

Máster Universitario en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas (META)



Trabajo Fin de Máster

Extracción de los Parámetros de Oleaje y Mareas en Estructuras Offshore de Acuicultura Empleando un Sistema Empotrado de Medida Inercial de Ultra Bajo Consumo

Autor: D. Juan Montiel Caminos
Tutor(es): Dr. Carlos Javier Sosa González
Fecha: Diciembre 2022

Máster Universitario en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas (META)



Trabajo Fin de Máster

**Extracción de los Parámetros de Oleaje y Mareas en
Estructuras Offshore de Acuicultura Empleando un
Sistema Empotrado de Medida Inercial de Ultra Bajo
Consumo**

HOJA DE FIRMAS

Alumno: D. Juan Montiel Caminos Fdo.:

Tutor: Dr. Carlos Javier Sosa González Fdo.:

Fecha: Diciembre 2022

Máster Universitario en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas (META)



Trabajo Fin de Máster

Extracción de los Parámetros de Oleaje y Mareas en Estructuras Offshore de Acuicultura Empleando un Sistema Empotrado de Medida Inercial de Ultra Bajo Consumo

HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación:

Presidente Dr. Pablo Hernández Morera Fdo.:

Secretario Dr. Alfonso Medina Escuela Fdo.:

Vocal Dr. Gustavo Marrero Callicó Fdo.:

Fecha: Diciembre 2022

Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo incondicional.

A mi tutor, Carlos Javier Sosa González, por su infinita paciencia y vocación.

Este trabajo se ha realizado en el marco de las actividades de investigación que comprende el proyecto MOONLIGHT, que cuenta con el apoyo del MICINN con referencia PID2020-117251RB-C21.

“En algún lugar, algo increíble está esperando a ser descubierto.”-Carl Sagan

Resumen / Abstract

En este TFM se evalúan y desarrollan distintos algoritmos para la extracción de los parámetros de oleaje y mareas basándose en un sistema empotrado de ultra bajo consumo. Este sistema está orientado a determinar las corrientes marinas a distintas profundidades a partir de medidas inerciales. El microsistema de medida inercial se utiliza para desarrollar un instrumento que monitorice parámetros estructurales y ambientales en el proyecto “MOONLIGHT: MOORiNg Line sensInG for offsHore aquaculTure” (PID2020-117251RB-C21, Ministerio de Ciencia e Innovación, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada). Mediante los datos adquiridos (aceleraciones), durante una campaña a largo plazo de 189 días, se demuestra la correlación entre la frecuencia de aceleraciones y del oleaje y las mareas. Con la FFT (Transformada Rápida de Fourier), se han estudiado la frecuencia de las componentes dominantes de las mareas en alta mar a corto, mediano y largo plazo. Las frecuencias obtenidas están de acuerdo con las series de datos disponibles del Ministerio de Defensa en colaboración de Puertos del Estado. Dada las limitaciones de computación requeridas para resolver el algoritmo FFT en el microsistema, se ha desarrollado una solución práctica basada en un detector de picos-valles. El algoritmo propuesto se ha aplicado a las series de datos de campañas de largo plazo. El algoritmo se fundamenta en el promediado de un determinado número de muestras. Se trata de un filtro FIR digital, y una posterior resta de dos señales procesadas. El tiempo entre pasos por ceros es dos veces la frecuencia de interés. El algoritmo desarrollado y embarcado en el microsistema permite el aumento de las funcionalidades y hace posible prescindir de los datos crudos capturados y almacenar sólo las frecuencias y amplitudes de las corrientes oceánicas en la unidad de almacenamiento.

In this TFM different algorithms are evaluated and developed for the extraction of wave and tidal parameters based on an ultra-low power embedded system. This system is oriented to determine the sea currents at different depths from inertial measurements. The inertial measurement microsystem is used to develop an instrument to monitor structural and environmental parameters in the project "MOONLIGHT: MOORing Line sensIng for offshOre aquaculTure" (PID2020-117251RB-C21, Ministry of Science and Innovation, University of Las Palmas de Gran Canaria, University Institute of Applied Microelectronics). By means of the acquired data (accelerations), during a long term campaign of 189 days, the correlation between the frequency of accelerations and the wave and tides is demonstrated. With the FFT (Fast Fourier Transform), the frequency of the dominant components of the offshore tides in the short, medium and long term have been studied. The frequencies obtained are in agreement with the data series available from the Ministry of Defense in collaboration with Puertos del Estado. Given the computational limitations required to solve the FFT algorithm on the microsystem, a practical solution based on a peak-valley detector has been developed. The proposed algorithm has been applied to long-term campaign data series. The algorithm is based on the averaging of a certain number of samples. It involves a digital FIR filter, and a subsequent subtraction of two processed signals. The time between zero-crossings is twice the frequency of interest. The algorithm developed and embedded in the microsystem allows the increase of the functionalities and makes it possible to dispense with the captured raw data and store only the frequencies and amplitudes of the ocean currents in the storage unit.

Índice general

Índice de figuras	6
Índice de tablas	6
1. Introducción	11
1.1. Planteamiento y Objetivo	12
1.2. Estado del Arte	15
1.3. Organización de la Memoria	19
2. Equipos de Medida	21
2.1. Instrumental	21
2.2. Computación y Memoria	26
2.3. Resumen	27
3. Teoría y Medida	29
3.1. Principio de Operación	29
3.2. Evaluación de la Medida	31
3.2.1. El Oleaje	31
3.2.2. Despliegue en una Infraestructura Offshore	34
3.3. Resumen	37
4. Unidad de Medida	39
4.1. Equipo Hardware	39
4.2. Consideraciones Especiales	40
4.3. Operatividad Software	41
4.4. El planificador	42
4.5. Programador de Planificación	45
4.6. Consumo de Energía	48
4.7. Resumen	49

5. Fuentes de Error	51
5.1. Alineación	51
5.2. Frecuencia de Muestreo	52
5.3. Tiempo de Vida y Temperatura	53
5.4. Precisión	53
5.5. Resumen	54
6. Series de Datos	55
6.1. Experimentos	55
6.1.1. Ubicación	56
6.2. Datos Crudos	56
6.2.1. Veinticuatro Horas	60
6.2.2. Una Semana	65
6.3. Comparativa	67
6.4. Resumen	70
7. Extracción de la Frecuencia	73
7.1. Promediado	74
7.1.1. Filtrado	74
7.2. Detectando las Frecuencias	74
7.3. Algoritmo de Alto Nivel	76
7.4. Implementación	78
7.4.1. Datos de entrada	78
7.4.2. Implementación de Operaciones matemáticas	79
7.5. Resumen	80
8. Conclusiones y Líneas Futuras	83
Bibliografía	87

