición de TDS</i>	10% F.S. (a 25°)
<i>Número de electrodos</i>	2
<i>Dimensiones del Módulo</i>	42 mm * 32 mm

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

✓ **Sensor de Temperatura Digital Ds18B20**

Sensor que se utilizó para el monitoreo preciso de la temperatura, su cobertura de acero inoxidable, es resistente al agua y corrosión, lo que hace ideal para mediciones en inmersión directa, en la tabla siguiente se muestran algunos datos.

Tabla 9*Datos técnicos del sensor de Temperatura*

SENSOR DE TEMPERATURA DIGITAL DS18B20	
<i>Imagen</i>	
<i>Voltaje de Operación</i>	3.0 V a 5.5 V DC
<i>Rango de medición de temperatura</i>	-55°C a +125°C

<i>Precisión</i>	0.5 °C (-10°C a +85°C)
<i>Interfaz de Comunicación</i>	1 – Wire
<i>Cubierta de la sonda</i>	Acero inoxidable
<i>Peso del sensor</i>	23 gramos
<i>Dimensiones del Módulo</i>	5mm * 50mm

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

3.2.3. Diseño preliminar de telemetría para transmisión de datos.

Con el sistema de adquisición de datos culminados, se optó por el desarrollo de la siguiente actividad, la cual fue diseñar el canal de comunicación para la transmisión remota de la información recolectada. Esta actividad se enfocó en establecer un enlace de telemetría robusto y de largo alcance entre la boya energética y una estación base receptora.

Selección de la comunicación:

Con la finalidad de mantener una comunicación a larga distancia con un mínimo consumo energético, se seleccionó la tecnología LoRa. Este protocolo es ideal para aplicaciones de ThingSpeak en entornos donde la conectividad tradicional es inviable, ofreciendo un excelente balance y eficiencia energética.

Arquitectura del Sistema de Telemetría:

El sistema diseñado tiene las siguientes arquitecturas de nodos:

- **Nodo Emisor (Boya Energética):** Compuesto por el microcontrolador ESP32-S3 y un módulo transceptor LoRa, encargado de empaquetar las lecturas obtenidos mediante los sensores y transmitirlos periódicamente.

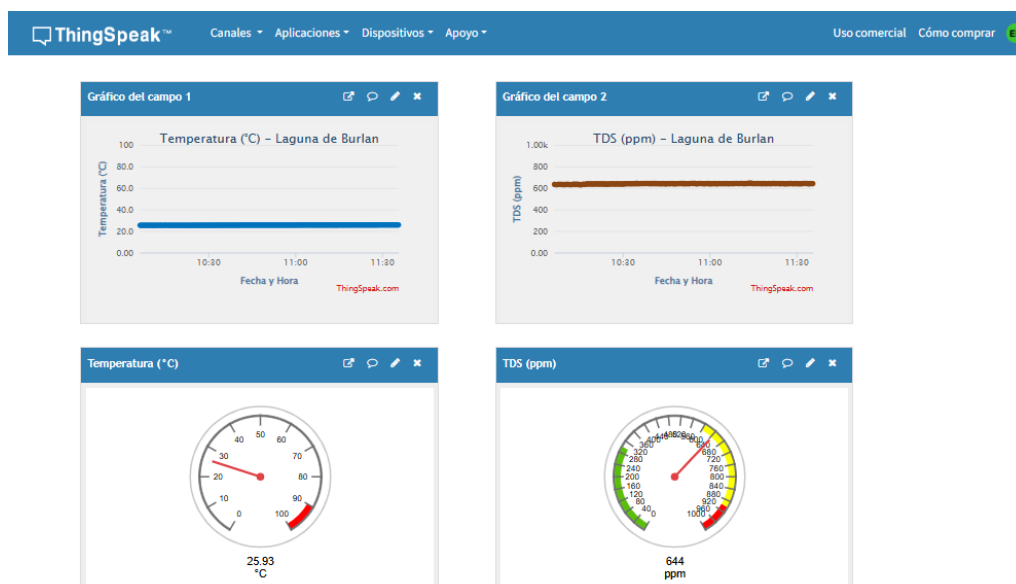
Implementación del enlace y plataforma:

La base de esta actividad fue la implementación del firmware para ambos nodos. Utilizando los códigos de programación (Anexo 4 y 5), se estableció un enlace de comunicación LoRa.

Para completar el ciclo de datos, el firmware del nodo receptor fue programado para no solo decodificar la información localmente, sino también para conectarse a una red Wi-Fi y reenviar automáticamente los datos a la nube. Para este fin, se configuró un canal en la plataforma ThingSpeak. Esto permite el monitoreo en tiempo real de la temperatura y los niveles de TDS desde cualquier ubicación con acceso a internet, además de proporcionar un registro histórico de los datos para análisis posteriores. Las pruebas funcionales validaron exitosamente todo el flujo de datos: desde la transmisión LoRa, la recepción en la estación base, y la correcta actualización de las gráficas en el canal de ThingSpeak. Este canal tiene como nombre “Monitoreo de Parámetros de Calidad de Agua - Laguna de Burlan”. Con esto, se estableció un diseño de telemetría preliminar completo y funcional, demostrando la viabilidad del sistema para monitoreo ambiental remoto, accesible y continuo.

Figura 29

Canal de Monitoreo de Parámetros de Calidad de Agua en ThingSpeak



Nota. En la imagen del canal, se pueden apreciar los canales tanto de TDS como temperatura, así como diagramas que permiten entender mejor los datos obtenidos.

Los componentes seleccionados en esta actividad fueron los siguientes:

✓ **Microcontrolador ESP32**

Tarjeta de desarrollo complementaria al sistema de telemetría, este funcionará como un receptor de los parámetros de calidad de agua enviados por el emisor. Este también pertenece a la familia ESP32. En la table se muestran datos técnicos esenciales para el proyecto.

Tabla 10

Datos técnicos del Microcontrolador Receptor


Microcontrolador ESP32 (Módulo ESP – Wroom – 32)	
<i>Imagen</i>	
<i>Voltaje de Operación</i>	3.0 V
<i>Voltaje de Alimentación</i>	5V DC
<i>Memoria SRAM</i>	520 KB
<i>Memoria Flash</i>	4 MB
<i>Pines Digitales I/O</i>	24
<i>Pines de entrada analógica (ADC)</i>	12 (12 bits de resolución)
<i>Pines de Salida Analógica (DAC)</i>	2 (8 bits de resolución)
<i>Conectividad WiFi</i>	812.11 b/g/n
<i>Dimensiones</i>	55mm * 28mm
<i>Peso</i>	9 gramos

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

✓ **Módulo Transceiver LoRa Ra-02**

Transceiver LoRa, fundamental para establecer una comunicación inalámbrica de largo alcance, integrado al LoRa Ra-02, este enlaza la comunicación entre las placas de desarrollo. En la tabla se muestran las especificaciones técnicas del módulo.

Tabla 11*Datos técnicos del Módulo LoRa*


Modulo Transceiver LoRa Ra-02	
<i>Imagen</i>	
<i>Frecuencia de Operación</i>	433 MHz (Rango: 410 – 525 MHz)
<i>Voltaje de Alimentación</i>	3.3V DC
<i>Voltaje Lógico</i>	3.3V DC
<i>Potencia de Transmisión (TX)</i>	18 dBm
<i>Sensibilidad de Recepción (RX)</i>	Hasta -141 dBm
<i>Corriente de Transmisión (TX)</i>	130 mA
<i>Corriente de Recepción (RX)</i>	130 mA
<i>Alcance Máximo</i>	Hasta 5 km (Campo abierto)
<i>Dimensiones</i>	28 * 20 mm
<i>Peso</i>	5 gramos

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

✓ **Antena 433 MHz**

Con la finalidad de optimizar el rendimiento del módulo LoRa, se utilizó una antena omnidireccional sintonizada a la frecuencia de 433 MHz. Logrando maximizar el alcance y la fiabilidad de la comunicación inalámbrica.

Tabla 12*Datos técnicos de la Antena*

ANTENA 433 MHz	
<i>Imagen</i>	
<i>Frecuencia de Operación</i>	433 MHz
<i>Longitud de la Antena</i>	87 mm
<i>Conector de la antena</i>	SMA – J (Macho)

<i>Temperatura de Operación</i>	-30°C a 85°C
<i>Peso Total</i>	11 gramos

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

3.2.4. Diseñar el sistema de conversión, almacenamiento y consumo de Energía Eléctrica.

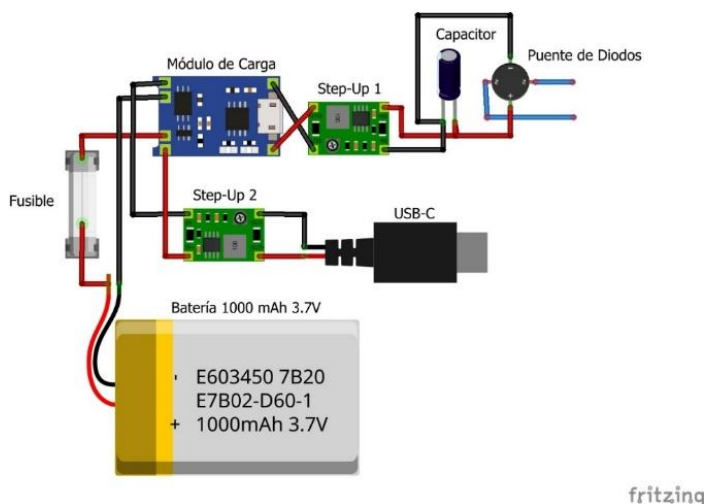
El diseño se fundamentó en el principio de inducción electromagnética de Faraday, materializado en un generador pendular de imanes.

El interior de la boya, la estructura presente en la figura 31, está compuesta por 20 imanes de Neodimio (NdFeB) dispuestos en un disco de 10 orificios donde encajan 2 imanes en cada uno, este disco está acoplado en una barra de aluminio que a su vez está encajado a un rodaje para darle mayor movilidad y por consiguiente mayor inducción. También tiene una batería de 3000 mA y 4 bobinas dispuestos también en un disco que sirve de base para las mismas, este también tiene acoplado una barra de aluminio.

Cabe resaltar que la base de las bobinas se encuentra en la parte inferior de la boya, y debajo de este los dispositivos electrónicos, como: Un puente de diodo rectificador, un capacitor, una batería, un módulo de carga para la batería, un elevador de voltaje (Step Up) y el cable de entrada USB-C.

Figura 30

Sistema electrónico de conversión y almacenamiento de energía



Nota. Elaboración propia utilizando el software Fritzing.

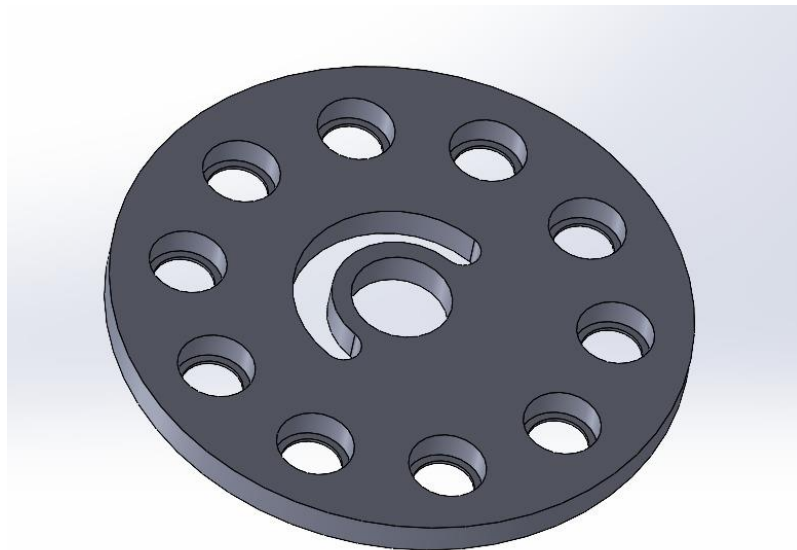
Diseño Conceptual y Principio de Operación:

El sistema se basa en una configuración de dos elementos principales: un elemento móvil y un elemento fijo.

- **Elemento móvil (Imanes):** Consiste en una base que alberga un arreglo de imanes de alta intensidad, montada en una configuración pendular. Este diseño permite que el movimiento de oscilación de la boya, inducido por las olas, se convierta directamente en un movimiento lineal y oscilatorio de los imanes.

Figura 31

Diseño del Elemento que aloja a los Imanes.

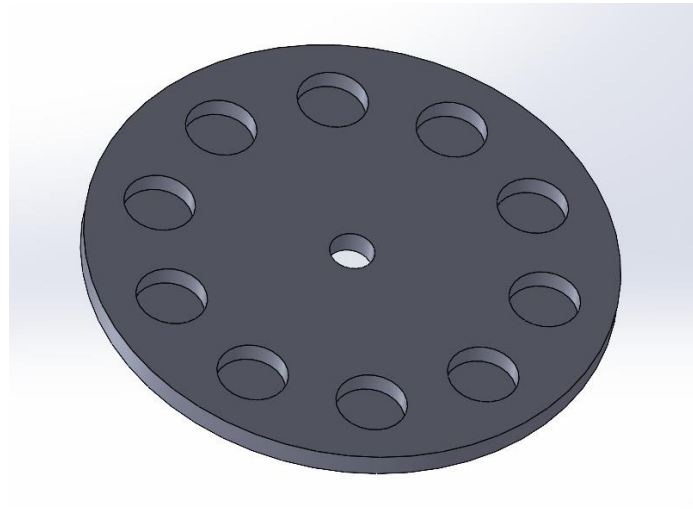


Nota. Elaboración propia. Planos CAD (Anexo 14).

- **Elemento Fijo (Bobinas):** Se compone de un conjunto de cuatro bobinas estacionarias. Cada bobina fue construida con 400 vueltas de alambre de cobre esmaltado, enrollado sobre un núcleo de material ferromagnético (hierro). La inclusión de este núcleo tiene como finalidad intensificar y concentrar las líneas de flujo magnético, maximizando así la eficiencia de la inducción.

Figura 32

Diseño del Elemento en el que se ubicará las Bobinas

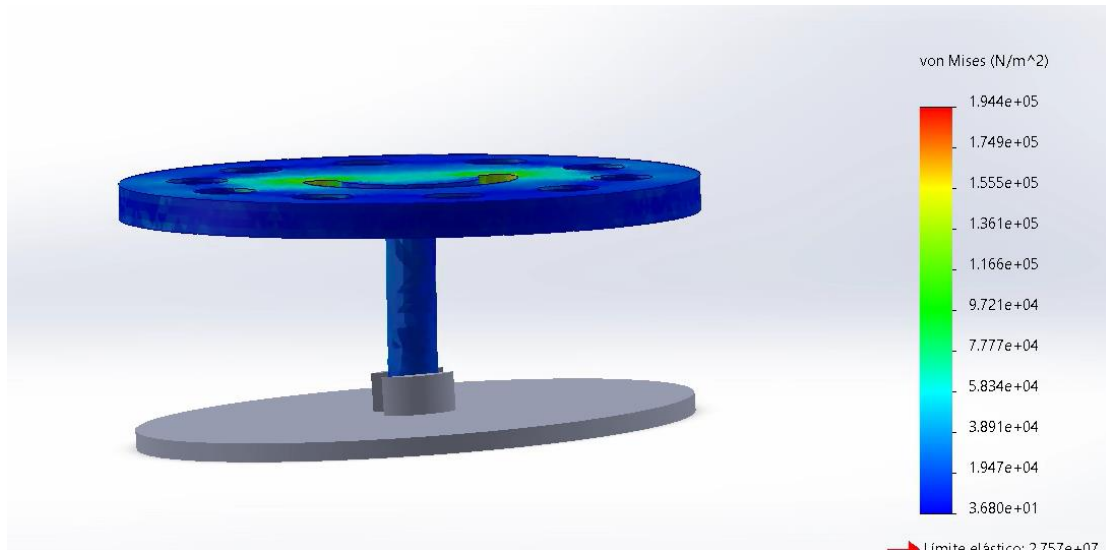


Nota. Elaboración propia. Planos CAD (Anexo 13).

Integración y Parámetros Críticos de Diseño:

La efectividad del generador depende de la interacción precisa entre los imanes y las bobinas. Los componentes fueron diseñados para mantener un entrehierro constante y optimizado de 0.5 centímetros entre la superficie de los imanes y las bobinas.

Cuando la boya es excitada por el oleaje, el péndulo oscila provocando que el campo magnético de los imanes se desplace a través del área de las bobinas. Este cambio continuo en el flujo magnético induce una fuerza electromotriz (voltaje) en los terminales de cada una de las 400 vueltas de las bobinas. La energía eléctrica generada es, por lo tanto, directamente proporcional a la velocidad y amplitud del movimiento relativo entre los imanes y el bobinado. Este diseño robusto y compacto constituya el corazón del sistema de aprovechamiento energético del prototipo.

Figura 33*Análisis pendular*

Nota. En la figura podemos apreciar los esfuerzos a las cuales se somete la pieza.

RESPECTO AL DISEÑO DE CONVERSIÓN:

- Voltaje generado ($V_{AC,generado}$).

Tenemos 4 bobinas en total y el voltaje promedio que se pudo obtener de la medición fue de 0.33 V, entonces aplicando la Ecuación [7]:

$$V_{AC,generado} = N_{total} \cdot V_{ind,pomedio}$$

$$V_{AC,generado} = 4(0.33 \text{ V})$$

$$V_{AC,generado} = 1.33 \text{ V}$$

- Resistencia Total (R_{total}).

Estamos utilizando cobre esmaltado donde por cada vuelta de bobinado hay 7 cm, con 400 vueltas da un total de 28 metros, aplicando la ecuación [8]:

$$R_{total} = 4 \left(\rho \frac{L}{A_{cobre}} \right)$$

$$R_{total} = 4 \left[(1.72 \times 10^{-8}) \left(\frac{28}{1.963 \times 10^{-7}} \right) \right]$$

$$R_{total} = 9.81 \Omega$$

- Potencia Generada ($P_{generada}$).

Aplicamos la Ecuación [9], donde:

$$P_{generada} = \frac{(V_{AC})^2}{R_{total}}$$

$$P_{generada} = \frac{(1.33)^2}{9.81}$$

$$P_{generada} = 0.181 W$$

- Pérdida por rectificación ($V_{DC,entrada}$)

Debemos tener en cuenta que para que el Step Up 1 (que va antes del módulo de carga) requiere un voltaje mínimo de entrada del 0.6 para que pueda funcionar, entonces aplicando la Ecuación [10]:

$$V_{DC,entrada} = V_{AC} - 2V_d$$

$$V_{DC,entrada} = 1.33 - 2(0.3)$$

$$V_{DC,entrada} = 0.73 V$$

- Potencia incidente de la ola ($P_{incidente}$)

El valor del potencial de la ola Máxima fue de 4.18 W/m. Entonces utilizando la ecuación [11], obtenemos que:

$$P_{incidente} = P_{ola} \cdot \text{Ancho de Boya}$$

$$P_{incidente} = 4.18 W/m (0.19 m)$$

$$P_{incidente} = 0.794 W$$

Basado en los cálculos realizados, la boya energética demostró una eficiencia total del 22.8%, al haber convertido 0.794 W de potencia de ola incidente en 0.181 W

de potencia eléctrica útil. Este resultado se encuentra dentro de los parámetros ideales de estudios de captación de energía de forma undimotriz, lo que indica un diseño realmente eficaz.

RESPECTO AL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA DEL SISTEMA:

- Potencia Neta de Carga ($P_{neta,carga}$)

La potencia neta entonces sería, aplicando la Ecuación [12]:

$$P_{neta,carga} = P_{promedio} \cdot \eta_{rect} \cdot \eta_{MT3608} \cdot \eta_{TP4056}$$

$$P_{neta,carga} = 0.181 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.9$$

$$P_{neta,carga} = 0.132 \text{ W}$$

- Energía Generada Diariamente ($E_{generada,diaria}$).

El ESP32 solo trabaja 4 horas por día, entonces, utilizando la ecuación [13]:

$$E_{generada,diaria} = P_{neta,carga} \cdot 4 \text{ h}$$

$$E_{generada,diaria} = 0.132 \text{ W} \cdot 4 \text{ h}$$

$$E_{generada,diaria} = 0.528 \text{ Wh/dia}$$

RESPECTO AL CONSUMO DE ENERGÍA DEL SISTEMA:

- Energía total de la batería (E_{bat}).

La capacidad se calcula con el voltaje nominal de la batería, es decir 3.7V, utilizamos la ecuación [14]:

$$E_{bat} = \text{Capacidad de batería} \cdot V_{nominal}$$

$$E_{bat} = 3000 \text{ mAh} \cdot 3.7 \text{ V}$$

$$E_{bat} = 11.1 \text{ Wh}$$

- Tiempo de Recarga Completa (T_{carga}).

Calculamos en cuanto tiempo se demoraría para su recarga asumiendo que la batería se encuentra completamente descargada, entonces aplicando ecuación [15]:

$$T_{carga} = \frac{E_{bat}}{P_{neta,carga}}$$

$$T_{carga} = \frac{11.1 Wh}{0.132 W} = 84 \text{ Horas}$$

- Consumo Diario Total ($E_{consumo,diario}$).

El sistema funcionara 4 horas de forma continua y 20 horas inactivas sumando en total las 24 horas, o sea, al día. Además, ESP32-S3 necesita un voltaje de alimentación de 5V por su entrada USB-C para que este y todos los sensores incorporados en el circuito funcionen, ya que dentro del ESP32-S3 trae incorporados reguladores a 3.3V que ayudan en la conexión de los sensores y modulo LoRa. El consumo de corriente es de acuerdo a los dispositivos utilizados, se menciona en la siguiente lista:

- Microcontrolador ESP32-S3: 120 mA
- Módulo LoRa (transmisión): 126 mA
- Sensor TDS Meter V1.0: 5 mA
- Sensor Temperatura DS18B20: 1 mA

La corriente de consumo total obtenida sería entonces de 252 mA o 0.252 A. Además, el consumo en modo *Sleep* no se aplicaría ya que no está dentro del código de programación, entonces utilizando la ecuación [16]:

$$E_{consumo,diario} = 4 \left(\frac{V_{ESP32} \cdot I_{activo}}{\eta_{Step Up 2}} \right) + 20 \cdot P_{sleep}$$

$$E_{consumo,diario} = 4 \left(\frac{5 V \cdot (0.252) A}{0.9} \right) + 0$$

$$E_{consumo,diario} = 5.6 Wh/día$$

- Balance Energético Diario

El balance energético se calculando utilizando la Ecuación [17]

$$Balance = E_{generada,diaria} - E_{consumo,diario}$$

$$Balance = 0.528 Wh - 5.6 Wh$$

$$Balance = -5.072 Wh$$

- Autonomía de reserva (Días)

Por último, utilizando la ecuación [18]:

$$Autonomía = \frac{E_{bat}(Wh)}{E_{consumo,diaria} \left(\frac{Wh}{día}\right)}$$

$$Autonomía = \frac{11.1 Wh}{5.6 Wh/día}$$

$$Autonomía = 1.98 días$$

Para una mejor evaluación de datos, se resumirán los datos en las siguientes tablas que ayudarán a su lectura y comparación (lo resaltado son los valores obtenidos).

Tabla 13

Energía total de la batería de litio

Voltaje nominal de la Batería	Capacidad Batería (mA)	Energía total (Wh)
3.7	1000	3.7
	1500	5.55
	2000	7.4
	2500	9.25
	3000	11.1

Tabla 14*Tiempo de recarga completa*

Voltaje Alterno (V)	Capacidad batería (mA)				
	1000	1500	2000	2500	3000
0.27	140 h	210 h	280 h	350 h	420 h
1.33	28 h	42 h	56 h	70 h	84 h
2.67	14 h	21 h	28 h	35 h	42 h
4	9 h	14 h	19 h	23 h	28 h

Tabla 15*Consumo diario total*

Minutos por día	Horas por día	Consumo diario (Wh/día)
10 min	0.17	0.24
20 min	0.33	0.47
30 min	0.50	0.70
40 min	0.67	0.93
50 min	0.83	1.17
60 min	1	1.40
120 min	2	2.80
180 min	3	4.20
240 min	4	5.60

Tabla 16*Balance energético diario*

Voltaje (V) → Horas (H) ↓	0.27	1.33	2.67	4
0.17	-0.234 Wh/día	-0.216 Wh/día	-0.193 Wh/día	-0.171 Wh/día
0.33	-0.458 Wh/día	-0.423 Wh/día	-0.379 Wh/día	-0.335 Wh/día
0.50	-0.687 Wh/día	-0.634 Wh/día	-0.568 Wh/día	-0.502 Wh/día
0.67	-0.916 Wh/día	-0.845 Wh/día	-0.757 Wh/día	-0.669 Wh/día
0.83	-1.145 Wh/día	-1.057 Wh/día	-0.947 Wh/día	-0.837 Wh/día
1	-1.374 Wh/día	-1.268 Wh/día	-1.136 Wh/día	-1.004 Wh/día
2	-2.747 Wh/día	-2.536 Wh/día	-2.272 Wh/día	-2.008 Wh/día
3	-4.121 Wh/día	-3.804 Wh/día	-3.408 Wh/día	-3.011 Wh/día
4	-5.494 Wh/día	-5.072 Wh/día	-4.544 Wh/día	-4.015 Wh/día

Tabla 17*Autonomía de reserva (días)*

Batería (mA) → Horas (H) ↓	1000	1500	2000	2500	3000
0.17	15.55	23.32	31.09	38.87	46.64
0.33	7.93	11.89	15.86	19.82	23.79
0.50	5.29	7.93	10.57	13.21	15.86
0.67	3.96	5.95	7.93	9.91	11.89
0.83	3.17	4.76	6.34	7.93	9.51
1	2.64	3.96	5.29	6.61	7.93
2	1.32	1.98	2.64	3.30	3.96
3	0.88	1.32	1.76	2.20	2.64
4	0.66	0.99	1.32	1.65	1.98

Evaluando dichas tablas, estas nos refieren que:

- El sistema opera con un déficit energético de -5.072 Wh, lo que nos da a entender que más consume de lo que genera sin ayuda de la batería.
- La energía generada de 0.528 Wh/día solo cubre el 9.43% de la demanda diaria de 5.6 Wh/día.
- El sistema solo usando la batería demorará 1.98 días en descargarse completamente.
- El tiempo de carga de la batería de 3000 mAh es de 84 Horas.


A continuación, se presentan los datos técnicos de los materiales utilizados en la presente actividad:

✓ Imanes de Neodimio

Se utilizaron imanes permanentes de alta potencia, fabricados a partir de una aleación de neodimio, hierro y boro. Estos imanes son los más potentes disponibles comercialmente y se emplearon por su fuerte campo magnético.

Tabla 18

Datos técnicos de los Imanes

Imanes de Neodimio	
<i>Imagen</i>	
<i>Material</i>	Imán de Neodimio (NdFeB)
<i>Forma</i>	Circular
<i>Diámetro</i>	20 mm
<i>Espesor</i>	5 mm
<i>Recubrimiento</i>	Níquel
<i>Magnetización</i>	Axial

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.


✓ **Cobre esmaltado**

El cobre esmaltado fue utilizado principalmente para el bobinado del circuito, ya que facilitó la captación de energía electromagnética para convertirla en energía eléctrica.

Tabla 19

Alambre de cobre esmaltado

ROLLO DE ALAMBRE DE COBRE ESMALTADO

<i>Imagen</i>	
<i>Tipo</i>	Alambre
<i>Material</i>	Cobre esmaltado
<i>Grosor</i>	0.5 mm
<i>Largo</i>	28 m

Nota. En la imagen se aprecia el rollo de cobre esmaltado.

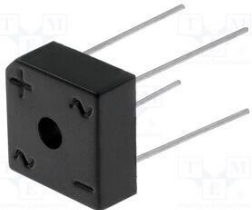
✓ **Puente de Diodos KBPC1008**

Este componente es un rectificador de onda completa, utilizado para convertir la corriente alterna (AC) en corriente continua (DC) en la etapa de la fuente de alimentación del sistema.

Tabla 20

Datos técnicos del Puente de Diodos

Puente de Diodos KBPC1008

<i>Imagen</i>	
---------------	---

<i>Tipo</i>	Puente rectificador Monofásico de silicio
<i>Voltaje Inverso Pico Repetitivo</i>	800 V
<i>Corriente Directa Promedio</i>	10 A
<i>Corriente Pico de Sobretenión</i>	200 A
<i>Caída de Voltaje Directo por Diodo</i>	0.3 V
<i>Rango de Temperatura de Operación</i>	-55 °C a +150°C
<i>Dimensiones</i>	19 x 19 mm

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.


✓ **Condensador Electrolítico de Aluminio**

Se utilizó como filtro en la fuente de alimentación para suavizar el voltaje de corriente continua después de la rectificación, asegurando una alimentación estable para los circuitos electrónicos.

Tabla 21

Datos técnicos del Condensador

Condensador Electrolítico de Aluminio


<i>Imagen</i>	
<i>Capacitancia</i>	100 microfaradios
<i>Voltaje máximo</i>	16 V
<i>Tolerancia</i>	20%
<i>Temperatura de Operación</i>	-40°C a +105°C
<i>Dimensionamiento</i>	8 x 11mm

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

✓ **Módulo Cargador TP4056**

Para cargar la batería LiPo, se empleó un módulo, este se encarga de regular la corriente y el voltaje durante el proceso de carga, protegiendo la batería contra sobrecargas y de esta manera garantizando su vida útil.

Tabla 22*Datos técnicos del Módulo Cargador*


MÓDULO CARGADOR TP4056	
<i>Imagen</i>	
<i>Voltaje de entrada</i>	4.5V a 5.5V DC
<i>Corriente de Carga</i>	1A
<i>Precisión de Carga</i>	1.5%
<i>Voltaje de Carga Completa</i>	4.2V
<i>Baterías Compatibles</i>	Litio/Li-Po (1 celda)
<i>Indicadores LED</i>	Rojo, Azul/Verde
<i>Temperatura de Operación</i>	-10°C a +85°C
<i>Dimensiones</i>	26 x 17 mm

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

✓ **Batería Lipo de 3.7 V**

Celda de Litio, encargada de alimentar el circuito de la boya (microcontrolador, sensores, transceiver), y de almacenar la energía obtenida del generador de inducción electromagnética. En la siguiente tabla se presentan los datos técnicos de la batería.

Tabla 23*Datos técnicos de la Batería.*

Batería Plana Lipo 3.7V	
<i>Imagen</i>	
<i>Tipo de Batería</i>	Batería plana de Litio (Lipo)
<i>Voltaje Nominal</i>	3.7V
<i>Capacidad</i>	3000 mAh
<i>Corriente de máxima Carga</i>	0.5C (1500 mA)
<i>Corriente de máxima descarga</i>	0.2C (600 mA)
<i>Voltaje de Corte (Descargada)</i>	2.75V
<i>Voltaje de Corte (Carga)</i>	4.2V

<i>Temperatura de Operación</i>	-10°C a +45°C
<i>Temperatura de Operación</i>	80 * 60 * 3.0 mm
<i>Peso</i>	40 gramos

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.


✓ **Convertidor DC – DC Step Up MT3608**

Se utilizó un convertidor de tipo “boost” o elevador para ajustar el voltaje de la batería a los niveles requeridos por los demás componentes del sistema. Este módulo nos permite tomar un voltaje de entrada bajo y entregar un voltaje superior estable.

Tabla 24

Datos técnicos del Step-Up

CONVERTIDOR DC – DC Step Up MT3608


<i>Imagen</i>	
<i>Voltaje de entrada</i>	2V a 24V DC
<i>Voltaje de salida</i>	5V a 28V DC
<i>Corriente de salida máxima</i>	2 A
<i>Potencia de Salida</i>	6W
<i>Eficiencia de Conversión</i>	Hasta 93%
<i>Dimensiones</i>	36 x 17 x 7 mm

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

✓ **Rodamiento NSK 6001**

Se empleó un rodamiento rígido de bolas para permitir el movimiento rotatorio con mínima fricción entre las partes móviles del sistema. Este es capaz de soportar cargas tanto radiales como axiales.

Tabla 25*Datos técnicos del Rodamiento*

Rodamiento NSK 6001-DDU C3 E	
<i>Imagen</i>	
<i>Tipo de Rodamiento</i>	De bolas
<i>Diámetro Interior</i>	12 mm
<i>Diámetro Exterior</i>	28 mm
<i>Espesor</i>	8 mm

Nota. Datos extraídos de su ficha técnica.

3.3.O.E.3: Manufacturar el prototipo de la boya a escala para validar su funcionalidad y ensamble.

3.3.1. Modelar el diseño externo de la boya energética.

El diseño externo de la boya fue una etapa en la que se buscó una relación entre la estabilidad en el agua y la protección de los componentes internos. El objetivo fue concebir una estructura que no solo albergara de forma segura el sistema de generación y la electrónica, sino que también optimizara la interacción con el oleaje de la Laguna de Burlan para maximizar la captación de energía.

Metodología de diseño y modelado

El proceso se llevó a cabo utilizando software de Diseño Asistido por Computadora (CAD). Esta herramienta permitió la creación de un modelo tridimensional preciso, facilitando la visualización, el análisis de interferencias y la planificación del ensamblaje de todos los subsistemas (electrónica, telemetría y conversión de energía) dentro de un volumen definido y compacto.

Características del diseño externo

El modelo resultando presenta una forma geométrica diseñada para responder de manera óptima al movimiento de las olas. Se priorizó un diseño con un bajo centro

de gravedad para asegurar la estabilidad estática y dinámica, minimizando el riesgo de vuelco y garantizando que el movimiento del péndulo interno sea predominante inducido por la acción de las olas.

La estructura externa fue diseñada como un encapsulado robusto y hermético (Anexo 10, Anexo 11, Anexo 12), teniendo espacios específicos para el montaje de los sensores de calidad de agua y la antena del sistema LoRa, asegurando su exposición al medio mientras se protege la integridad de la conexión.

Figura 34

Modelado completo de la Boya



Nota. En la imagen se puede apreciar el modelado completo de la boya con sus tres partes (Inferior – Superior – Antena).