Índice de figuras

1.1. Dispositivo ADCP de alta resolución desplegado sobre banco de arena para la determinación del perfil de corrientes. Hábita mesofótico en Lanzarote, Islas Canarias.	14
2.1. Esquema de la instrumentación oceánica actual para la medición de corrientes marinas.	22
2.2. Diversos tipos de medidores de corriente basados en propela o rotor. Fuente [21].	23
2.3. Esquema de la propuesta presentada por los autores en [22].	23
2.4. Foto del prototipo de turbina presentada en [23].	24
2.5. Esquema de funcionamiento y foto del prototipo propuesto en [10].	25
2.6. Esquema de funcionamiento de la técnica ADCP.	26
2.7. Water Solutions. (Ltd.). [Perfilador Acústico de Corrientes Doppler instalado por la empresa Water Solutions en el fondo marino]. Recuperado el 19 de Octubre, 2022, de https://www.water-solutions.com/	27
3.1. Dispositivo de medida y teoría básica. 1) Dispositivo en reposo y 2) sometido a la fuerza F_W	30
3.2. Oleaje y su comportamiento en profundidad.	32
3.3. World oceans circulation map.	33
3.4. Ejemplo de infraestructura de acuicultura en alta mar para una matriz de 2×1 ; (a) vista superior y (b) vista lateral [34].	35
4.1. Diagrama de bloques del dispositivo de medida (a) y dispositivo fabricado (b). el prototipo de la fotografía fue utilizado en la campaña de toma de datos (2021), de más de 180 días a 25 m de profundidad	40
4.2. Esquema básico de ejecución del instrumento a evaluar.	41
4.3. Diagrama de modos, estados y fases del instrumento.	42
4.4. Cronograma de ejecución implementado en el medidor de corriente de aguas profundas propuesto para la ejecución de casos críticos.	44

4.5. Panel frontal del programador de planificación desarrollado.	46
4.6. Planificación de ejemplo para la captura de 3 ráfagas de aceleraciones durante 120 segundos.	48
6.1. Ubicación usada para evaluar la UM propuesta (a) mapa de las Islas Canarias en el Océano Atlántico (b) y (c) fotos satelitales de Gran Canaria y ubicación de las instalaciones de acuicultura en alta mar en el sur de GC(c.1): Infraestructura de Aquanaria S.L. , (c.2): Otras infraestructuras de acuicultura en alta mar(d) vista superior (e) una de las 2×6 matrices de jaulas utilizadas en nuestros experimentos	57
6.2. 256 muestras de datos crudos de aceleraciones	58
6.3. Representación en frecuencia de los datos adquiridos para diferentes números de muestras (a) 8192 muestras, (b) 1024 muestras y (c) 128 muestras para el eje vertical.	59
6.4. Adquisición de datos con las muestras de 1 día de (a) ACC_X , (b) ACC_Y y (c) ACC_Z aceleraciones.	61
6.5. Representación en el dominio de la frecuencia de los datos adquiridos para un día completo. (a) $FFT(ACC_X)$, (b) $FFT(ACC_Y)$ y (c) $FFT(ACC_Z)$	64
6.6. Representación en el dominio del tiempo de los datos adquiridos para una semana completa de muestras. (a) ACC_X , (b) ACC_Y y (c) ACC_Z	66
7.1. Respuesta impulsiva de un promediador de 4, 8 16 y 32 muestras (líneas azul, roja, naranja y violeta respectivamente). La línea verde representa una atenuación de 3 dB.	75
7.2. Respuesta temporal de un promediador de 4, 8 16 y 32 muestras dados 124 segundos de una señal muestreada a 12,5 sps.	76
7.3. Evolución de los cálculos del algoritmo propuesto en cada paso.	81
7.4. Evolución de los cálculos del algoritmo propuesto en cada paso.	82

Índice de tablas

4.1. Consumo de corriente en la adquisición de datos del peor corner-case. [35]	49
6.1. Comparativa entre soluciones industriales y de investigación.	69
7.1. Algoritmo de alto nivel para evaluar la frecuencia del ruido.	77

Capítulo 1

Introducción

La acuicultura es uno de los pilares I+D+I esenciales en la Unión Europea como área estratégica [1]. La expansión de sus productos y derivados para el público en general se ha incrementado exponencialmente. Hoy día es usual encontrar dichos productos de piscifactoría en cualquier comercio de alimentación de pequeña a gran superficie. La calidad en la manipulación de los pescados y/o mariscos alcanza niveles incluso superiores a los procedentes de la pesca tradicional. La diferenciación según procedencia del producto es casi imperceptible por el consumidor experto.

A medida que la demanda ha crecido, la industria de la acuicultura ha innovado, aplicando innumerables técnicas y metodologías con el objeto de incrementar la producción y reducir los costes. Tradicionalmente, las áreas de conocimiento que han aportado nuevas técnicas y métodos incluyen la genética, el control nutricional y del medioambiente, que corresponden a campos del conocimiento donde se desarrolla la actividad en sí. El fenotipo de las especies de interés, para esta industria, se ha optimizado para disponer de una buena base de reproductores que cumplan un conjunto de características de gran demanda. El ciclo reproductivo y la explotación de esos individuos reproductores, en la actualidad, marca la viabilidad de muchas especies debido a su largo ciclo de madurez reproductiva. A parte de los bien conocidos factores genéticos y fisiológicos, se sabe que otro punto importante del correcto desarrollo de los individuos es controlar el medio en el que se desenvuelven. Existe un compromiso entre bienestar animal y coste económico del producto. A medida que los productos empiezan a competir en los diferentes mercados, las instalaciones e infraestructuras deben optimizarse desde el punto de vista económico, y el ciclo de producción automatizarse. En el caso las instalaciones offshore o también conocidas como mar adentro, el oleaje y corrientes marinas juegan un factor importantísimo sobre el bienestar animal. El correcto emplazamiento de dichas instalaciones, por tanto, es clave en el control del medioambiente de crianza.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la ubicación y despliegue de este tipo de instalaciones requiere de permisos especiales por parte de la administración. Por ello, en muchos de los casos, la idoneidad de la localización de la piscifactoría se realiza con criterios medioambientales, entre los que se incluyen aspectos como el impacto visual. La explotación del litoral canario se encuentra hoy día dominados por espacios de ocio dedicado al sector turístico. Por todo ello, los emplazamientos disponibles para albergar estas infraestructuras se alejan de lugares que por su constitución se consideran ideales en términos de resguardo o seguridad marítima, como lo son las ensenadas, playas y bahías.

Aun entendiendo la solidez del estado del arte en mecánica de fluidos y el conocimiento exacto de las fuerzas mareomotrices, así como el movimiento mundial del agua oceánica, todos los estudios, hasta la actualidad, son meros modelos en la que diversos autores culminan su estudio con la especificación de la necesidad de medir localmente los parámetros de dichos modelos para reducir el error de los mismos. Todos los modelos planteados se encuadran dentro de los llamados macro-modelos, los cuales se particularizan a las peculiaridades de los lugares específicos a estudiar. Hay que tener en cuenta, por tanto, la necesidad de adquirir las series temporales de datos correspondientes a mareas y oleajes. En la actualidad la Armada Española como parte del Ministerio de Defensa y en colaboración con Puertos del Estado, dispone de una base de datos de libre acceso que permite comprobar dichas series de datos e incluso las previsiones a futuro.

La disponibilidad de datos de mareas y corrientes se circunscribe a los puertos del estado, y por tanto, en las localizaciones y emplazamientos de instalaciones offshore, estos datos se han de tomar con cierta precaución. Todo ello, lleva la industria a tomar medidas de carácter oneroso que consisten en sobredimensionar las instalaciones en previsión de eventos críticos que comporten riesgo estructural a la misma. Igualmente, es imprescindible la medida y análisis de las corrientes por mareas y oleajes reales que soportan dichas infraestructuras.