Dinámica de fluidos del sistema externo en ANSYS

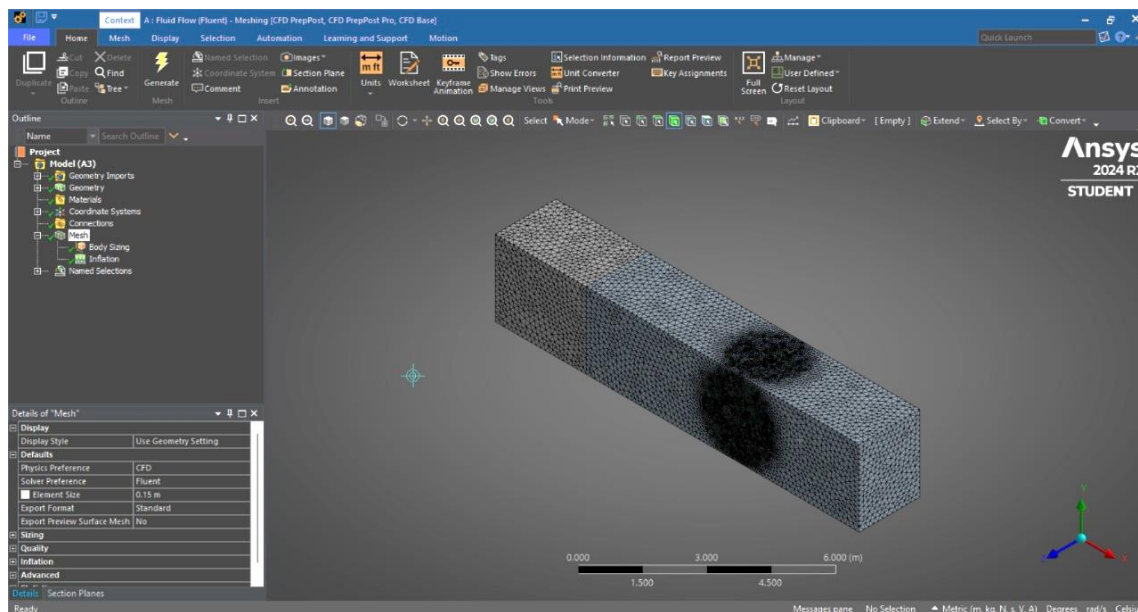
Para validar el requerimiento de comportamiento hidrodinámico de forma predictiva, se realizó un análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) utilizando el software ANSYS.

Para que la simulación del comportamiento de la laguna sea lo más semejante a lo real, se diseñó un canal en el cual se ubicó la boya de manera representativa como

una esfera de 20 centímetros; durante este proceso se realizó 2 mallados, tanto para el comportamiento externo de la boya como para el diseño en general (ver figura 35).

Figura 35

Mallado del diseño hidrodinámico



Nota. En la figura se muestra que el mallado es más denso donde se encuentra la boya para asegurar una mayor precisión.

La simulación se configuró como un modelo multifásico, esencial para analizar la interacción del prototipo con los dos fluidos presentes en el entorno real: agua y aire. Este enfoque permitió evaluar la línea de flotación, la estabilidad hidrostática y el comportamiento dinámico del prototipo bajo condiciones simuladas de oleaje, validando el diseño antes de la experimentación en campo. La simulación CFD validó un centro de gravedad no muy bajo, lo que sugiere la utilización de un soporte adicional que permite mayor estabilidad ante influencias externas mayores.

3.3.2. Implementar el diseño de la Boya a una escala de prototipo.

Esta actividad se centró en la materialización del modelo digital, realizando la validación del prototipo físico funcional. La fabricación se llevó a cabo mediante la tecnología de la impresión en 3D, un método que permitió reproducir con alta fidelidad

la compleja geométrica externa y las características internas diseñadas. Para garantizar la integridad estructural del prototipo frente a las cargas hidrodinámicas, se implementaron refuerzos estratégicos. Específicamente se aumentó el espesor del material en la parte inferior de la boya, zona identificada en la simulación como un área de alta concentración de presiones.

Este diseño se optimizó para la funcionalidad y el mantenimiento. Se incorporaron uniones roscadas directamente en el modelo, facilitando un ensamblado rápido y seguro de las diferentes secciones del casco sin necesidad de adhesivos o elementos de fijación externos completos.

Además, se diseñaron dos accesos claves para el fácil acceso del prototipo:

- **Acceso Superior:** Una escotilla ubicada en la parte superior, diseñada para proporcionar un acceso directo al sistema electrónico, permitiendo la manipulación del microcontrolador, la batería y el módulo de telemetría.

Figura 36

Acceso superior



Nota. En la imagen podemos apreciar al acceso superior hacia el microcontrolador de la Boya.

- **Acceso Central:** Un puerto de inspección en la sección media del cuerpo, estratégicamente posicionado para facilitar el montaje, la revisión y el mantenimiento del generador electromagnético.

Figura 37

Acceso Central



Nota. En la imagen se puede apreciar la distribución del bobinado, así como el acceso central de la boya.

Como resultado, se obtuvo un prototipo a escala, estructuralmente sólido y funcional modular, listo para la siguiente fase de ensamblaje de componentes y pruebas de validación.

3.3.3. Ensamblar las piezas impresas del Prototipo.

Con las partes del prototipo ya fabricadas, esta actividad consistió en el ensamblaje mecánico de la estructura externa para conformar una única unidad funcional. La unión de las principales secciones impresas se realizó utilizando las roscas que fueron integradas directamente en el diseño del prototipo. El método agilizó el proceso de ensamble y también de acceso para labores de mantenimiento o inspección interna.

Figura 38

Ensamble final del prototipo



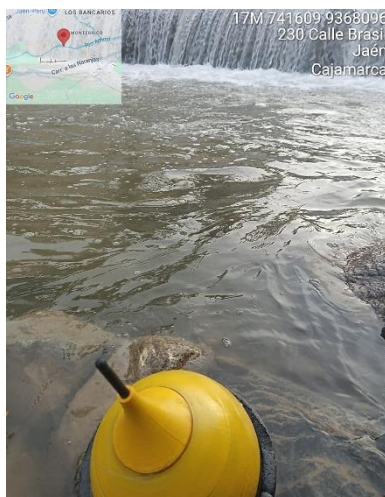
Nota. Se puede observar todos los componentes listos para el ensamble.

3.4.O.E.4: Evaluar el prototipo en laboratorio y en la Laguna de Burlan.**3.4.1. Probar el funcionamiento del prototipo y realizar el monitoreo de la calidad de agua en la Laguna de Burlan.**

A fin de realizar una prueba de simulación de la investigación realizada, el prototipo fue sometido a una fase de prueba en un entorno de aplicación real como lo es el Rio Amojú. Esta pequeña fase experimental se centró en monitorear los parámetros de calidad de agua, para validar el funcionamiento del prototipo, y realizar de forma paralela, el análisis de la flotabilidad del dispositivo evaluando de esta manera la estabilidad y resistencia de la boya ante las turbulencias del rio. Este pequeño complemento validado en las gráficas de la figura 40 y 41, nos permitió concluir, que el dispositivo no es el adecuado para entorno con turbulencia, esto debido a que la turbulencia no permite que el dispositivo se comporte de una manera adecuada, por otro lado las mediciones de los parámetros de calidad de agua se desarrollan con total normalidad, adicionalmente, se puede mencionar también que el agua del rio Amojú se encuentra en estándares óptimo para su consumo, de acuerdo a los valores del sensor TDS obtenidos.

Figura 39

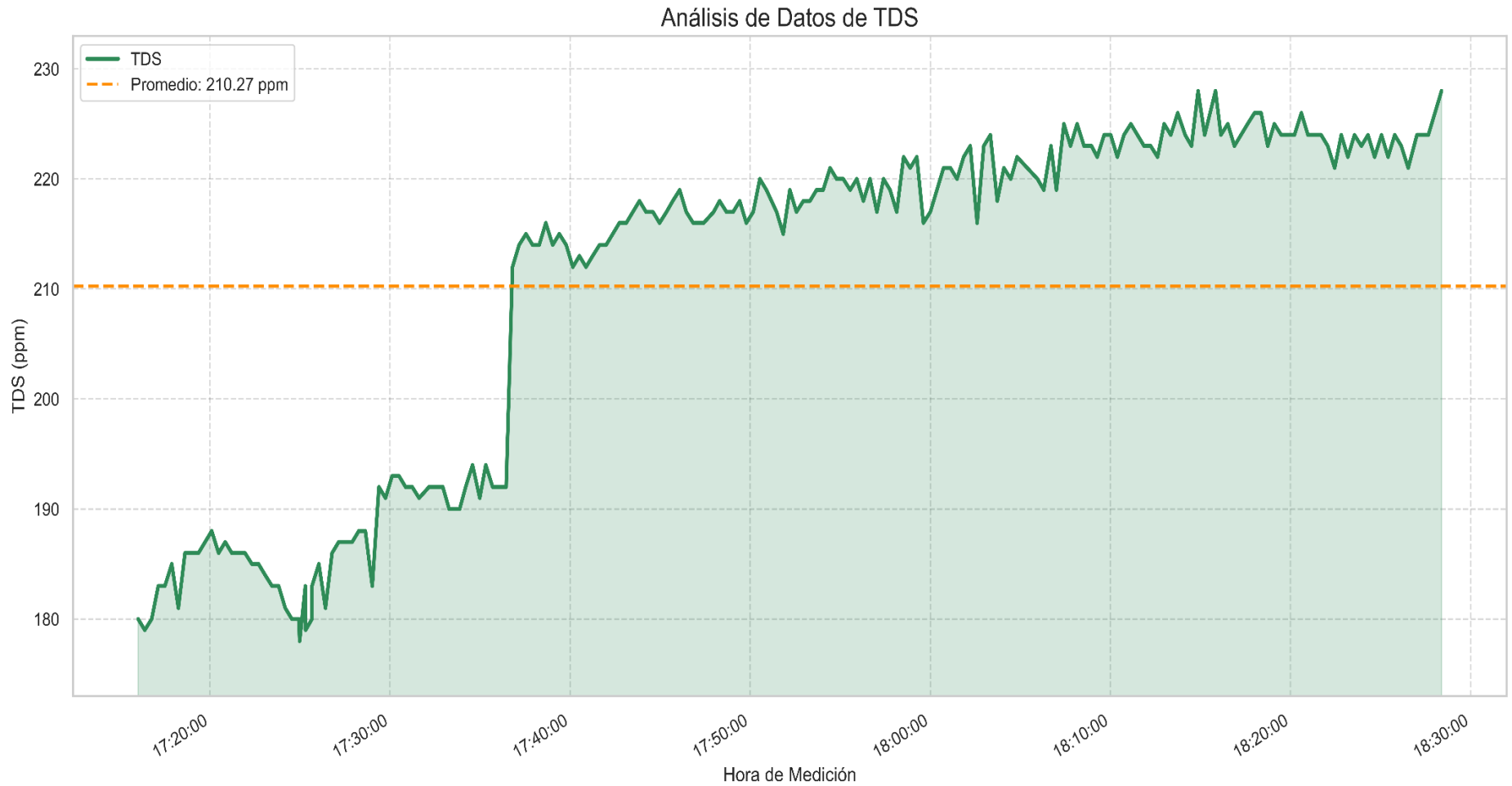
Imagen de la prueba del dispositivo en el Rio Amojú



Nota. En la imagen se aprecia la ubicación con coordenadas de la boya en el Rio Amojú.

Figura 40

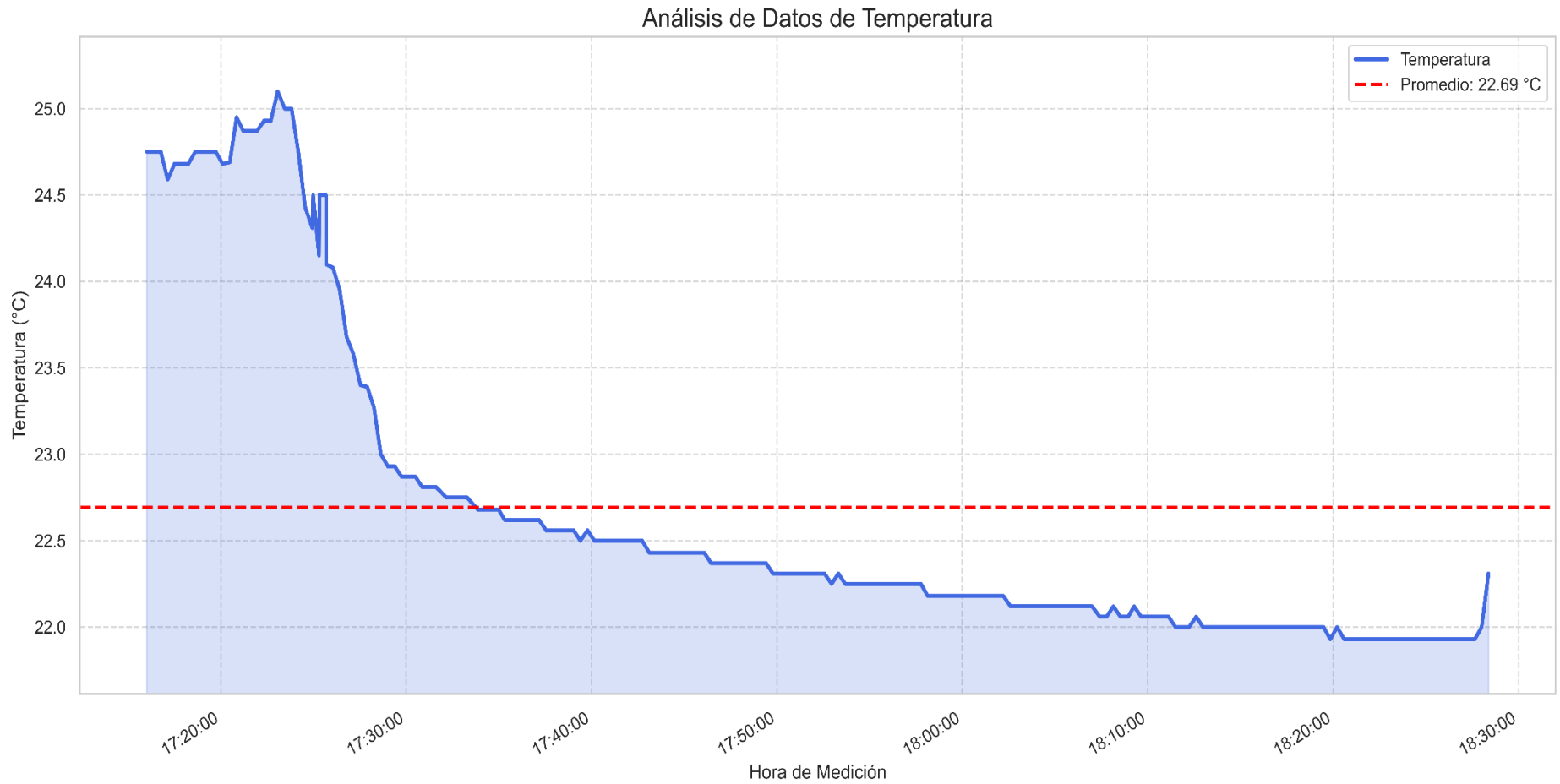
Gráfico de los Resultados de los Parámetros de Calidad de Agua en el Rio Amojú



Nota. En la figura se puede apreciar los valores obtenidos durante las mediciones realizadas de parámetros de TDS, el aumento de los parámetros obtenido se debe a la actividad humana presente en el rio a unos pocos metros de la ubicación del prototipo.

Figura 41

Gráfico de los Resultados de los Parámetros de Calidad de Agua en el Rio Amojú



Nota. En la figura se puede apreciar los valores obtenidos durante las mediciones realizadas de parámetros de Temperatura, existe una caída de temperatura conforme llega la noche

Como prueba final, se sometió al prototipo a las condiciones operativas reales para las cuales fue diseñado. La prueba de campo se llevó a cabo con el despliegue de este componente ensamblado e integrado en la Laguna de Burlan.

Para asegurar la comparabilidad de los datos, la boya fue puesta en el mismo punto geográfico utilizando durante la fase inicial de mediciones y recolección de datos de viento. Una vez posicionada, se activaron todos los subsistemas integrados: el generador undimotriz, el sistema de sensores de calidad de agua, y el sistema de telemetría LoRa.

Los requerimientos de esta prueba fue validar el funcionamiento integral y autónomo del prototipo, dentro de los que se describió:

- Generar energía de manera sostenida a partir del oleaje presente.
- Realizar mediciones precisas de los parámetros de calidad del agua de forma continua.
- Transmitir los datos de manera fiable a través de enlace de comunicación LoRa hacia la estación base.

Durante los periodos de prueba, el sistema operó de manera exitosa, capturando los datos mediante el sistema de sensores, enviándolos desde el nodo emisor al receptor correctamente, el cual a su vez envió los valores recolectados al canal de la plataforma ThingSpeak monitoreando los datos en tiempo real, confirmando la viabilidad y el correcto funcionamiento de todo el sistema, desde la captación de la energía hasta la visualización remota de los datos de parámetros de calidad de agua.

Figura 42

Imagen de las pruebas tomadas en la Laguna de Burlan



Nota. En la imagen se puede apreciar la boya en la Laguna de Burlan.

Tabla 26

Promedio de Resultados de TDS

Promedio de Resultados TDS	
Día	TDS
2025 – 09 – 28	613.73 ppm
2025 – 09 – 29	613.71 ppm
2025 – 09 – 30	634.23 ppm
Promedio General de TDS	
TDS	619.80 ppm

Nota. En la tabla se puede apreciar los valores promedios de las mediciones realizadas en la Laguna de Burlan.

Los resultados previamente mencionados, nos indican que el sistema de sensoramiento de TDS está funcionando correctamente, pero, que el agua presente en esta Laguna no es apta para el consumo normal y habitual del ser humano, pero, en cambio, está cantidad de partículas por millón de minerales, es la adecuada para que el ecosistema acuático, se desarrolle con total normalidad.

Transitoriamente, también se desarrollaron las mediciones de los parámetros de temperatura en la Laguna de Burlan. Seguidamente se Proporciona una tabla con los valores promedios.

Tabla 27

Promedio de Resultados de Temperatura

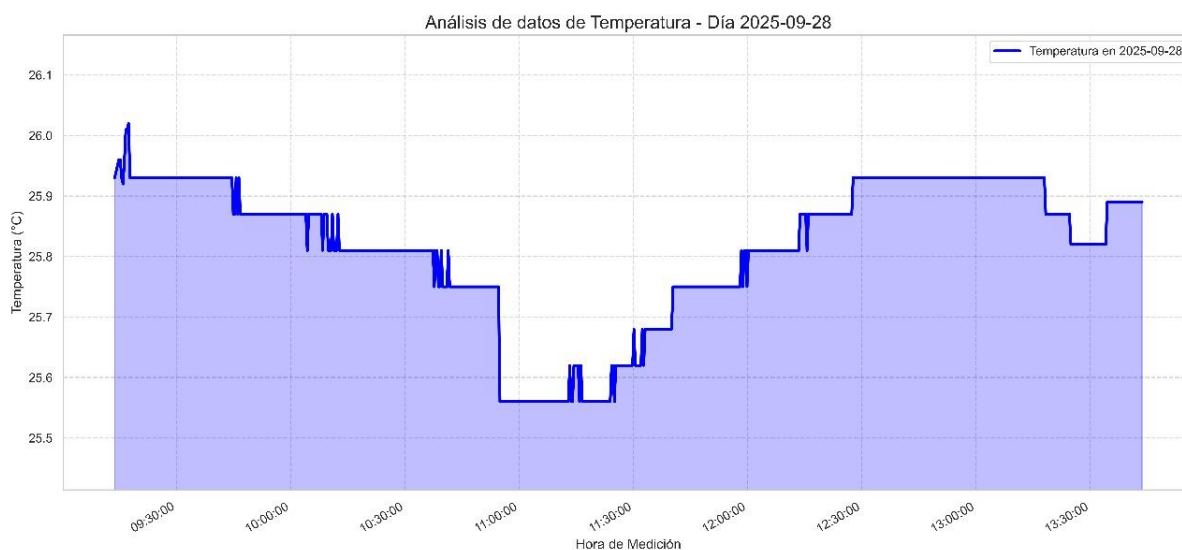
Promedio de Resultados de Temperatura	
Día	Temperatura
2025 – 09 – 28	25.83 °C
2025 – 09 – 29	28.79 °C
2025 – 09 – 30	25.58 °C
Promedio General de Temperatura	
TDS	25.74 °C

Como se puede apreciar en los valores obtenidos anteriormente, y en el gráfico de las figuras (43, 45, 47), no se evidencian cambios bruscos de temperatura, y sigue un parámetro normal, desde el punto en el cual se procede a colocar la boya para realizar el monitoreo.

A continuación, se pueden apreciar gráficas que nos ayudan a interpretar los valores obtenido de los parámetros de calidad de agua obtenidos en la Laguna de Burlan. En las figuras (44, 46, 48) podemos apreciar los valores monitoreado por el sensor TDS y temperatura, en cada uno de los días en los que se probó el prototipo.

Figura 43

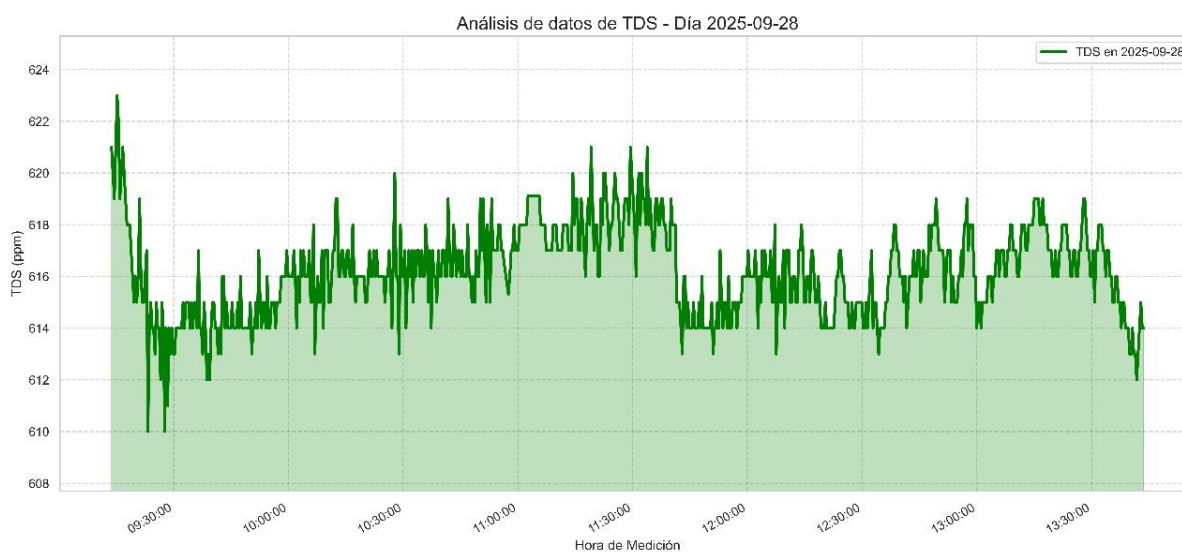
Datos de Temperatura en la Laguna de Burlan (28-09-2025)



Nota. Se puede apreciar en la figura los datos de temperatura que se pudo recolectar, donde inicialmente la temperatura disminuye ligeramente tras la ausencia de luz solar.

Figura 44

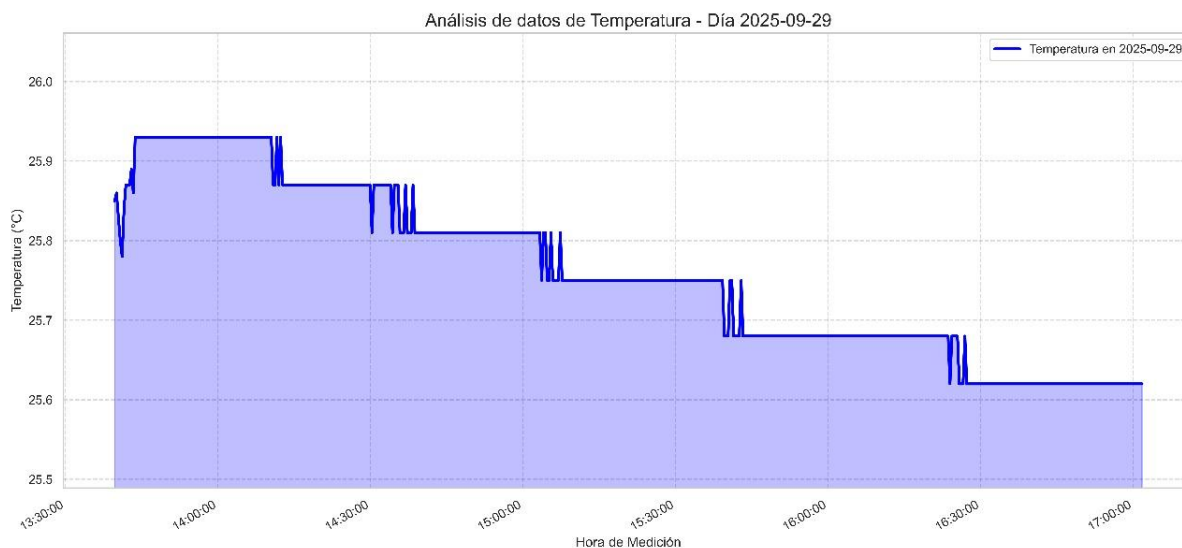
Datos de TDS en la Laguna de Burlan (28-09-25)



Nota. Se puede apreciar en la figura los datos de TDS que se pudo recolectar, en donde se puede apreciar que se encuentran en parámetros normales para una laguna.

Figura 45

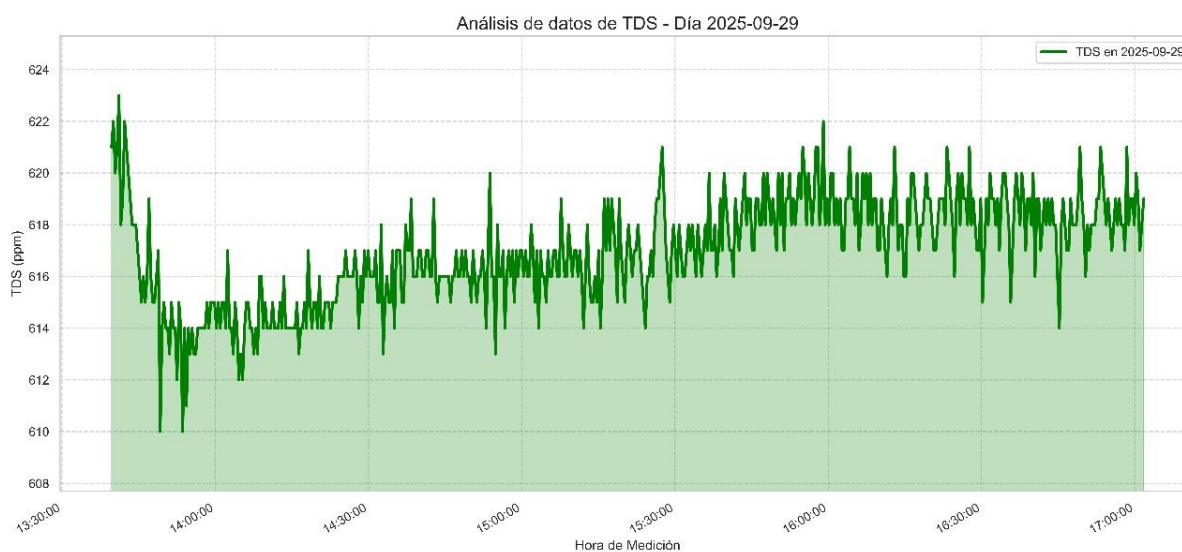
Datos de Temperatura en la Laguna de Burlan (29-09-2025)



Nota. En el presente gráfico se pueden apreciar valores normales, debido a que no hubo variaciones externas.

Figura 46

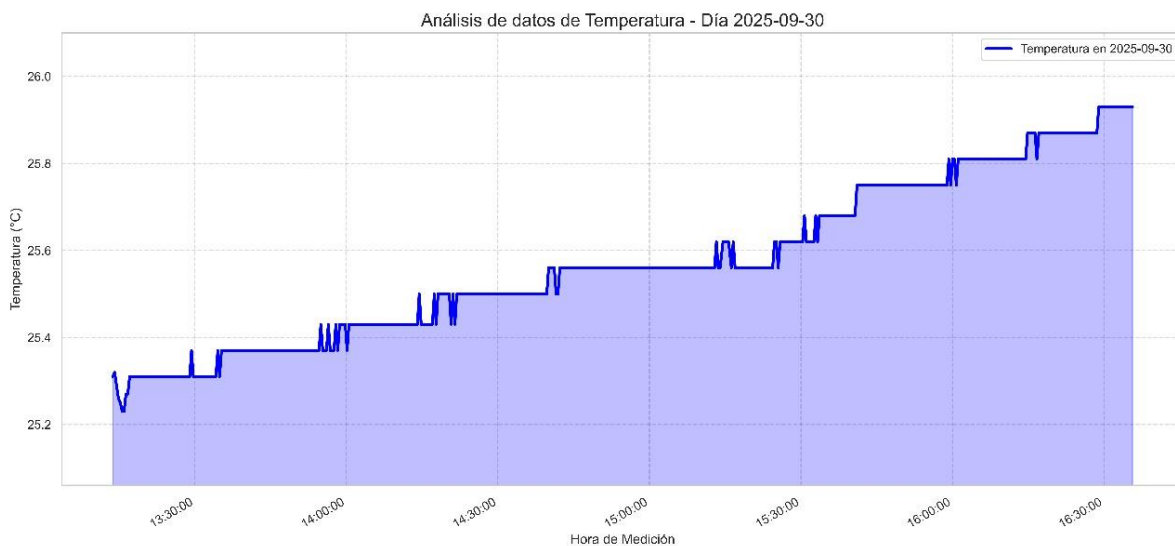
Datos de TDS en la Laguna de Burlan (29-09-25)



Nota. Se puede apreciar en la figura los datos de TDS que permanecen ligeramente estables.

Figura 47

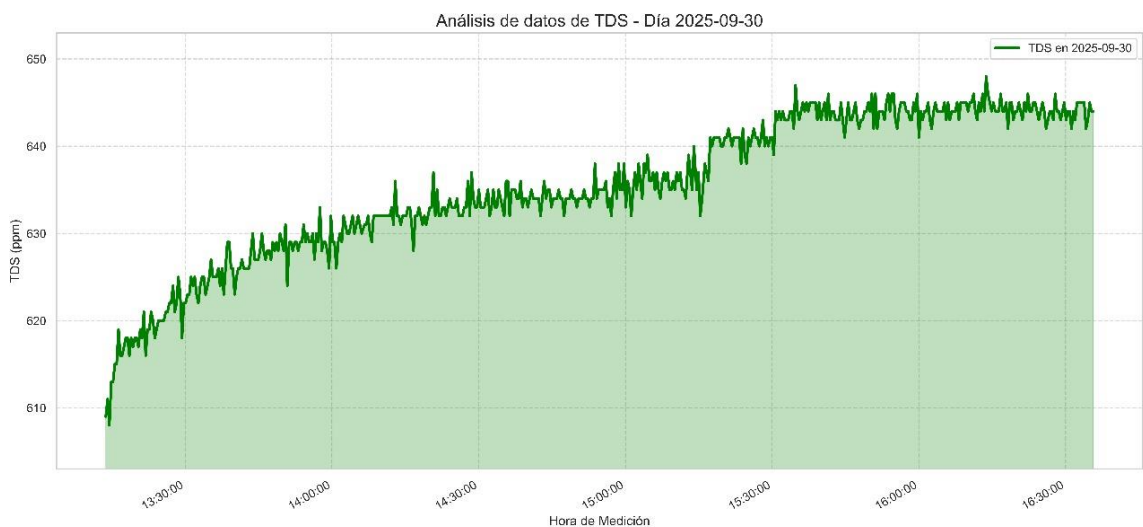
Datos de Temperatura en la Laguna de Burlan (30-09-2025)



Nota. Se puede apreciar en la figura los datos de temperatura, los cuales fueron aumentando debido a la presencia de luz solar.

Figura 48

Datos de TDS en la Laguna de Burlan (30-09-25)



Nota. Se puede apreciar en la figura los datos de TDS un poco elevado respecto a otros días, debido a la presencia de actividad humana a poca distancia de donde se ubicó el prototipo.

IV. DISCUSIÓN

El antecedente previamente descrito de (Silva,2022), como se describe anteriormente, se enfoca en la evaluación del potencial undimotriz a gran escala en entornos marinos de alta energía, nuestra investigación, mientras tanto, estudia la viabilidad de esta tecnología en entornos de bajo potencial undimotriz, como es en este caso la Laguna de Burlan. Otro punto a mencionar es que (Silva, 2022) se enfoca en modelos de reanálisis para estimar potencias a escalas de MWh, los resultados obtenidos se basan en una metodología adaptado a como también se conoce, cuerpos de agua interiores, con un "*Fetch*" limitado a 900 metros. Las mediciones de viento realizadas en la Laguna de Burlan, oscilaron entre 1.5 m/s y 4.2 m/s, nos permitieron estimar alturas de ola (Hs) mucho menores, entre 2.3 cm y 7.4cm resultando en una densidad de potencia energética que varía entre 0.16 W/m a un máximo de 4.18 W/m. Esta diferencia en la magnitud del recurso no valida su utilidad, sino que resalta un nicho de aplicación distinto: La energización de sistemas autónomos de bajo consumo. El enfoque del proyecto no se limita a la evaluación del recurso, sino que integra el diseño de una solución completa, incluyendo un sistema de monitoreo de calidad de agua y un sistema de telemetría LoRa cuya viabilidad de comunicación se validó a una distancia moderada, demostrando que incluso en condiciones de bajo oleaje es factible desarrollar una solución tecnológica funcional para una densidad específica.

A diferencia de los sistemas de monitoreo convencionales que dependen de fuentes de energía intermitentes como la solar o de baterías con vida útil limitada, el prototipo desarrollado exploró una alternativa de entornos acuáticos internos (Lagunas). El sistema de conversión de energía, basado en un generador pendular de imanes permanentes, fue diseñado específicamente para las condiciones de oleaje de baja amplitud características de la laguna. Si bien la potencia generada es modesta, acompañada con una batería es suficiente para la operación del sistema electrónico de bajo consumo seleccionado, centrado en el microcontrolador ESP32-S3.

El sistema de monitoreo y transmisión de datos operó de manera exitosa, cumpliendo con su objetivo principal. Se logró monitorear y enviar datos de temperatura y sólidos disueltos totales (TDS) a la plataforma en la nube de ThingSpeak, validando la arquitectura electrónica basada en el microcontrolador ESP32 – S3. A diferencia de los sistemas realizados por (Caro, 2022; Tirado, 2015), que empleaban módulos de comunicación externos como módems GSM, nuestra elección de un microcontrolador con un transmisor LoRa, simplificó el diseño, redujo el consumo

energético potencial y demostró ser una solución efectiva para el monitoreo en cuerpo de agua con una comunicación a una distancia cercana o moderada. Los datos recopilados, aunque preliminares, permitieron establecer una línea base de la calidad del agua en el punto de muestreo, permitieron establecer una línea base de la calidad del agua en el punto de muestreo, mostrando una correlación directa entre la temperatura y los niveles de TDS, lo cual es consistente con los principios fisicoquímicos del agua.

La selección de la tecnología LoRa para la telemetría fue un factor de suma importancia en el éxito del presente proyecto. Esta permitió establecer un enlace de comunicación óptimo y de largo alcance hasta la estación receptora (Nodo Receptor), superando las limitaciones de otras tecnologías inalámbricas como Wi-Fi o Bluetooth en entornos abiertos. La correcta recepción de los datos y su posterior visualización en la plataforma ThingSpeak valida no solo el canal de comunicación, sino todo el flujo de información, desde la medición en el agua hasta su acceso en la nube.