1.1. Planteamiento y Objetivo

La monitorización de parámetros físico-químicos de los océanos es una actividad científica de gran importancia y esencial, no sólo por la investigación relacionada con la previsión meteorológica, la predicción climática y estacional, sino por otras actividades relativas a la protección de los entornos marinos, la gestión pesquera, la seguridad marítima y la transición ecológica. Las medidas a largo plazo del perfil vertical de parámetros en áreas específicas oceanográficas contribuyen a la investigación oceanográfica, la predicción climática y la prevención de desastres.

De igual manera, obtener una gran resolución vertical y horizontal en las medidas de parámetros oceanográficos es de gran ayuda en la búsqueda de localizaciones de alta eficiencia energética para la extracción de energía de las mareas.

En varias décadas, se han desarrollado una considerable cantidad de estudios del océano utilizando métodos basados en perfiladores de medidas de parámetros. El término perfilador, es una adaptación al castellano del sinónimo anglosajón “profiler”. Un método basado en perfilar medidas de parámetros se fundamenta en el muestreo en el tiempo a distintas alturas y/o distancias de grandes series de datos siguiendo una trayectoria conocida, y que posteriormente, es post procesada –utilizando técnicas de interpolación– para la definición de mapas tridimensionales de datos.

Muchos de los estudios del océano con métodos basados en perfiladores se han realizado con dispositivos embarcados o amarrados a líneas de amarres. En ambos casos, la serie de datos obtenidas por el post procesado es global, y el coste para obtener las tendencias en el tiempo es alto. Los instrumentos convencionales utilizados en las campañas de datos requieren un costo considerable de recursos para su despliegue y utilización. Para el caso de instrumentos que son desplegados en líneas de amarre, la mejora en la resolución de la medida va de la mano del incremento de la densidad de muestras. De esta forma, muchos sensores se despliegan a lo largo de una línea de amarre, con la finalidad de obtener datos temporales en distintas posiciones de la línea.

El instrumento más utilizado para la obtención de parámetros oceanográficos relacionados con las mareas se basa en el efecto Doppler acústico. Se trata de un instrumento costoso, con limitación para operar de forma autónoma. En la Figura 1 se ilustra un perfilador de corriente de efecto Doppler acústico (ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler) de alta resolución que ha sido desplegado en la UPLGC para la caracterización del hábitat mesofótico en una campaña de datos en la isla de Lanzarote. Se ha demostrado que, para la obtención de medidas de largo plazo temporal, de más de 150 días, no es el instrumento adecuado. De igual manera, conectar dicho instrumento a una línea de amarre, conlleva un incremento del coste de operación y mantenimiento que hacen prohibitivo su despliegue.

En la actualidad, los sensores inerciales basados en sistemas microelectromecánicos (MEMS, MicroElectroMechanicalSystems) tienen características que son muy superiores a otros sensores utilizados para la medida de corrientes con turbinas, aspas o fundamentados en el efecto Doppler. En particular, los sensores inerciales MEMS no presentan problemas mecánicos, como es el caso de los basados en turbinas o aspas. Además, su reducido tamaño y consumo de potencia



Figura 1.1: Dispositivo ADCP de alta resolución desplegado sobre banco de arena para la determinación del perfil de corrientes. Hábita mesofótico en Lanzarote, Islas Canarias.

hacen reducir el costo del despliegue tecnológico, su mantenimiento y permiten incrementar los períodos de las campañas. Respecto a los instrumentos basados en efecto Doppler para la medida de la dinámica de las corrientes, los basados en MEMS no perturban a la vida animal, y no se ven afectados por las partículas suspendidas, o el movimiento de bancos de peces que introducen grandes errores en las series temporales.

En el proyecto coordinado FICASES (TEC2017-89403-C2, Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, Gobierno de España) se desarrolló un sistema empotrado (FICASES-ES) para el desarrollo de un instrumento para la medida de parámetros inerciales y ópticos que sería embarcado en misiones de largo plazo y gran profundidad. Este laboratorio a bordo de una cápsula (OBL, On-Board Laboratory), es un sistema autónomo que fue concebido para monitorizar parámetros mecánicos y ambientales en jaulas de acuicultura mar adentro. El sistema empotrado incluye comunicación RFID para la transmisión de datos y carga de baterías, un sistema inercial de tres ejes, un termómetro integrado, un medidor óptico en la banda azul, verde e infrarojo y varias interfaces orientadas a aplicaciones. OBL están encapsulado en una botella de aluminio aeroespacial que fue testado por encima de 5 bares de presión. En el proyecto JAULATLAS (European Union RIS3, FEDER, PROID2017010062), se realizó un despliegue de una red de sensores basados en OBL sobre las instalaciones de la empresa AQUANARIA en Castillo del Romeral (San Bartolomé de Tirajana, Las Palmas).

Actualmente, el proyecto coordinado MOONLIGHT (PID2020-117251RB-C21, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Gobierno de España) se centra en el despliegue de soluciones tecnológicas para dos funciones de monitorización muy demandadas en la acuicultura offshore: análisis ambiental y estructural. Dentro del análisis ambiental, la medida de turbidez permite

relacionar el bienestar animal y el impacto ambiental. La monitorización del estrés mecánico de las estructuras es de gran interés para establecer planes orientados al mantenimiento estructural de las instalaciones. Las series de datos medidos con los sensores inerciales cuando son desplegados en estas instalaciones incluyen información relativa al movimiento por las mareas, como no podría ser de otra manera.

En este Trabajo Fin de Máster (TFM) se evalúan distintos algoritmos para la extracción de los parámetros de oleaje y mareas basándose en un sistema empotrado de ultra bajo consumo. Este sistema está orientado a determinar las corrientes marinas a distintas profundidades a partir de medidas inerciales. El microsistema a emplear es un prototipo de instrumental desarrollado en la División MEMS, en particular en el proyecto “MOONLIGHT: MOORiNg Line sensInG for offsHore aquaculTure” (PID2020-117251RB-C21, Ministerio de Ciencia e Innovación, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada). El instrumento ha sido desplegado a distintas profundidades de los sistemas de amarre de la instalación offshore, para la obtención de los datos crudos de aceleración durante campañas de datos de más de 150 días. Los datos en crudo han sido procesados, aplicándoles técnicas de procesamiento de la señal con el fin de obtener los parámetros de mareas y oleaje.

1.2. Estado del Arte

Desde la antigüedad, la humanidad ha considerado a los océanos como una fuente de recursos. Además de las clásicas aplicaciones en el ámbito del transporte, y la pesca, han cobrado importancia otras nuevas como: la generación de energía o el despliegue de infraestructuras –por ejemplo, la acuicultura y aerogeneradores *offshore*.¹ El conocimiento del medio requiere el modelado del mismo. El comportamiento de los océanos ha sido y continúa siendo un tema candente de investigación [1]. Por tanto, la viabilidad de una solución tecnológica en el océano estará condicionada por el comportamiento de los océanos y la precisión de sus modelos. Centrados en esta idea, el modelo experimental de los vientos, las olas, las mareas y las corrientes son ampliamente estudiados en la literatura de investigación oceanográfica.

Desde un alto nivel de abstracción, la investigación oceanográfica asume la teoría de la circulación oceánica, que define un comportamiento de movimiento global [2]. Este modelo explica el flujo global de las aguas oceánicas en el planeta Tierra. Dado que global significa modelado a gran escala, el uso de la física oceánica, a nivel local requiere un grado de refinamiento superior,

¹A partir de un kilómetro de la costa medida en la pleamar.

es decir, una mayor granularidad, para obtener modelos confiables [3, 4].