El generador electromagnético pendular, si bien es validado conceptualmente, no alcanzó la producción necesaria para alimentar de forma continua el sistema de sensores y telemetría. Este resultado difiere con los hallazgos de (Lau, 2017), cuyo convertidor electromagnético para baja marea logró generar 3.8 MJ en condiciones controladas de laboratorio. El prototipo, enfrentado a las condiciones variables y de olaje mínimo de la Laguna de Burlan, no pudo replicar esta eficiencia solo llegando a 1.9 kJ, lo que subraya la brecha existente entre los modelos de laboratorio y la aplicación en campo. Este desafío energético evidencia que el diseño actual, aunque es un primer paso fundamental, requiere una optimización geométrica y de materiales, tal como se menciona (Garcia, 2020), para maximizar la captura de energía en movimientos oscilatorios de baja frecuencia y amplitud.

El diseño estructural y la flotabilidad del prototipo, fueron validados exitosamente durante las pruebas de campo. La carcasa, fabricada con tecnología de impresión 3D, garantizó una protección de los componentes electrónicos y mantuvo una flotabilidad estable, resistiendo las condiciones ambientales de la laguna. Confirmándonos de esta manera que los materiales y el diseño seleccionados son adecuados para una plataforma de monitoreo de estas características, sentando una base sólida para futuras iteraciones que se centren en la mejora del sistema de generación de energía.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Al terminar la presente investigación y desarrollo, se llegó a una serie de conclusiones que abarcan más que números y resultados técnicos. Recordemos que el presente proyecto nació por una idea ambiciosa, la cual era crear a un sistema de monitoreo de la calidad del agua en la Laguna de Burlan, alimentando únicamente por la energía undimotriz útil del propio oleaje.

- El dispositivo existente cumplió exitosamente los requerimientos funcionales, operacionales y la mayoría de requerimientos no funcionales. El requerimiento no funcional (RNF-04) fue el único que no se cumplió bajo las condiciones de la laguna, por lo que el objetivo final, de un prototipo energéticamente autosuficiente no se cumplió. La energía que el prototipo logró generar a partir de las olas de la laguna fue, en la práctica, insuficiente para poder recargar la batería y mantenerlo autosustentable. Este resultado, aunque no es el esperado, es una conclusión honesta y valiosa de la presente investigación, pues nos señala con claridad en donde se encuentran los verdaderos desafíos.
- La implementación de un sistema de monitoreo de sensores y comunicaciones funcionó perfectamente, con los cuales se logró medir con éxito los parámetros de calidad de agua, y transmitirlos de forma inalámbrica en tiempo real al canal de la plataforma ThingSpeak.
- Se implementó satisfactoriamente el diseño en un prototipo físico a escala, utilizando manufactura de impresión en 3D. El proceso de ensamblaje confirmó la efectividad del diseño modular, que facilitó la integración de los componentes internos y garantizó la hermeticidad de la estructura.
- Evaluando el funcionamiento del prototipo en la Laguna de Burlan se logró que el prototipo lograra generar un promedio de 0.528 Wh/día de energía, proporcionando un balance energético en déficit del -5.072 Wh/día.
- Teniendo como base las mediciones realizadas de viento de hasta 4.2 m/s y un *fetch* de 900 metros, se determinó una superficie para la aplicación de bajo consumo diseñada.

- Tomando en cuenta las lecturas brindadas por el medidor de TDS, podemos concluir que en la Laguna de Burlan el agua está completamente contaminada y no apta para el consumo ya que supera los 600 ppm, en cambio en el Río Amojú la lectura marca menos de 250 ppm, lo que infiere que si bien esta levemente contaminada esta se puede consumir.

En resumen, el presente proyecto no se considera un intento fallido, sino, un comienzo fundamental y necesario. Se ha desarrollado un sistema de monitoreo funcional e identificado con precisión la pieza faltante en el rompecabezas para alcanzar una autonomía energética. Este proyecto representa un inicio claro, para una próxima etapa, con un diseño de boya optimizado mediante simulación, la promesa de una autonomía para nuestras lagunas, impulsado por su propio potencial undimotriz, pueda finalmente convertirse en realidad.

5.2.Recomendaciones

- Realizar un estudio de optimización del generador electromagnético, evaluando diferentes configuraciones de imanes y bobinados, con el fin de incrementar la eficiencia de conversión y la potencia de salida, logrando así que el déficit energético se convierta en valores positivos, mismos que indican autosuficiencia. Con esto se lograría que la demanda diaria sea cubierta al menos con un 50% de generación por inducción electromagnética de energía diaria, es decir 2.8 Wh/día o un balance energético de -2.8 Wh para poder lograr mejores resultados a largo plazo. Dicho valor se lograría si se trabajase no 4 horas como inicialmente se propuso, sino por 2 o 1 hora al día, con ello sería suficiente para cubrir el 50% de la demanda energética diaria.
- Los Energy Harvesters son una recomendación llamativa para su aplicación, este concepto hace referencia a la capacidad de los sistemas diseñados para capturar pequeñas cantidades de energía del ambiente, que en otros casos se desperdiciarían.
- Al igual que en el presente proyecto, también se recomienda el uso de sistemas híbridos, esto se puede entender como la integración de baterías, o paneles solares al sistema, que puedan generar electricidad y acompañar al generador undimotriz.

- Expandir la capacidad de monitoreo de la boya añadiendo sensores para otros parámetros de calidad de agua de interés, como pH, turbidez u oxígeno disuelto, aprovechando la plataforma energética y de comunicación ya validada.
- Llevar a cabo un despliegue a largo plazo del prototipo para evaluar su durabilidad, la resistencia de los materiales a la exposición continua y el rendimiento del sistema a lo largo de las diferentes estaciones del año.
- Para culminar, se recomienda emplear microcontroladores que admitan la estancia del sistema en sueño profundo, con la finalidad de ahorrar y ser más eficientes con el uso de la energía, realizar mediciones en intervalos programados o cuando sea estrictamente necesario.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abu-Rub, H., Malinowski, M., & Al-Haddad, K. (2014). *POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS*.

<https://pspowers.com/wp-content/uploads/2021/05/Power-Electronics-for-Renewable-Energy-Systems-Transportation-and-Industrial-Applications-PDFDrive-.pdf>

ANA. (2018). *Clasificación De Los Cuerpos De Agua Continentales Superficiales*. 511, 59.

<https://www.ana.gob.pe/publicaciones/clasificacion-de-los-cuerpos-de-agua-continentales-superficiales>

Bunge, M. (2004). La Investigacion Científica. In *Siglo Veintiuno*.

<https://ia800601.us.archive.org/9/items/BungeMarioLaInvestigacionCientificaSuEstrategiaYSuFilosofia/Bunge%20Mario%20-%20La%20Investigacion%20Cientifica%20-%20Su%20Estrategia%20Y%20Su%20Filosofia%20.pdf>

Caro Hernández, C. (2022). Diseño de un sistema electrónico alojado en una boya fluvial para la medición de la calidad de agua. Universitat Politècnica de València.

<https://riunet.upv.es/handle/10251/187027>

Elkhrachy, I., Alhamami, A., & Alyami, S. (2023). *Nuevos enfoques para predecir la altura y el espectro energético de las olas oceánicas: una aplicación de modelos semianalíticos y de aprendizaje automático*.

https://www.researchgate.net/publication/373911364_Novel_Ocean_Wave_Height_and_Energy_Spectrum_Forecasting_Approaches_An_Application_of_Semi-Analytical_and_Machine_Learning_Models

Energy Agency, I. (2024). *World Energy Outlook 2024*.

www.iea.org/terms

Floyd, T. L. (2007). *PRINCIPIOS DE CIRCUITOS ELECTRICOS*.

www.pearsoneducacion.net/floyd

Fraden, J. (2016). *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications Fifth Edition*.

[Handbook-of-modern-sensors-physics-designs-and-applications-Fraden-Jacob-Springer-2016.pdf](#)

Garcia, A. (2020). *Geometry Optimisation of Wave Energy Converters*. University of Edimburgh.

Griffiths, D. (2017). *INTRODUCTION TO ELECTRODYNAMICS*.

https://nucleares.unam.mx/~martinel/griffiths_4ed.pdf

Hansen, A. M., & Márquez-Pacheco, H. (2012). Procedimiento para evaluar cargas internas de nutrientes en cuerpos de agua. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), 265–275.

<https://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v29n1/v29n1a18.pdf>

Lau, R. (2017). *Diseño e Implementación de un Convertidor Electromagnético de Péndulo para el Aprovechamiento de Energía Undimotriz*. Universidad Politécnica de Cataluña.

<https://upcommons.upc.edu/entities/publication/1136615b-86db-4b7e-a4a3-84bcacdfb3d5>

Mazidi, M. A., Gillispie, J., Rolin, M., & Mckinlay, D. (2012). *The 8051 Microcontroller and Embedded Systems Using Assembly and C Second Edition*.

https://opac.uma.ac.id/repository/the_8051_microcontroller_and_embedded_systems_using_assembly_and_c-2nd-ed_by_mazidi.pdf

Renewable Energy Agency, I. (2024). *Renewable energy and jobs: Annual review 2024*.

www.irena.org

Rojas, O., & Rojas, L. (2006). Diseño Asistido por Computador. *Industrial Data*, 9(1), 1–10.

<https://www.redalyc.org/pdf/816/81690102.pdf>

Sampieri, R., Collado, C., & Lucio, P. (1996). Metodología de la investigación. In *Edición McGraw-Hill*.

https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf

Sergio Ribotta; Raúl Peñaloza. (n.d.). *Ley de Faraday*. 1–22.

http://fisica2.fica.unsl.edu.ar/F2_T9.pdf

Silva, K., Abreu, T., & Oliveira, T. (2022). Inter and Intra Annual Variability of Wave Energy in Northern Mainland Portugal: Application to the HiWave-5 Project. *Energy Reports*, 8, 6411–6422.

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.005>

VII. DEDICATORIA

Dedico esta tesis especialmente a mis padres, Raúl Bravo Dávila y Rosa Elvira Quispe Roque, por su amor, su apoyo incondicional, su paciencia infinita y por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia, todo los sueños se pueden alcanzar. Así como también a mi hermano y familiares que me brindaron su apoyo, desde su sabiduría. A Dios, por guiarme en mi día a día, y otorgarme la fortaleza para superar los innumerables obstáculos que se presentaron en la búsqueda de esta meta.

Edinson Raul Bravo Quispe

A mi padre, Edwin Antonio Guevara Fernández, quien es no solo mi padre, sino también mi amigo y mi guía. A ti te dedico especialmente esta tesis, por tu apoyo incondicional que nunca me ha faltado y que sigue siendo mi pilar. Gracias por enseñarme, que el esfuerzo y la perseverancia son el camino para alcanzar nuestras metas, y que la humildad debe acompañar siempre cada paso. A mis hermanas, por estar a mi lado en todo momento, sosteniéndome tanto en las buenas como en las malas; su amor ha sido mi fortaleza. A Dios, por iluminar mi camino y darme la claridad para perseguir y lograr cada uno de mis sueños.

Luis Fernando Guevara Requejo

VIII. AGRADECIMIENTOS

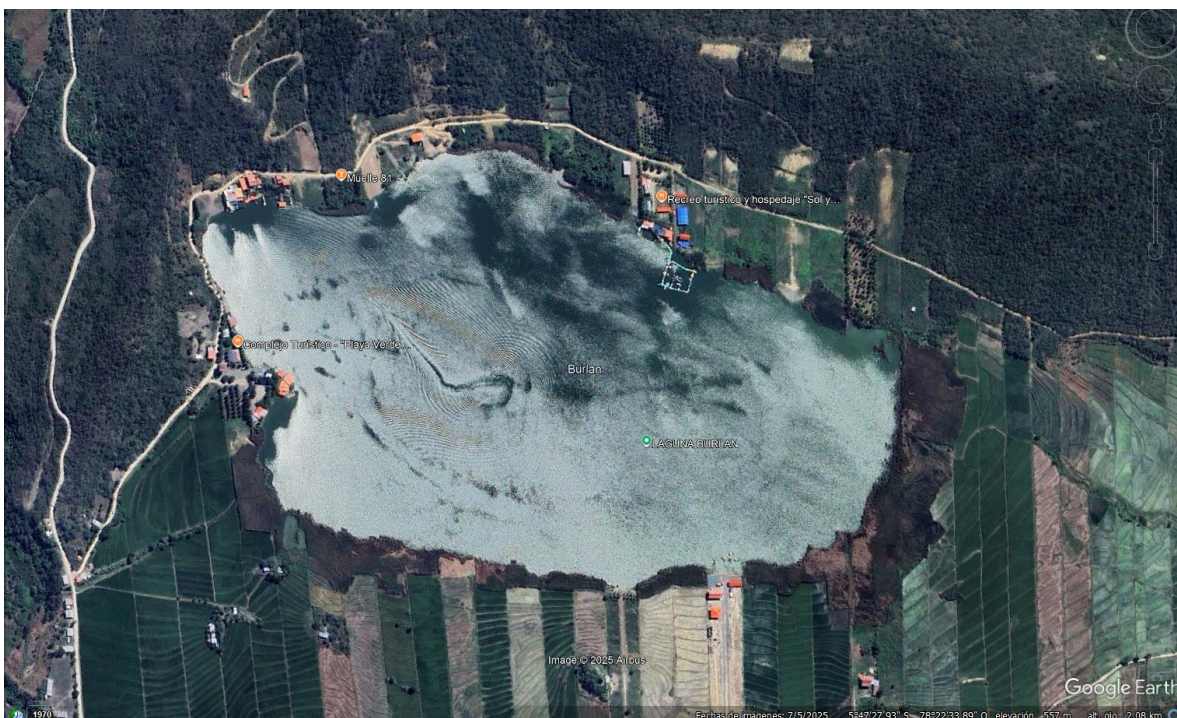
Extendemos nuestra sincera gratitud a nuestro asesor, Henry Oswaldo Pinedo Nava, cuya vasta experiencia y rigor científico fueron fundamentales en nuestra guía. Su compromiso, dedicación inquebrantable y apoyo continuo no solo dirigieron el proyecto, sino que también enriquecieron nuestro recorrido profesional y personal.

Manifestamos nuestro reconocimiento al Instituto de Investigación en Energías Renovables (INRER). Agradecemos especialmente su contribución al facilitar el uso del laboratorio y por proponer la integración de redes de sensores inalámbricos, un concepto clave para impulsar la eficiencia energética dentro del marco de este proyecto.

Deseamos expresar un agradecimiento especial al Ingeniero Jaime Pinedo Vásquez. Su precisa orientación y profundo conocimiento fueron cruciales en la etapa de conversión electromagnética, guiándonos exitosamente a través del desarrollo y experimentación con el sistema de imanes y bobinas.

IX. ANEXOS

Anexo 1. Imagen Satelital de la Laguna de Burlan – Utcubamba – Amazonas



Anexo 2. Código en Python de la potencial Undimotriz de la Laguna de Burlan

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import glob

G = 9.81
F = 900
C = 0.0016
RHO = 1000
TE = 1.5

print("Herramientas y constantes físicas cargadas.")

lista_de_archivos = glob.glob('*.*xlsx')
lista_de_dataframes = []

if not lista_de_archivos:
    print("\nERROR: No se encontraron archivos .xlsx. Asegúrate de subirlos al panel de la izquierda.")
```

```

else:
    print(f"\nSe encontraron {len(lista_de_archivos)} archivos Excel: {lista_de_archivos}")

nombres_estandar = ['Fecha', 'Temperatura [°C]', 'Velocidad del aire [m/s]']

for archivo in lista_de_archivos:
    try:
        print(f"Procesando archivo: {archivo}...")
        df_temp = pd.read_excel(archivo, skiprows=42)

        if df_temp.empty:
            print(f" -> Archivo '{archivo}' ignorado (vacío).")
            continue

        df_temp.dropna(axis=1, how='all', inplace=True)
        df_temp = df_temp.iloc[:, :len(nombres_estandar)]
        df_temp.columns = nombres_estandar

        df_temp['Fecha'] = pd.to_datetime(df_temp['Fecha'].astype(str).str.replace(' a. m.', '
AM').str.replace(' p. m.', ' PM'), errors='coerce')
        df_temp.dropna(subset=['Fecha'], inplace=True)

        lista_de_dataframes.append(df_temp)
    except Exception as e:
        print(f" -> Error procesando '{archivo}': {e}. Se omitirá este archivo.")

if not lista_de_dataframes:
    print("\nERROR: No se pudo leer ningún archivo de datos válido.")
else:
    df = pd.concat(lista_de_dataframes, ignore_index=True)
    df.sort_values(by='Fecha', inplace=True)
    # MUY IMPORTANTE: Reiniciamos el índice para que sea una secuencia continua de 0 a N
    df.reset_index(drop=True, inplace=True)
    print(f"\nSe han unido y ordenado todos los archivos. Total de registros: {len(df)}")

    col_velocidad = "Velocidad del aire [m/s]"
    df[col_velocidad] = pd.to_numeric(df[col_velocidad], errors='coerce')
    df.dropna(subset=[col_velocidad], inplace=True)
    df.rename(columns={col_velocidad: 'U_L'}, inplace=True)
    df['H_s (m)'] = C * np.sqrt(F / G) * df['U_L']
    df['P (W/m)'] = (RHO * G**2 / (64 * np.pi)) * (df['H_s (m)']**2) * TE
    print("Cálculos de energía completados.")
    potencia_media = df['P (W/m)'].mean()
    potencia_maxima = df['P (W/m)'].max()
    print("\n--- RESUMEN DEL ANÁLISIS COMBINADO ---")

```

```
print(f"Potencia de Ola Promedio: {potencia_media:.2f} W/m")
print(f"Potencia de Ola Máxima: {potencia_maxima:.2f} W/m")
print("-----")
print("\nGenerando gráfico continuo...")
fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(20, 8))
sns.set_theme(style="whitegrid")

ax1.set_xlabel('Índice del Registro (Secuencia Continua)', fontsize=12)
ax1.set_ylabel('Velocidad del Viento (m/s)', color='tab:blue', fontsize=12)
ax1.plot(df.index, df['U_L'], color='tab:blue', alpha=0.7)
ax2 = ax1.twinx()
ax2.set_ylabel('Potencia de Ola (W/m)', color='tab:red', fontsize=12)
ax2.plot(df.index, df['P (W/m)'], color='tab:red', alpha=0.8)

plt.title('Análisis Continuo del Potencial Energético (Múltiples Archivos)', fontsize=16)
plt.show()

output_filename = "resultado_energia_undimotriz_COMBINADO.xlsx"
df.to_excel(output_filename, index=False)
print(f"Resultados combinados guardados en '{output_filename}'")
```

Anexo 3. Código Python del gráfico de dispersión

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import glob

G = 9.81 # Aceleración de la gravedad [m/s^2]
F = 900 # Fetch efectivo [km] - (Este valor puede necesitar ajuste)
C = 0.0016 # Coeficiente de crecimiento de la ola
RHO = 1000 # Densidad del agua de la Laguna [kg/m^3]
TE = 1.5 # Periodo de energía (factor de conversión) [s]
print("Herramientas y constantes físicas cargadas.")

lista_de_archivos = glob.glob('*.xlsx')
lista_de_dataframes = []

if not lista_de_archivos:
    print("\nERROR: No se encontraron archivos .xlsx. Asegúrate de subirlos al panel de la izquierda.")
else:
    print(f"\nSe encontraron {len(lista_de_archivos)} archivos Excel: {lista_de_archivos}")
    nombres_estandar = ['Fecha', 'Temperatura [°C]', 'Velocidad del aire [m/s]']

    for archivo in lista_de_archivos:
        try:
            print(f"Procesando archivo: {archivo}...")
            df_temp = pd.read_excel(archivo, skiprows=42)
            if df_temp.empty:
                print(f" -> Archivo '{archivo}' ignorado (vacío).")

```

```

        continue

df_temp.dropna(axis=1, how='all', inplace=True)

df_temp = df_temp.iloc[:, :len(nombres_estandar)]

df_temp.columns = nombres_estandar

df_temp['Fecha'] = pd.to_datetime(df_temp['Fecha'].astype(str).str.replace(' a. m.', '
AM')).str.replace(' p. m.', ' PM'), errors='coerce')

df_temp.dropna(subset=['Fecha'], inplace=True)

lista_de_dataframes.append(df_temp)

except Exception as e:

    print(f" -> Error procesando '{archivo}': {e}. Se omitirá este archivo.")

if not lista_de_dataframes:

    print("\nERROR: No se pudo leer ningún archivo de datos válido.")

else:

    df = pd.concat(lista_de_dataframes, ignore_index=True)

    df.sort_values(by='Fecha', inplace=True)

    df.reset_index(drop=True, inplace=True)

    print(f"\nSe han unido y ordenado todos los archivos. Total de registros: {len(df)}")

    col_velocidad = "Velocidad del aire [m/s]"

    df[col_velocidad] = pd.to_numeric(df[col_velocidad], errors='coerce')

    df.dropna(subset=[col_velocidad], inplace=True)

    df.rename(columns={col_velocidad: 'U_L'}, inplace=True)

    df['H_s (m)'] = C * np.sqrt(F / G) * df['U_L']

    df['P (W/m)'] = (RHO * G**2 / (64 * np.pi)) * (df['H_s (m)']**2) * TE

    print("Cálculos de energía completados.")

    TAMANO_VENTANA = 5000

    print(f"\nCalculando media móvil con ventana de {TAMANO_VENTANA} puntos...")

```

```

df['U_L_suavizado'] = df['U_L'].rolling(window=TAMANO_VENTANA, center=True,
min_periods=1).mean()

df['P_suavizado'] = df['P (W/m)'].rolling(window=TAMANO_VENTANA, center=True,
min_periods=1).mean()

print("Cálculos de media móvil completados.")

correlacion_pearson = df['U_L_suavizado'].corr(df['P_suavizado'])

print("\n--- Análisis de Eficiencia del Gráfico de Dispersión (Pearson) ---")

print(f"Coeficiente de Correlación de Pearson (U_L vs P): {correlacion_pearson:.4f}")

print("La correlación es casi perfecta (cerca de 1) porque el potencial undimotriz se calcula")
print("directamente a partir de la velocidad del viento (al cuadrado) según los modelos físicos.")

print("-----")

print("\nGenerando gráficos suavizados...")

sns.set_theme(style="whitegrid")

plt.figure(figsize=(15, 7))

plt.plot(df.index, df['U_L_suavizado'],
        color='darkblue', linewidth=2.5,
        label='Velocidad del Viento')

plt.title('Velocidad del Viento', fontsize=16, fontweight='bold')

plt.xlabel('Índice de Medición', fontsize=12)

plt.ylabel('Velocidad del Viento (m/s)', fontsize=12)

plt.legend()

plt.savefig("Grafico_Viento_Tendencia.jpg", dpi=600, bbox_inches='tight')

plt.show()

print("Gráfico de Tendencia de Viento guardado como 'Grafico_Viento_Tendencia.jpg'")

plt.figure(figsize=(15, 7))

plt.plot(df.index, df['P_suavizado'],
        color='darkred', linewidth=2.5,
        label='Potencial Undimotriz')

plt.title('Potencial Undimotriz', fontsize=16, fontweight='bold')

```

```

plt.xlabel('Índice de Medición', fontsize=12)
plt.ylabel('Potencial Undimotriz (W/m)', fontsize=12)
plt.legend()
plt.savefig("Grafico_Potencial_Tendencia.jpg", dpi=600, bbox_inches='tight')
plt.show()

print("Gráfico de Tendencia de Potencial Undimotriz guardado como
'Grafico_Potencial_Tendencia.jpg'")

print("\nGenerando gráfico de dispersión con muestreo (70k-90k)...")
df_grafico = df.iloc[70000:90000:25].copy()
plt.figure(figsize=(12, 8))
sns.regplot(
    data=df_grafico,
    x='P_suavizado',
    y='U_L_suavizado',
    scatter_kws={'color': 'darkgreen', 's': 25, 'alpha': 0.7, 'label': 'Datos Muestreados (1 cada 25)'},
    line_kws={'color': 'darkred', 'linewidth': 3}
)

plt.title('Gráfico de Correlación', fontsize=16, fontweight='bold')
plt.xlabel('Potencial Undimotriz (W/m)', fontsize=12)
plt.ylabel('Velocidad del Viento (m/s)', fontsize=12)
plt.legend()
plt.grid(True)

plt.savefig("Grafico_Correlacion_Muestreo_70k_90k_MODIFICADO.jpg", dpi=600,
bbox_inches='tight')

plt.show()

print("Gráfico de Correlación con Muestreo guardado con puntos modificados y leyenda
simplificada.")

output_excel_filename = "resultado_energia_undimotriz_COMBINADO.xlsx"
df.to_excel(output_excel_filename, index=False)

print(f"Resultados combinados (con datos suavizados) guardados en '{output_excel_filename}'")

```

Anexo 4. Código del nodo emisor.

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <LoRa.h>
#include <SPI.h>

// Configuración de pines
#define ONE_WIRE_BUS 5 // GPIO5 para DS18B20
#define TDS_SENSOR_PIN 4 // GPIO4 (ADC1_CH0) para TDS
#define LORA_SS 10 // GPIO10 (SS)
#define LORA_RST 9 // GPIO9 (RST)
#define LORA_DIO0 2 // GPIO2 (DIO0)
#define LORA_SCK 12 // GPIO12 (SCK)
#define LORA_MISO 13 // GPIO13 (MISO)
#define LORA_MOSI 11 // GPIO11 (MOSI)

// Calibración TDS (ajustar según solución de calibración)
#define TDS_CALIBRATION 1.0 // Factor de calibración para TDS

// Configuración LoRa
#define LORA_BAND 433E6 // Banda 433MHz
#define LORA_SF 9 // Spreading Factor (balance entre alcance y velocidad)
#define LORA_TX_POWER 20 // Potencia de transmisión (dBm)

#define DEVICE_DISCONNECTED_C -127.0

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature tempSensor(&oneWire);

// Variables para cálculos TDS
float tdsValue = 0;
float temperature = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial); // Esperar solo si es USB

  // Inicializar sensores
  initTemperatureSensor();
  initTdsSensor();

  // Inicializar LoRa
  initLoRa();

```

```

Serial.println("\nSistema iniciado correctamente");
}

void loop() {
  temperature = readTemperature();
  tdsValue = readTds(temperature);
  sendLoRaPacket(temperature, tdsValue);
  delay(10000); // 10 segundos
}

// Inicialización sensores
void initTemperatureSensor() {
  tempSensor.begin();
  DeviceAddress tempDeviceAddress;
  if (!tempSensor.getAddress(tempDeviceAddress, 0)) {
    Serial.println("DS18B20 no detectado!");
    while (1);
  }
  tempSensor.setResolution(tempDeviceAddress, 12);
}

void initTdsSensor() {
  analogReadResolution(12);
  pinMode(TDS_SENSOR_PIN, INPUT);
}

// Inicialización LoRa
void initLoRa() {
  SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_SS);
  LoRa.setSPI(SPI);
  LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);

  if (!LoRa.begin(LORA_BAND)) {
    Serial.println("\u00a1Error al iniciar LoRa!");
    while (1);
  }

  LoRa.setSpreadingFactor(LORA_SF);
  LoRa.setTxPower(LORA_TX_POWER);
  LoRa.enableCrc();
  Serial.println("LoRa iniciado correctamente");
}

// Lectura de temperatura
float readTemperature() {

```

```

tempSensor.requestTemperatures();
float temp = tempSensor.getTempCByIndex(0);

if (temp == DEVICE_DISCONNECTED_C) {
    Serial.println("Error lectura temperatura");
    return -99.99;
}

Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(temp);
Serial.println(" °C");

return temp;
}

// Lectura y cálculo de TDS
float readTds(float temp) {
    const int samples = 10;
    int analogSum = 0;

    for (int i = 0; i < samples; i++) {
        analogSum += analogRead(TDS_SENSOR_PIN);
        delay(30);
    }

    float avgValue = analogSum / (float)samples;
    float voltage = avgValue * 3.3 / 4095.0;
    float compCoeff = 1.0 + 0.02 * (temp - 25.0);

    float tds = (133.42 * voltage * voltage * voltage -
                255.86 * voltage * voltage +
                857.39 * voltage) * TDS_CALIBRATION;

    tds /= compCoeff;

    Serial.print("TDS: ");
    Serial.print(tds);
    Serial.println(" ppm");

    return tds;
}

// Envío de datos por LoRa
void sendLoRaPacket(float temp, float tds) {
    LoRa.beginPacket();

```

```

int16_t tempInt = (int16_t)(temp * 100);
uint16_t tdsInt = (uint16_t)tds;
LoRa.write((uint8_t*)&tempInt, sizeof(tempInt));
LoRa.write((uint8_t*)&tdsInt, sizeof(tdsInt));

if (LoRa.endPacket()) {
  Serial.println("Datos enviados por LoRa!");
  Serial.print("Paquete: ");
  Serial.print(tempInt);
  Serial.print(" | ");
  Serial.println(tdsInt);
} else {
  Serial.println("\u00a1Fallo en env\u00edo LoRa!");
}
}

```

Anexo 5. *C\u00f3digo del nodo receptor.*

```

#include <LoRa.h>
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>

// Configuraci\u00f3n de pines LoRa
#define LORA_SS 5 // GPIO5
#define LORA_RST 14 // GPIO14
#define LORA_DIO0 26 // GPIO26
#define LORA_SCK 18 // GPIO18
#define LORA_MISO 19 // GPIO19
#define LORA_MOSI 23 // GPIO23

// Configuraci\u00f3n WiFi
const char* WIFI_SSID = "BRAVO";
const char* WIFI_PASS = "123456789";

// Configuraci\u00f3n ThingSpeak
const char* THINGSPEAK_API = "http://api.thingspeak.com/update";
const char* THINGSPEAK_KEY = "WMOXIIPR2ZARG0";

// Estructura para los datos recibidos
struct SensorData {
  int16_t tempRaw; // Temperatura * 100
  uint16_t tdsRaw; // Valor TDS en ppm
};

// Variables globales

```

```

float temperature = 0;
float tdsValue = 0;
// unsigned long lastUpload = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  // Inicializar WiFi
  initWiFi();

  // Inicializar LoRa
  initLoRaReceiver();

  Serial.println("Receptor LoRa iniciado. Esperando datos...");
}

void loop() {
  // 1. Se revisa si llegó un paquete LoRa
  int packetSize = LoRa.parsePacket();

  // Si el paquete tiene el tamaño esperado...
  if (packetSize == sizeof(SensorData)) {
    // 2. Se leen los datos y se actualizan las variables
    receiveData(packetSize);

    // 3. Se suben los datos a ThingSpeak inmediatamente
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
      uploadToThingSpeak();
    } else {
      Serial.println("Error: WiFi desconectado. No se puede subir a ThingSpeak.");
    }
  }
}

void initWiFi() {
  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
  Serial.print("Conectando a WiFi");

  int attempts = 0;
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && attempts < 15) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
    attempts++;
  }
}

```

```

if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
  Serial.println("\nConectado! IP: " + WiFi.localIP().toString());
} else {
  Serial.println("\nError en conexión WiFi");
}
}

void initLoRaReceiver() {
  LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);

  if (!LoRa.begin(433E6)) { // Misma frecuencia que el transmisor
    Serial.println("Error al iniciar LoRa!");
    while (1); // Detener ejecución
  }

  // Configurar parámetros
  LoRa.setSpreadingFactor(9); // Mismo SF
  // LoRa.setSyncWord(0xF3); // <<--- [CAMBIO 1] ESTA LÍNEA SE HA COMENTADO
  LoRa.enableCrc();

  Serial.println("LoRa receptor inicializado");
}

void receiveData(int packetSize) {
  SensorData receivedData;

  // Leer datos en la estructura
  if (LoRa.readBytes((uint8_t*)&receivedData, sizeof(receivedData)) == sizeof(receivedData)) {
    // Decodificar valores
    temperature = receivedData.tempRaw / 100.0; // Recuperar float
    tdsValue = receivedData.tdsRaw; // Entero

    Serial.print("Datos recibidos! Temp: ");
    Serial.print(temperature);
    Serial.print("°C, TDS: ");
    Serial.print(tdsValue);
    Serial.println(" ppm");

    // Mostrar calidad de señal
    Serial.print("RSSI: ");
    Serial.print(LoRa.packetRssi());
    Serial.print(" dBm, SNR: ");
    Serial.print(LoRa.packetSnr());
    Serial.println(" dB");
  } else {

```

```
        Serial.println("Error al leer paquete");
    }
}

void uploadToThingSpeak() {
    if (isnan(temperature) || isnan(tdsValue)) {
        Serial.println("Datos inválidos, no se suben");
        return;
    }

    HTTPClient http;
    String url = String(THINGSPEAK_API) +
        "?api_key=" + THINGSPEAK_KEY +
        "&field1=" + String(temperature) +
        "&field2=" + String(tdsValue);

    http.begin(url);
    int httpCode = http.GET();

    if (httpCode == HTTP_CODE_OK) {
        Serial.println("Datos subidos a ThingSpeak!");
    } else {
        Serial.print("Error en subida: ");
        Serial.println(http.errorToString(httpCode));
    }

    http.end();
}
```

Anexo 6. *Código en Python de los parámetros de calidad de agua en la Laguna de Burlan.*

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

try:
    df_dia1 = pd.read_excel('Resultados.xlsx') # Archivo del 28/09
    df_dia2 = pd.read_excel('Resultados1.xlsx') # Archivo del 29/09
    df_dia3 = pd.read_excel('Resultados2.xlsx') # Archivo del 30/09

except FileNotFoundError as e:
    print(f"Error: No se pudo encontrar un archivo. {e}")
    print("Asegúrate de que 'Resultados.xlsx', 'Resultados1.xlsx' y 'Resultados2.xlsx' estén en la misma carpeta.")
    exit()

df_dia1.rename(columns={'Fecha': 'created_at', 'Número de datos': 'Numero de Medicion'}, inplace=True)
df_dia2.rename(columns={'Número de datos': 'Numero de Medicion'}, inplace=True) # 'created_at' ya es correcto
df_dia3.rename(columns={'Fecha': 'created_at', 'Número de dato': 'Numero de Medicion'}, inplace=True)
# Combinar los datos de los tres días en un solo DataFrame
df_completo = pd.concat([df_dia1, df_dia2, df_dia3], ignore_index=True)
df_completo['created_at'] = pd.to_datetime(df_completo['created_at'])
df_completo['dia'] = df_completo['created_at'].dt.date
df_completo_sorted = df_completo.sort_values(by='Numero de Medicion')

sns.set_theme(style="whitegrid")

dias_unicos = df_completo_sorted['dia'].unique()

colores_temperatura = {
    dias_unicos[0]: 'blue', # Día 1 (28/09): Azul
    dias_unicos[1]: 'red', # Día 2 (29/09): Rojo
    dias_unicos[2]: 'orange' # Día 3 (30/09): Naranja
}

colores_tds = {
    dias_unicos[0]: 'green', # Día 1 (28/09): Verde
    dias_unicos[1]: 'brown', # Día 2 (29/09): Marrón
    dias_unicos[2]: 'purple' # Día 3 (30/09): Púrpura
}

plt.figure(figsize=(15, 7))

```

```

for dia in dias_unicos:
    datos_dia = df_completo_sorted[df_completo_sorted['dia'] == dia]
    color_dia = colores_temperatura[dia]

    plt.plot(datos_dia['Numero de Medicion'], datos_dia['Temperatura'],
             color=color_dia, linewidth=2.5, label=f'Día {dia}')

    plt.fill_between(datos_dia['Numero de Medicion'], datos_dia['Temperatura'],
                    color=color_dia, alpha=0.25)

temp_min = df_completo_sorted['Temperatura'].min()
temp_max = df_completo_sorted['Temperatura'].max()
margen_temp = (temp_max - temp_min) * 0.1
plt.ylim(temp_min - margen_temp, temp_max + margen_temp)
plt.xlim(left=0, right=df_completo_sorted['Numero de Medicion'].max() * 1.01)

plt.title('Análisis de datos de Temperatura', fontsize=16)
plt.xlabel('Número de Medición', fontsize=12)
plt.ylabel('Temperatura (°C)', fontsize=12)
plt.legend()
plt.grid(True, which="both", ls="--", color='black', alpha=0.15)
plt.tight_layout()
plt.savefig('grafico_temperatura_alta_resolucion.png', dpi=600, bbox_inches='tight')
plt.savefig('grafico_temperatura_vectorial.pdf', bbox_inches='tight')
plt.show()

plt.figure(figsize=(15, 7))

for dia in dias_unicos:
    datos_dia = df_completo_sorted[df_completo_sorted['dia'] == dia]
    color_dia = colores_tds[dia]

    plt.plot(datos_dia['Numero de Medicion'], datos_dia['TDS'],
             color=color_dia, linewidth=2.5, label=f'Día {dia}')

    plt.fill_between(datos_dia['Numero de Medicion'], datos_dia['TDS'],
                    color=color_dia, alpha=0.25)

tds_datos_reales = df_completo_sorted[df_completo_sorted['TDS'] > 0]['TDS']
tds_min = tds_datos_reales.min()
tds_max = tds_datos_reales.max()
margen_tds = (tds_max - tds_min) * 0.1
plt.ylim(tds_min - margen_tds, tds_max + margen_tds)
plt.xlim(left=0, right=df_completo_sorted['Numero de Medicion'].max() * 1.01)

```

```

plt.title('Análisis de datos de TDS', fontsize=16)
plt.xlabel('Número de Medición', fontsize=12)
plt.ylabel('TDS (ppm)', fontsize=12)
plt.legend()
plt.grid(True, which="both", ls="--", color='black', alpha=0.15)
plt.tight_layout()

plt.savefig('grafico_tds_alta_resolucion.png', dpi=600, bbox_inches='tight')
plt.savefig('grafico_tds_vectorial.pdf', bbox_inches='tight')
plt.show()

```

Anexo 7. Código en Python de los parámetros de calidad de agua en el Rio Amojú.