En este sentido, en el estado del arte existen aproximaciones donde el objetivo es describir un lugar como estuario, costa, isla, península o infraestructuras acuáticas humanas como puentes, puertos entre otros [5, 6, 7, 8]. Por ejemplo, en [5], los autores evalúan las condiciones climáticas extremas en una bahía. Una conclusión importante de esta investigación es que la profundidad actual en el área de ubicación estudiada se ve afectada por la velocidad del viento y sus cambios de dirección. Por otro lado, la investigación presentada en [6] estudia el impacto de un tsunami en Corea del Sur e India. Utilizando el método de elementos espectrales (SEM) y el método de elementos de contorno (BEM), las olas de un día normal se comparan con datos de tsunamis reales recopilados de una estación de mareógrafos, obteniendo un modelo de alta precisión del comportamiento del océano en este escenario extremo. Desde un punto de vista ambiental, el trabajo en [7] expone la distribución y el flujo de micro-plásticos en el Océano Índico Sur. Usando las teorías del flujo oceánico global y el muestreo local, los autores representan el mapa de distribución de un gran conjunto de tipos de polímeros. En el área de investigación de sensores remotos, en [9] los autores evalúan el uso de varias constelaciones de satélites para medir la altura de las olas. Como conclusión, además de las clásicas alineaciones de mapas de bits y correcciones ópticas, los autores enfatizan que todos los sistemas remotos utilizados deben calibrarse con medidas locales debido a los desajustes entre sistemas.

Sin embargo, el medidor de flujo de corriente más extendido se basa en mediciones de inclinación [10]. Este instrumento se basa en un palo que contiene un inclinómetro. El ángulo del dispositivo determina la velocidad de la corriente de agua. A pesar de la utilidad de este enfoque, la principal limitación se debe a su propio principio de construcción. En primer lugar, el flujo de sección transversal medido en promedio es la longitud de la barra. En segundo lugar, el dispositivo debe estar sujeto a una estructura fija o fondo marino. Es bien sabido que el flujo de agua del océano reduce su velocidad cerca del lecho marino. De la misma manera, existen otros enfoques similares donde el palo se complementa con una boya [10]. Por otro lado, basado en el método Euleriano frente al Lagrangiano, la literatura de medidores de corriente de agua también presenta soluciones doppler [11, 13, 12, 14]. La velocidad de una columna de agua se mide en este enfoque. Esta solución se basa en la ubicación del eco. Es decir, se emite un pulso en una dirección específica y se detecta su reflejo. De hecho, esta solución mide la velocidad de las partículas que viajan a través de la columna de agua en estudio. Se debe tener en cuenta que la detección de una partícula depende de su tamaño y de los parámetros del pulso emitido (e.g. frecuencia, duración, amplitud, entre otros) [12]. Además, dado que no hay garantía de que las partículas, la fauna o cualquier otra cosa que cruce en el volumen evaluado viaje a la misma

velocidad que el agua medida, los datos obtenidos podrían no ser válidos. Finalmente, el esfuerzo computacional requerido para obtener la velocidad del agua es alto comparado con otros métodos en la literatura [14, 15].

Después de revisar en la literatura, los enfoques y aplicaciones anteriores, se concluye que todos ellos requieren la medición de velocidades de marea. En este sentido, independientemente de la metodología utilizada, los equipos de medición de mareas disponibles proporcionan la velocidad del agua en determinadas condiciones. Independientemente de si la medida se basa en los métodos Lagrangianos o Eulerianos, todos ellos requieren muestrear un conjunto de parámetros de mareas para proporcionar el valor requerido. Como resultado, se producen tiempos de espera de medio a largo plazo entre muestras, desde un par de segundos hasta más de una docena de minutos. En otras palabras, independientemente de la relación de muestreo real, estos equipos presentan una baja velocidad efectiva de adquisición.

Las infraestructuras marinas, y en particular las instalaciones de acuicultura en alta mar, requieren un alto grado de conocimiento sobre las fuerzas físicas que intervienen en los lugares donde se encuentran desplegadas. Probablemente uno de los mayores problemas es la fiabilidad del sistema de amarre. La ingeniería estructural emplea simulaciones basadas en el dominio de la frecuencia, debido a que brindan resultados bastante rápidos en comparación con las basadas en el dominio del tiempo. Sin embargo las simulaciones basadas en el dominio del tiempo proporcionan resultados muy precisos, debido a los altos requisitos de computo [16]. Desde un punto de vista práctico, en estudios de largo y medio plazo, las simulaciones en el dominio del tiempo no son una opción. Para la acuicultura offshore, y a pesar de que el objetivo de las simulaciones es determinar las fuerzas involucradas en el sistema de jaulas de acuicultura en alta mar, los datos proporcionados por los dispositivos de medición se fundamentan en la adquisición de la velocidad promedio. Además, el procedimiento de promediado filtra el comportamiento de las mareas y las olas eliminando la mayor parte de la información de frecuencia. Por lo anterior, los cálculos estructurales añaden un factor de seguridad para soportar casos extremos. A mayor factor de seguridad, mayor garantía anti-rotura y, obviamente, mayores costes de construcción y mantenimiento. Sin embargo, la monitorización de parámetros estructurales requiere de medidas precisas con información de frecuencia sin filtrar.

Se ha de tener en cuenta que la falla estructural en una instalación de acuicultura en alta mar generalmente implica un alto costo económico. No se trata solo de programar y ejecutar una operación de buceo para reparar o reemplazar una o más de una boya, red, línea de amarre o estructural, nudo de conexión o ancla. Cada incidente afecta total o parcialmente a la estructura

de la jaula y por tanto a la vida que la contiene. Por ejemplo, la rotura de una línea de amarre o la pérdida de una boya provocan la deformación de la jaula y de su soporte. El volumen de jaula modificado hace que la población contenida se acumule en un volumen reducido. Por lo tanto, su bienestar se ve sustancialmente disminuido hasta el punto de producir paros cardíacos masivos a los individuos debido al alto estrés [18]. Otro ejemplo es una red abierta o rota. Naturalmente, la vida silvestre ingresa a la jaula, pero normalmente los individuos contenidos tienden a escapar hacia la libertad. En el primer caso, el objetivo de la fauna entrante es engullir a los peces que viven en su interior. Y el segundo, produce un alto problema ambiental por la liberación descontrolada de los individuos que vivían en la jaula. En todos los casos, además del costo de la reparación, se ha de considerar una gran cantidad de dinero perdido por la fuga o muerte del espécimen.

En resumen, los medidores de mareas y corrientes proporcionan la velocidad de las aguas oceánicas, eliminando la información esencial requerida en el cálculo de estructuras y, además en la monitorización de las estructuras para garantizar y prevenir la falla de las infraestructuras en alta mar. En este sentido, este Trabajo Fin de Máster se alinea con la hipótesis de medir directamente las aceleraciones y frecuencias de las corrientes oceánicas en alta mar en lugar de las velocidades promedio. Las principales contribuciones del Trabajo Fin de Máster son las siguientes:

- Se presenta un nuevo instrumento basado en medidas inerciales. El dispositivo implementado se ha estado utilizando para adquirir datos experimentales en varias campañas marinas en alta mar. El instrumento inercial se basa en MEMS y tecnologías de sistemas integrados. El prototipo ha sido optimizado para un consumo de energía ultra-bajo, y se ha utilizado en campañas experimentales de más de 150 días. Se han obtenido mediciones experimentales de mareas y corrientes en las Islas Canarias mediante el despliegue de los dispositivos fabricados en infraestructuras de acuicultura en alta mar. Los resultados obtenidos se han cotejado con la literatura publicada hasta la fecha.
- A partir de la adquisición de datos se han obtenido las frecuencias de los componentes del dominio de las mareas en alta mar en mediciones de corto, mediano y largo plazo. Las aceleraciones de datos a lo largo de tres ejes principales se han pos-procesado a lo largo de 10 minutos (corto plazo), un día (medio plazo) y una semana (largo plazo). Los algoritmos que se han empleado en el análisis en el dominio de la frecuencia off-line, se han validado y los resultados verificados.
- Estos algoritmos para el análisis en el dominio de la frecuencia se analizan y transforman para su implementación en una unidad de computación en un sistema empotrado. La

aritmética utilizada es entera. Los resultados de procesamiento online se contrastan con los realizados offline. Es decir, se comparan las realizaciones en punto flotante y en aritmética entera desde el punto de vista de la precisión, resolución, consumo de potencia y velocidad de procesamiento.

1.3. Organización de la Memoria

El actual documento presenta la siguiente secuencia de capítulos:

- **Capítulo 1.** En este capítulo se expone el planteamiento de partida, los objetivos a desarrollar así como del estado del arte actual sobre la temática del presente TFM.
- **Capítulo 2.** En este capítulo se exponen las técnicas y métodos empleados para la medida del instrumento del que versa este TFM.
- **Capítulo 3.** En este capítulo se presenta el principio de operación, es decir el modo en el que el cumple su función el dispositivo de medida inercial utilizado en este TFM.
- **Capítulo 4.** En este capítulo se detallan las características y prestaciones del instrumento de medida bajo evaluación de este TFM.
- **Capítulo 5.** En este capítulo se expone las principales fuentes de error que están presentes en la toma de muestras y en los experimentos realizados para el desarrollo de este TFM
- **Capítulo 6.** En este capítulo se describen los datos extraídos de los experimentos realizados. Se detallan los datos sin procesar en el dominio del tiempo y se analizan los mismos en términos de la frecuencia en diferentes ventanas temporales.
- **Capítulo 7.** En este capítulo se desarrolla el algoritmo y su implementación a alto nivel para la extracción de los valores de frecuencia fundamentales presentes en las señales obtenidas a partir de la medida de aceleraciones inerciales con el instrumento presentado en este TFM.

Capítulo 2

Equipos de Medida

Este capítulo se centra en presentar las principales técnicas y metodologías empleadas para la medida instrumental que ocupa este TFM. En primer lugar se enumeran los tipos de instrumentos y el principio físico o de funcionamiento que emplean, para posteriormente comentar sus características en términos de computación requerida y memoria disponible.

2.1. Instrumental

El instrumental que permite caracterizar el comportamiento de los fluidos ha evolucionado con el tiempo. Las mediciones de flujo en el medio ambiente, en aplicaciones industriales, o tan específicas como en la tubería de una vivienda, son ejecutadas con técnicas y equipos muy diversos y diferentes entre sí. En la inmensa mayoría de aplicaciones industriales, el dispositivo empleado se denomina caudalímetro. Este puede basarse en las mediciones de flujo volumétrico, flujo másico, diferencias de presión u otros parámetros dinámicos o equivalentes, pudiendo ser su principio de funcionamiento basado en sistemas sensoricos mecánicos, acústicos, electromagnéticos u ópticos [17]. Otra serie de aplicaciones respecto a la metrología involucra la monitorización de desplazamientos y deformaciones de estructuras naturales y antropogénicas bajo fuerzas ambientales, como fenómenos de marea, tectónicos, o cambios en el nivel del agua subterránea. En cada aplicación, se selecciona el método de medida idóneo en función de los requisitos de la aplicación, sus bondades y defectos de la técnica de medida a implementar [19].

El esquema de la Figura 2.1 se presenta las técnicas y metodologías empleadas dentro de la instrumentación oceánica existente con el fin de medir corrientes marinas, tanto en aguas someras como aguas profundas.

Los medidores de corrientes marinas mecánicos más simples son los predecesores de los muchos sensores modernos de última generación. Estos usan de un dispositivo tipo propela, un rotor

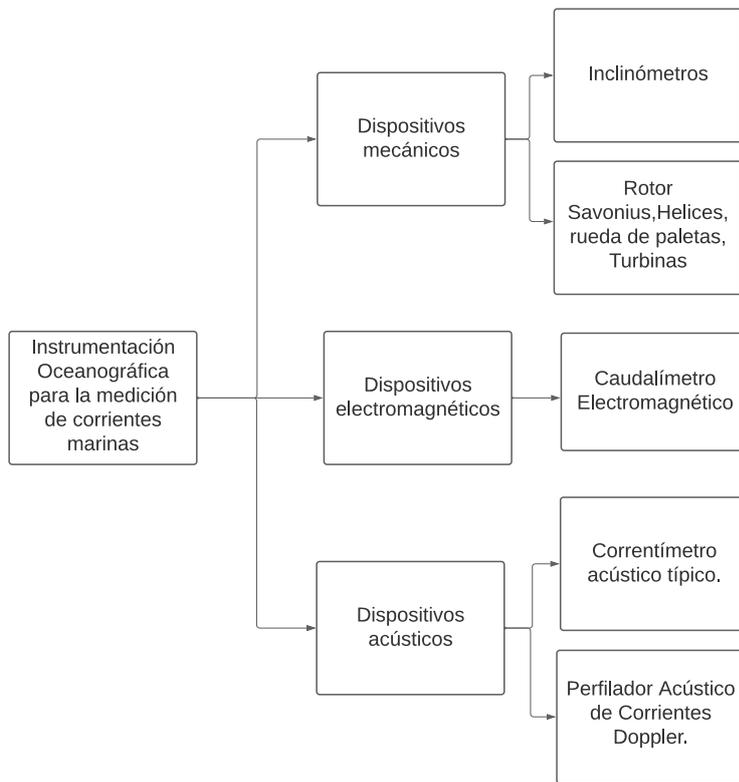


Figura 2.1: Esquema de la instrumentación oceánica actual para la medición de corrientes marinas.

Savonious o un rotor de rueda de paletas. En este caso, el instrumento es orientado hacia la dirección del flujo de agua. Estos dispositivos mecánicos permiten medir la velocidad de la corriente marina a través de la rotación de sus aspas. Una paleta vertical permite medir la dirección de la corriente (véase la figura 2.2). En ellos se mide la velocidad contando las revoluciones de la hélice o rotor por unidad de tiempo. Es decir, estos dispositivos incluyen un cálculo integral o uno medio sobre un intervalo de tiempo conocido. Es decir, se contabilizan un número de revoluciones en un intervalo de tiempo para dar una medida, en la orientación de la paleta vertical, que indica la dirección de la corriente.

Dentro de los dispositivos mecánicos, una aplicación clásica para medir el flujo de corriente es usando una turbina. Los autores, en [20] estudian el efecto del diámetro interior del rotor, en el rendimiento de una turbina de corriente oceánica de eje horizontal. Este trabajo se centró en la variación del diseño del rotor frente a la velocidad de flujo constante, i.e. se supone una velocidad media constante del flujo de agua. El objeto de este trabajo es aumentar el rendimiento de la turbina, centrándose en optimizar el diámetro interno del rotor Savonius.