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

try:
    df = pd.read_excel('Mediciones.xlsx')
except FileNotFoundError:
    print("Error: No se pudo encontrar el archivo 'Mediciones.xlsx'.")
    print("Asegúrate de que el archivo esté en la misma carpeta que el script.")
    exit()

df.columns = df.columns.str.lower().str.strip()
columnas_estandar = {
    'fecha': 'created_at',
    'número de medición': 'Numero de Medicion',
    'número de datos': 'Numero de Medicion',
    'número de dato': 'Numero de Medicion',
    'temperatura': 'Temperatura',
    'tds': 'TDS'
}
df.rename(columns=columnas_estandar, inplace=True)

if 'created_at' in df.columns:
    df['created_at'] = pd.to_datetime(df['created_at'])
df_sorted = df.sort_values(by='Numero de Medicion').reset_index(drop=True)

temp_promedio = df_sorted['Temperatura'].mean()
tds_promedio = df_sorted['TDS'].mean()
print("--- Análisis de Promedios ---")
print(f"Temperatura Promedio: {temp_promedio:.2f} °C")

```

```

print(f"TDS Promedio: {tds_promedio:.2f} ppm")
print("-----\n")

sns.set_theme(style="whitegrid")

x_min = df_sorted['Numero de Medicion'].min()
x_max = df_sorted['Numero de Medicion'].max()
x_range = x_max - x_min
x_margin = x_range * 0.05 # Margen del 5% del rango de datos

plt.figure(figsize=(15, 7))
plt.plot(df_sorted['Numero de Medicion'], df_sorted['Temperatura'],
         color='royalblue', linewidth=2.5, label='Temperatura')
plt.fill_between(df_sorted['Numero de Medicion'], df_sorted['Temperatura'],
                color='royalblue', alpha=0.2)
plt.axhline(y=temp_promedio, color='red', linestyle='--', linewidth=2,
            label=f'Promedio: {temp_promedio:.2f} °C')

temp_min_val = df_sorted['Temperatura'].min()
temp_max_val = df_sorted['Temperatura'].max()
margen_temp = (temp_max_val - temp_min_val) * 0.1
plt.ylim(temp_min_val - margen_temp, temp_max_val + margen_temp)
plt.xlim(x_min - x_margin, x_max + x_margin)
plt.title('Análisis de Datos de Temperatura', fontsize=16)
plt.xlabel('Número de Medición', fontsize=12)
plt.ylabel('Temperatura (°C)', fontsize=12)
plt.legend()
plt.grid(True, which="both", ls="--", color='black', alpha=0.15)
plt.tight_layout()
plt.savefig('grafico_temperatura_alta_resolucion.png', dpi=600, bbox_inches='tight')
plt.savefig('grafico_temperatura_vectorial.pdf', bbox_inches='tight')
plt.show()

plt.figure(figsize=(15, 7))
plt.plot(df_sorted['Numero de Medicion'], df_sorted['TDS'],
         color='seagreen', linewidth=2.5, label='TDS')
plt.fill_between(df_sorted['Numero de Medicion'], df_sorted['TDS'],
                color='seagreen', alpha=0.2)
plt.axhline(y=tds_promedio, color='darkorange', linestyle='--', linewidth=2,
            label=f'Promedio: {tds_promedio:.2f} ppm')

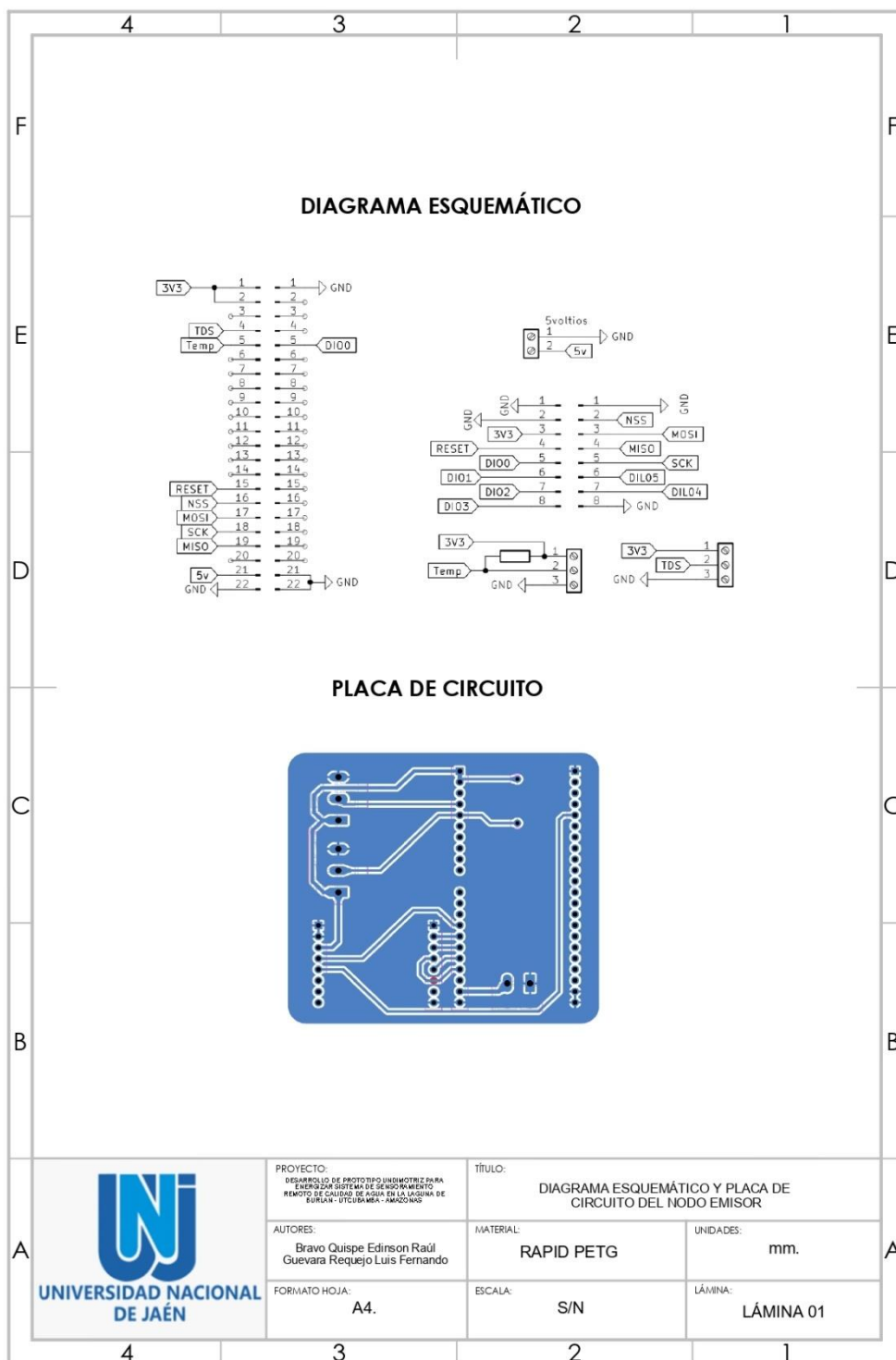
tds_datos_reales = df_sorted[df_sorted['TDS'] > 0]['TDS']
if not tds_datos_reales.empty:
    tds_min_val = tds_datos_reales.min()
    tds_max_val = tds_datos_reales.max()

```

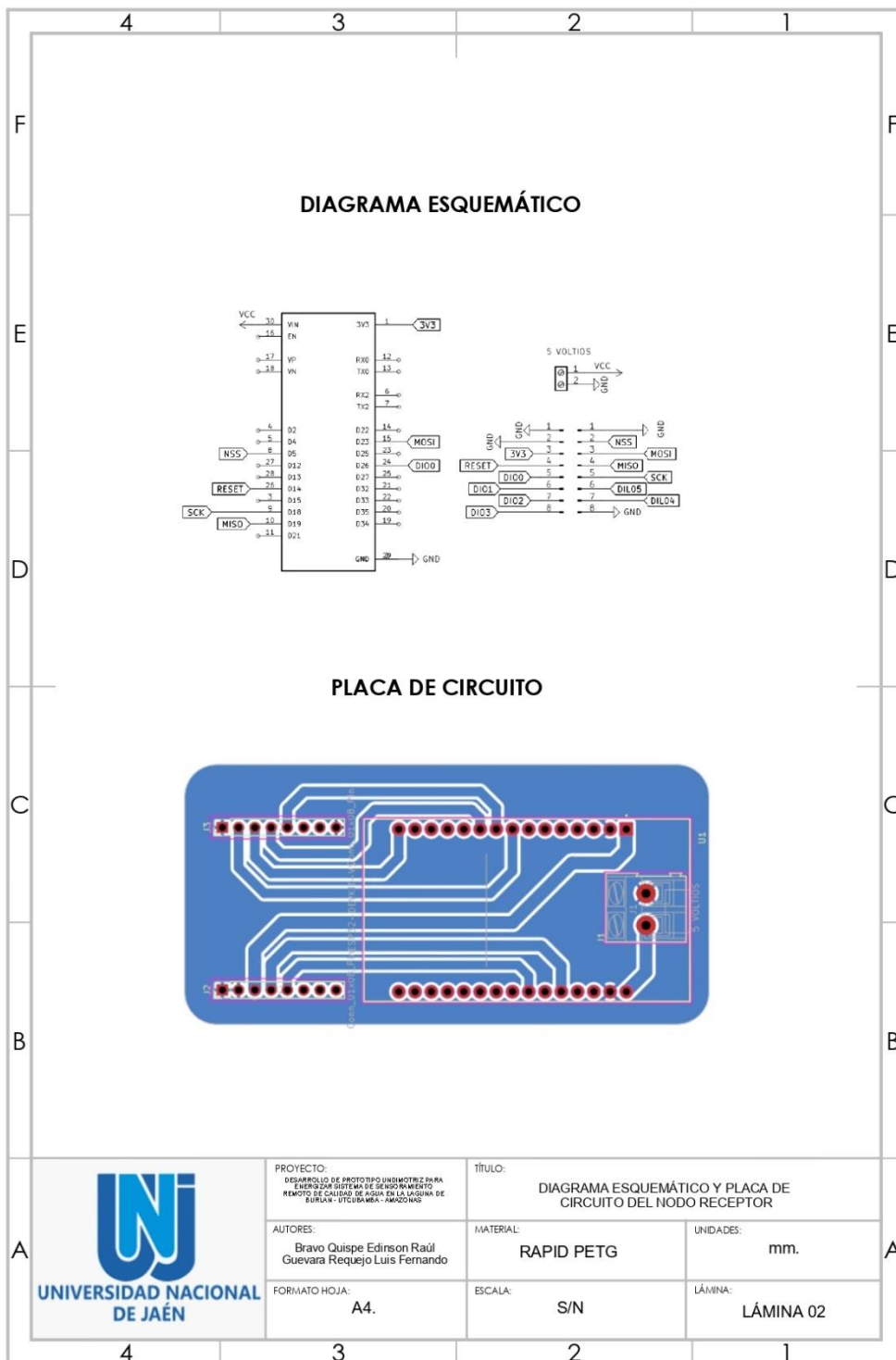
```
margen_tds = (tds_max_val - tds_min_val) * 0.1
plt.ylim(tds_min_val - margen_tds, tds_max_val + margen_tds)