En muchas ocasiones, estos instrumentos de medida son empleados en aplicaciones emergentes ajenas a la instrumentación. Ese es el caso que se presenta en [22]. En la figura 2.3 se puede

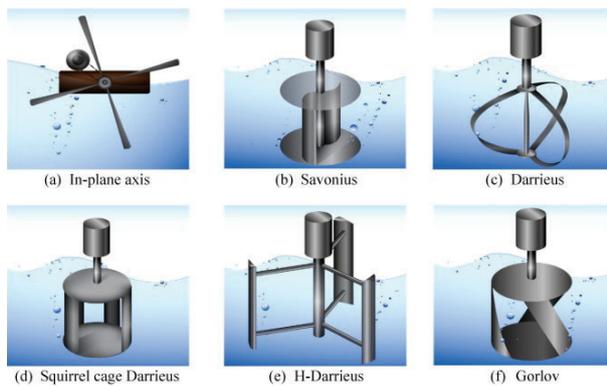


Figura 2.2: Diversos tipos de medidores de corriente basados en propela o rotor. Fuente [21].

observar un esquema de la propuesta presentada en esta aportación. En ella, los autores evalúan la importancia del sistema de amarre y la interacción entre el lecho marino, una boya sumergida y la turbina. En este escenario, el objetivo del artículo es la generación de energía y el interés de los autores se centra en reducir las sacudidas en el empuje del agua sobre la rotación de la turbina. Dicho de otra forma, los autores están interesados en la obtención de un valor medio de velocidad, minimizando sus valores de pico, para así garantizar un valor de rotación casi constante en la generación de energía.

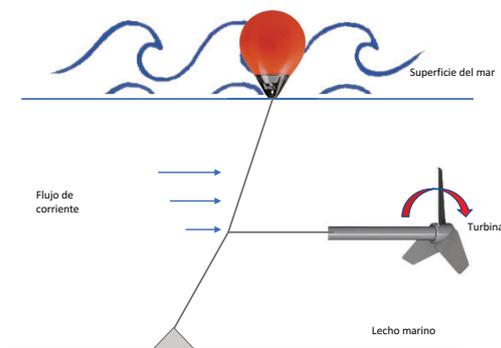


Figura 2.3: Esquema de la propuesta presentada por los autores en [22].

Por otro lado, los autores de [23] han diseñado y construido una turbina mareomotriz del tipo rueda de paletas a escala real Véase la figura 2.4 para más detalle. En ese trabajo, los autores se han centrado en analizar la estabilidad y el rendimiento del dispositivo amarrado a un solo punto de anclaje en aguas profundas. La ventaja de acotar la aplicación a aguas profundas frente al estudio descrito en el párrafo anterior es que en las llamadas aguas profundas, el movimiento del fluido no se ve sometido a las fuerzas/turbulencias que se producen en superficie motivadas, entre otras razones, por el viento. En resumen, en aguas profundas, los rangos de variación de las corrientes submarinas son menores que en la superficie y por tanto no hay que dedicar tanto esfuerzo a estabilizar los picos de corrientes ya que por natura no se generan.

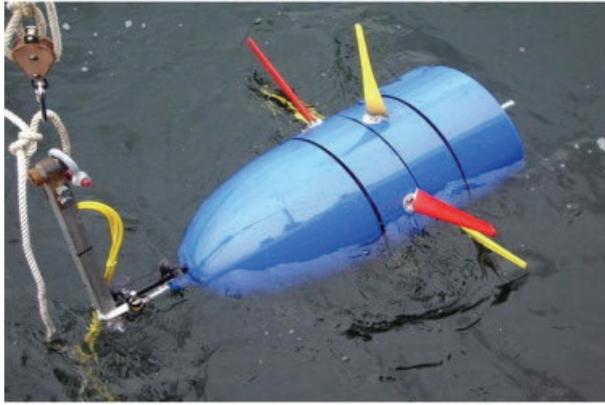


Figura 2.4: Foto del prototipo de turbina presentada en [23].

Es bien sabido que el flujo del agua del océano reduce su velocidad cerca del lecho marino. Por ello y siguiendo la pauta contraria al último enfoque propuesto, en [25], los autores discuten los elementos esenciales del diseño del sistema de amarre convertidores de energía flotantes a muy poca profundidad, en el rango de las olas. En este estudio se propone un procedimiento de diseño del sistema de amarre para dichos convertidores de energía. Frente al caso anterior en la que se buscaba una respuesta media cuasi continua del flujo del agua, en este caso se busca extraer la energía de la variación de dicha velocidad.

Todos los dispositivos presentados no dejan de ser instrumentos válidos para realizar medidas de velocidad. Teniendo claro que su implementación ha sido adaptada para maximizar la generación de energía, y que se potencia eliminar o reducir los comportamientos transitorios, su validez se ve comprometida cuando no se miden valores medios. Dicho de otra forma. Dado que el sistema de medición se ve modificado según el comportamiento del agua, este enfoque no es sensible a los eventos transitorios en el océano. Sin embargo, es necesario insistir que este método sigue siendo válido para medir velocidades medias durante períodos de tiempo prolongados. Este tipo de dispositivos mecánicos no son confiables para la medición de corrientes marinas en la capa superficial del océano puesto que en esta capa el movimiento oceánico es debido en gran medida por el oleaje y el viento.

El medidor de flujo de corriente marina más extendido por su uso, robustez, sencillez, y costo, está basado en mediciones de la inclinación [10]. Este instrumento consiste en un soporte que se asemeja a un bastón o simplemente un palo al que se le incorpora un inclinómetro (véase la figura 2.5 para más detalle). El ángulo del dispositivo de medida determina la velocidad de la corriente del agua. Su principal limitación se debe a su principio constructivo. En primer lugar, el flujo medido se corresponde con la sección transversal de la barra/palo que constituye el instrumento. En segundo lugar, el dispositivo debe estar sujeto a un punto fijo. Es decir ha

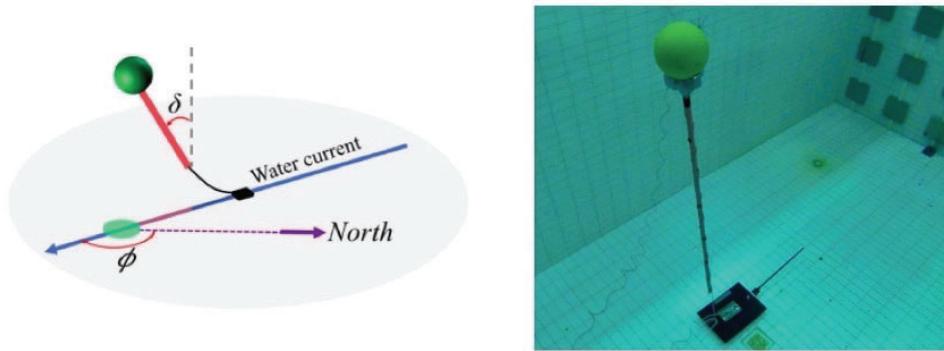


Figura 2.5: Esquema de funcionamiento y foto del prototipo propuesto en [10].

de instalarse en una estructura fija o en el fondo marino. De la misma manera, existen otros enfoques donde el palo se complementa con una boya. Por último, la robustez se debe a que dispone de menos partes móviles que otros instrumentos presentados.