plt.xlim(x_min - x_margin, x_max + x_margin)
plt.title('Análisis de Datos de TDS', fontsize=16)
plt.xlabel('Número de Medición', fontsize=12)
plt.ylabel('TDS (ppm)', fontsize=12)
plt.legend()
plt.grid(True, which="both", ls="--", color='black', alpha=0.15)
plt.tight_layout()
plt.savefig('grafico_tds_alta_resolucion.png', dpi=600, bbox_inches='tight')
plt.savefig('grafico_tds_vectorial.pdf', bbox_inches='tight')
plt.show()
```

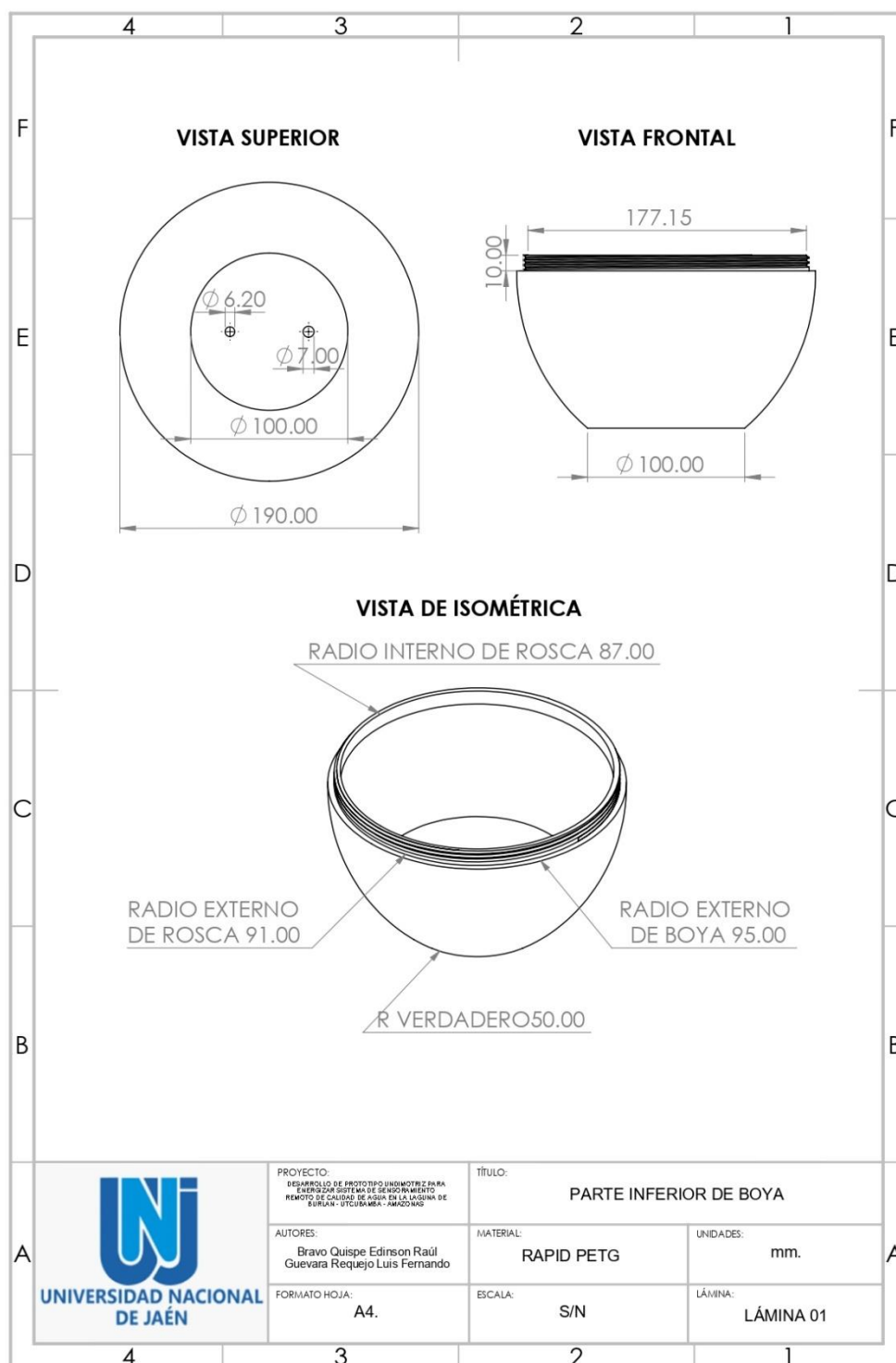
Anexo 8. Plano de Circuito Esquemático y Placa de nodo Emisor.



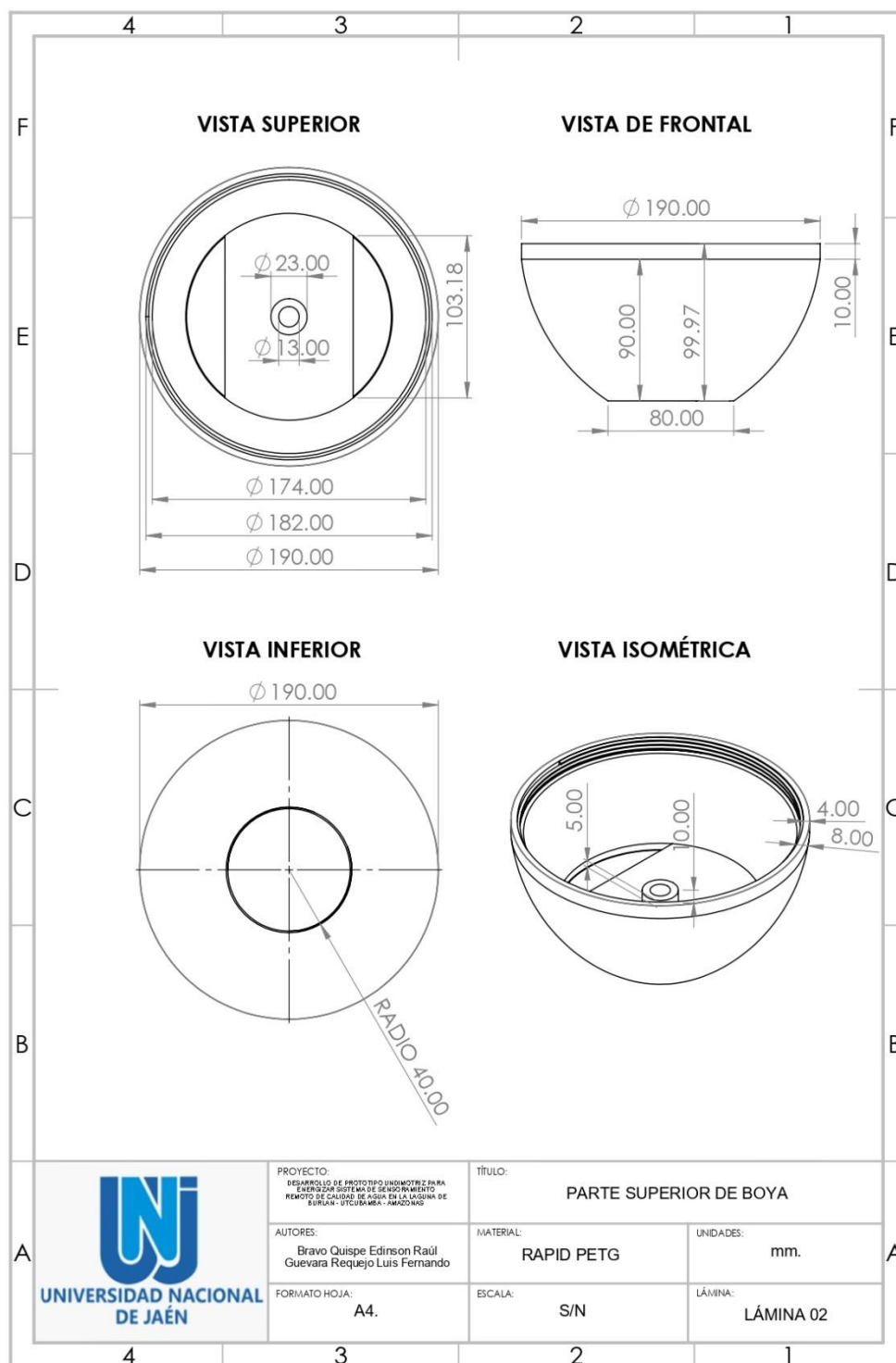
Anexo 9. Plano de circuito Esquemático y Placa de nodo Receptor.



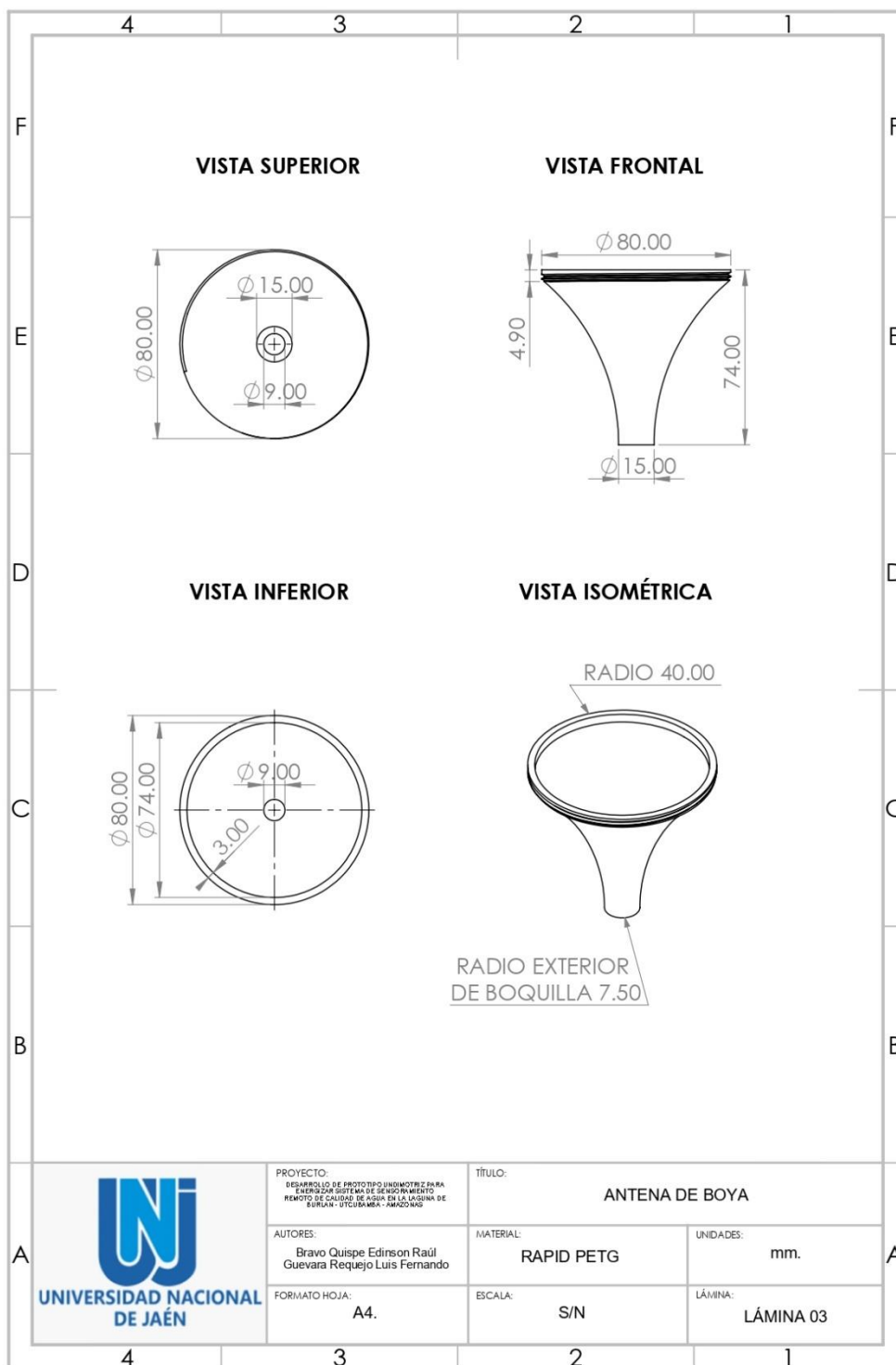
Anexo 10. Plano de Parte Inferior de Boya



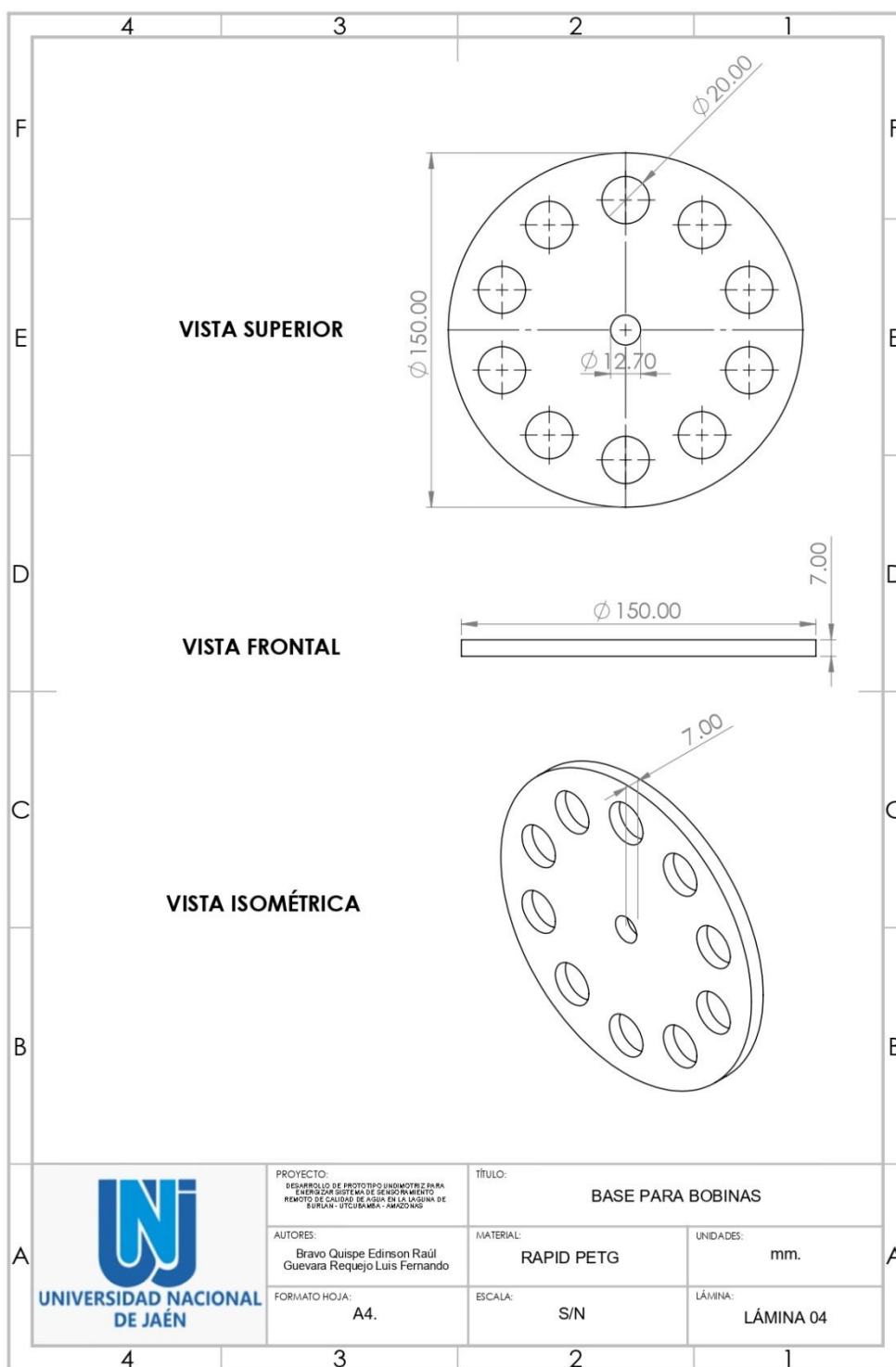
Anexo 11. Plano de Parte Superior de Boya.



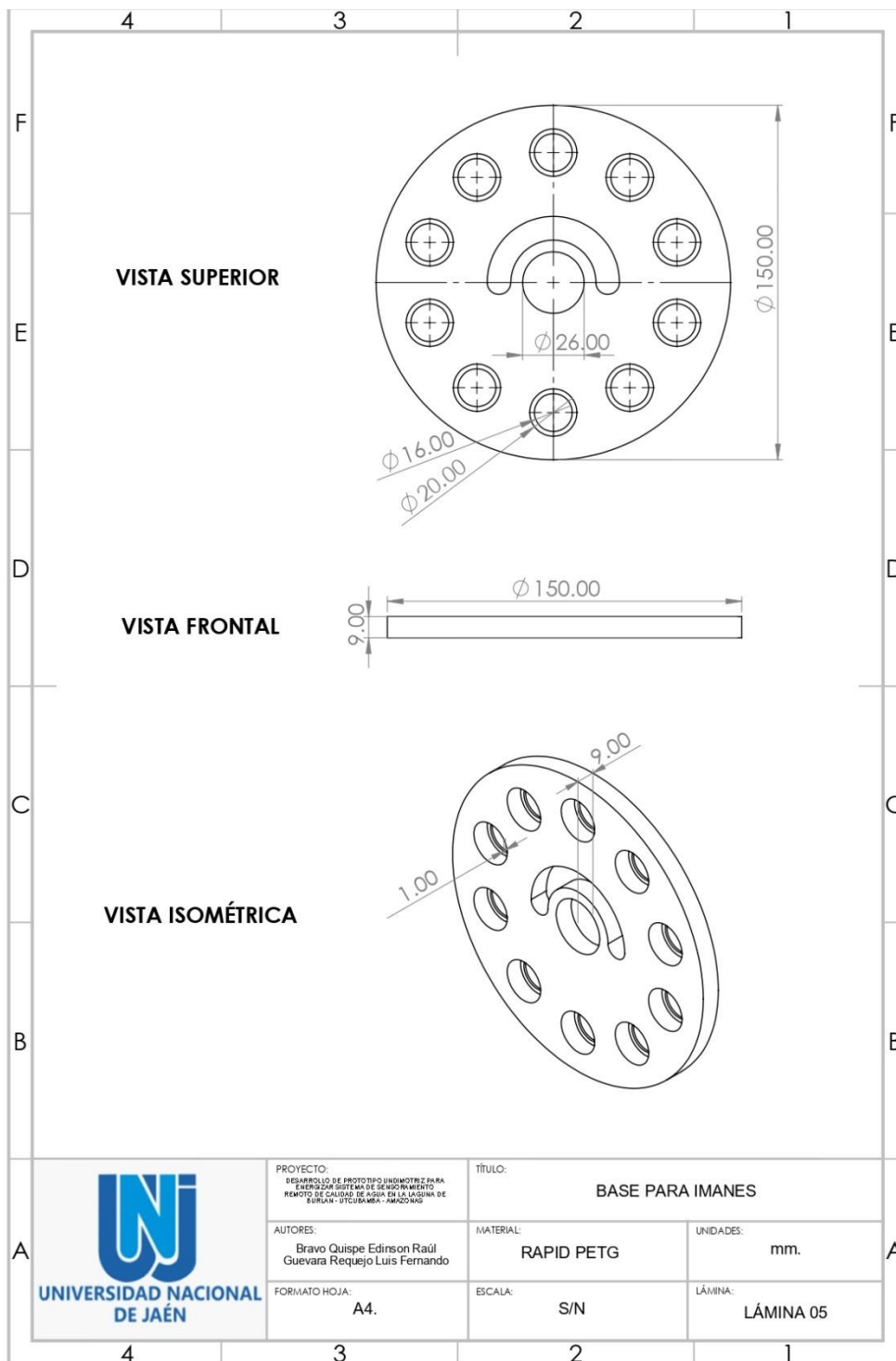
Anexo 12. Plano de Antena de Boya.



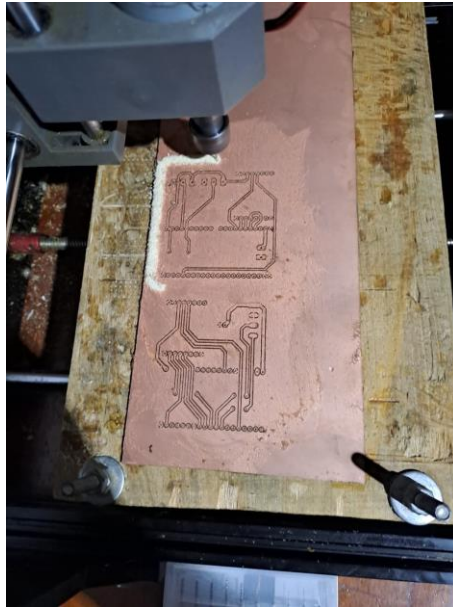
Anexo 13. Plano de Base para Bobinas.



Anexo 14. Plano de Base para Imanes.



Anexo 15. *Fresado de placa de circuito (PCB).*



Anexo 16. *Soldando componentes a la placa de circuito.*



Anexo 17. *Armado interno de la boya parte inferior.*



Anexo 18. *Ensamblado de la electrónica interna de la Boya.*



Anexo 19. *Ensamblado de la antena al LoRa.*



Anexo 20. *Actualización de código al borde de la Laguna de Burlan.*



Anexo 21. *Pruebas realizadas en la laguna de Burlan.*



Anexo 22. *Fotografía de los tesistas junto a la Boya en la Laguna de Burlan.*



Anexo 23. *Prueba y rectificación de la toma de datos dentro de la Laguna.*



Anexo 24. *Pruebas de la Boya en el Río Amojú.*



Anexo 25. *Funcionamiento de Boya dentro del Río Amojú.*



Anexo 26. *Prueba de toma de datos en el Río Amojú junto al Asesor.*