Hasta ahora se han presentado instrumentos basados en el método Lagrangiano. En la literatura de instrumentos de medida de corrientes marinas, se presentan las soluciones Doppler como aquellas que se basan en métodos Eulerianos [11, 12, 13, 14]. Los llamados Perfiladores de Corrientes Doppler Acústicos (con las siglas ADCPs en idioma anglosajón) se basan en el principio de generación de un sonido que como onda viaja por el medio acuático donde se producen reflexiones. De tal modo que la medida de dicha reflexión de onda permite deducir la velocidad del medio por el que se transmite. Hay que tener en cuenta que los sistemas Doppler miden la velocidad de una columna de agua. Puesto que esta solución se basa en la ubicación del eco, el principio de funcionamiento de los dispositivos que emplean esta técnica de medida se basan en emitir un pulso en una dirección específica y detectar su reflejo.

De hecho, esta aproximación realmente mide la velocidad de las partículas que viajan a través de la columna de agua en estudio. Se debe tener en cuenta que la detección de una partícula depende de su tamaño y de los parámetros del pulso emitido (por ejemplo, frecuencia, duración, amplitud, entre otros) [12]. Además, dado que no hay garantía de que las partículas, la fauna o cualquier otro elemento que entre o salga del volumen evaluado y que su velocidad no tiene necesariamente que coincidir con la del flujo medido, los datos obtenidos podrían no ser válidos.

Por ejemplo, en [24] los autores, desarrollan un dispositivo innovador en el que implementan una solución Doppler de bajo coste para medir las corrientes superficiales del océano. Dicho estudio concluye que la mejor capacidad de medida para esta implementación basada en ADCP fue con altas velocidades de corrientes, poco oleaje y escaso viento. Fuera de ese escenario o

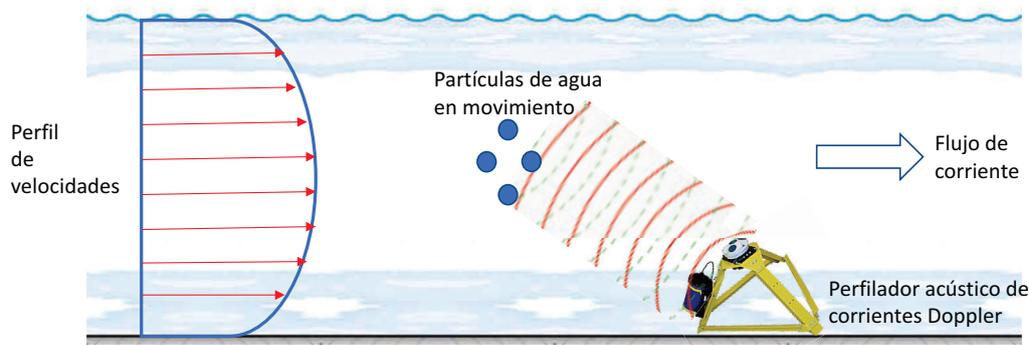


Figura 2.6: Esquema de funcionamiento de la técnica ADCP.

en términos del instrumental, fuera de ese rango de detección, o de funcionamiento óptimo, el equipo se ve afectado con grandes errores de medición, cuestionando su idoneidad para tal fin. Por otro lado, esta solución no permite conocer las corrientes oceánicas en aguas profundas ya que basan su medida en el propio oleaje y las corrientes superficiales.

En el ámbito de las medidas fluviales, los autores en [26], presentan la implementación, comparación y evaluación de tres metodologías diferentes para medir el caudal de un río. Usando un caudalímetro basado en el principio electromagnético realizan la medición de la descarga del río. Esta debe ser precisa, ya que es un dato ambiental clave y esencial para las simulaciones hidrológicas, independientemente de si el caudal es alto, medio o bajo. La metodología propuesta demuestra obtener un error de tan solo el 3% sobre el caudal real del río bajo estudio.

Finalmente, el esfuerzo de computación y energía requeridos por este tipo de soluciones basadas en los métodos Eulerianos, con el objeto de medir la velocidad del agua es alto en comparación con los otros métodos en la literatura [14, 15].

2.2. Computación y Memoria

Analizando las distintas soluciones publicadas o intuyendo el funcionamiento de los productos industriales con su escasa documentación, se puede determinar que en la actualidad los datos adquiridos por los instrumentos oceanográficos se pueden clasificar en tres niveles bien diferenciados en términos de esfuerzo computacional.

El más básico y por tanto menos costoso se basa en la cuenta de pasos por cero. Dentro de este tipo de instrumentos se puede encontrar los basados en rotores, paletas o turbinas. En un segundo nivel, se encuentran aquellos que realizan operaciones de promediado ya sea con las cuentas de pasos por cero o emitiendo una señal y cuantificando la potencia de la parte reflejada.

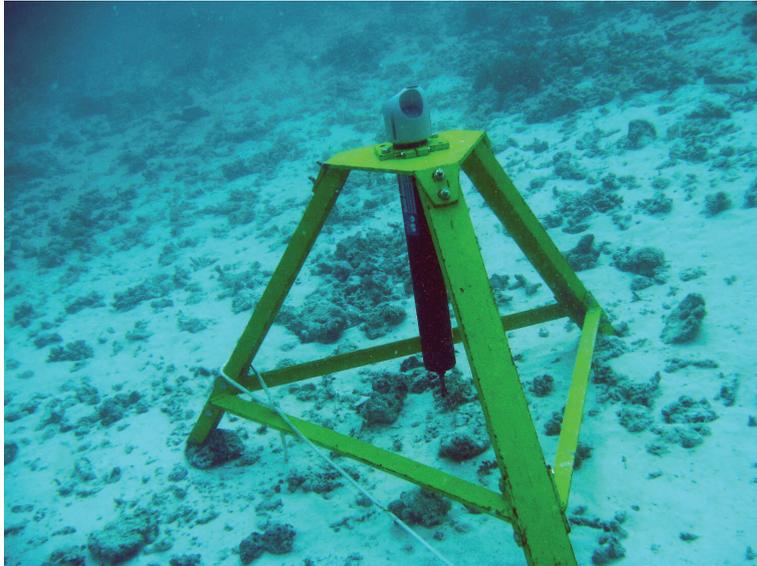


Figura 2.7: Water Solutions. (Ltd.). [Perfilador Acústico de Corrientes Doppler instalado por la empresa Water Solutions en el fondo marino]. Recuperado el 19 de Octubre, 2022, de <https://www.water-solutions.com/>

Por último, los de altas necesidades de computación. Ello se traduce en que el equipo de medida toma las muestras de datos y los almacena para posteriormente post-procesarlos, i.e., en un equipo de sobremesa donde las restricciones de consumo energético no están presentes. Todo ello a costa de incrementar la memoria disponible para almacenar muestras en el instrumento.

A modo de resumen, existe un compromiso entre el esfuerzo computacional requerido, memoria y energía disponible que son contradictorios entre sí. En caso de requerir un esfuerzo computacional mayor, será necesario disponer de mas energía.

2.3. Resumen

Después de revisar los enfoques y aplicaciones en la literatura, se concluye que, independientemente de la metodología utilizada, los equipos de medición de mareas disponibles proporcionan la velocidad del agua en determinadas condiciones medioambientales, que se ven afectadas en gran medida por la profundidad en la que se ha de realizar la medida.

Independientemente de si la medida se basa en los métodos Lagrangianos o Eulerianos, todos ellos requieren el muestreo de un conjunto de medidas para proporcionar el valor de velocidad esperado. Como resultado, se producen tiempos de espera, de medio a largo plazo entre muestras. Las tasas de medidas van desde un par de segundos hasta más de una docena de minutos. En otras palabras, se ha de tener en cuenta que la tasa de medidas por unidad de tiempo no se corresponde en ninguno de los casos estudiados con las frecuencias de muestreo reales a las que trabajan los sistemas de adquisición de los equipos de medida, tanto en la literatura como en las

soluciones comerciales. Esto se debe principalmente a que se realizan promediados del muestreo real para obtener el valor que presentan a su salida.

Por ello, independientemente de la frecuencia real de muestreo, estos instrumentos tienen una velocidad de adquisición efectiva baja. Además, ninguno de los instrumentos estudiados anteriormente proporciona información sobre las frecuencias involucradas debido a su propia concepción. Para obtener dichos datos hay que indagar en los manuales o los programas de planificación de experimentos que traen como de ejemplo para deducir dicho parámetro.

Una solución posible para anular este factor limitante es aumentar la frecuencia de muestreo de los instrumentos disponibles. Hay que entender que en la mayoría de los casos, estos equipos de medida marinos están desplegados en sitios que impiden una alimentación continua por lo que hacen uso de baterías. Por ello, cada instrumento ha sido diseñado para una frecuencia máxima de muestreo y usando metodologías de promediación aumenta su precisión garantizando su disponibilidad durante un periodo tiempo específico. Por lo tanto, cuando es posible aumentar la frecuencia de muestreo y/o reducir la ventana de promediación, se está incidiendo directamente en el tiempo de vida del equipo y/o en su precisión. Es decir, el rendimiento del instrumento se ve comprometido.

En resumen, los medidores de mareas y corrientes proporcionan sus medidas en términos de velocidad media. La eliminación de todas las componentes de alta frecuencia de dichos parámetros se demuestra un factor a tener en cuenta como fuente de error para los estudios en las nuevas aplicaciones emergentes sobre nuestros ríos, mares y océanos. Ese es el caso, por ejemplo, de las infraestructuras de acuicultura. Sus sistemas de monitorización han de velar por la integridad de no solo su sistema de amarre, sino de todas las estructuras de jaulas que contienen la población de la infraestructura. Los valores medios de velocidades permiten una primera aproximación al problema para obtener datos pre-eliminarios. Sin embargo, es conocido que dichos valores medios no son útiles para el análisis estructural. Con el objeto de garantizar casos extremos, las infraestructuras se sobredimensionan con factores de seguridad superiores a incluso siete veces a los cálculos realizados en base a valores medios de los esfuerzos a los que se somete. Se supone que la elección de dicho factor de seguridad incurre en un aumento de los costos de la instalación. La elección de dicho margen de seguridad se ajusta mejor si se dispone de las medidas y no de los valores medios de las medidas, con sus componentes de alta frecuencia. Este TFM se fundamenta en un dispositivo que propone medir directamente las aceleraciones y frecuencias de las corrientes oceánicas en alta mar en lugar de las velocidades promedio.

Capítulo 3

Teoría y Medida

En este apartado se presenta el principio de operación, es decir, el modo en el que cumple su función el dispositivo de medida inercial. Se describen tanto las leyes físicas como las propiedades que rigen los procesos que se realizan con el dispositivo, así como el diseño y materiales del que esta construido. Por otro lado, se relatan las consideraciones y condiciones de contorno para la implementación del dispositivo. Y en último lugar se describe la infraestructura y ubicación en la que se ha desarrollado las pruebas de concepto de este trabajo.

3.1. Principio de Operación

El dispositivo empleado es un instrumento para la medida de la velocidad de las corrientes de agua en mar abierto. Se caracteriza por ser un sistema de ultra baja potencia [27] orientado a campañas de tomas de datos, que son muestreos de larga duración. Emplea un acelerómetro para aplicar el principio de inclinación y arrastre de un péndulo como el presentado en la Figura 3.1. Si se asume que F_W es producido por el flujo de agua en movimiento, el ángulo θ es función de la velocidad del fluido donde el dispositivo esta sumergido.

En primer lugar, para medir correctamente este ángulo θ , la varilla de longitud L debe ser rígida. Por lo tanto, la medida es función de la masa M y del palo o alambre utilizado como varilla. Por otro lado, el objetivo es medir las fuerzas o aceleraciones del agua. Si se fija un acelerómetro de tres ejes a la masa M , se miden las aceleraciones tangenciales y centrípetas a los movimientos del péndulo, F_T y F_C , respectivamente. Sin olvidar el efecto de la fuerza gravitacional F_g y debido a que el instrumento se encuentra bajo el agua, se debe de considerar también la fuerza de flotabilidad F_B (Por claridad, no se ha incluido en la Figura 3.1). En oposición al vector gravedad, el vector flotabilidad tiene idéntica dirección, pero sentido contrario.

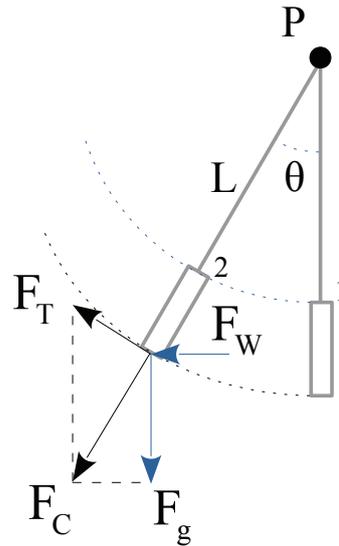


Figura 3.1: Dispositivo de medida y teoría básica. 1) Dispositivo en reposo y 2) sometido a la fuerza F_W .

Sus valores en módulo son:

$$F_g = M \times g, \quad (3.1)$$

$$F_B = \rho \times g \times V, \quad (3.2)$$

donde M es la masa del dispositivo sumergido (kg), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), ρ es la densidad del agua salada (kg/m^3), y V el volumen del dispositivo (m^3). Suponiendo que el péndulo está en equilibrio (ver posición 1 en la Figura 3.1). El sistema de fuerzas se formula como:

$$T_{lb} = F_g - F_B = g \times (M - \rho \times V) \quad (3.3)$$

Es decir, la fuerza de tensión T_{lb} sostenida por la barra es la fuerza de gravedad restada de la fuerza de flotabilidad. Este estado de equilibrio define el límite inferior para el rango de fuerzas de tensión que debe de soportar la barra. La Ecuación 3.3 define el comportamiento en términos de flotabilidad de una masa hundida. Un valor positivo indica que la masa se moverá hacia la superficie del océano, mientras que un valor negativo indica que el objeto caerá al fondo del mar. Debido a que la masa está unida a una varilla, si la fuerza de tensión es positiva, el comportamiento es como un flotador y el negativo como un péndulo.

El resultado de fuerzas fuera del equilibrio (ver el punto 2 en la Figura 3.1 para identificar el escenario planteado), es la siguiente:

$$F_T + F_C = F_W + F_g + F_B, \quad (3.4)$$

donde F_T y F_C son las fuerzas mencionadas, tangenciales y centrípetas, respectivamente; F_W es la fuerza del mar F_g es la fuerza de gravedad y F_B la fuerza de flotabilidad.

3.2. Evaluación de la Medida

La Ecuación 3.4 modela las fuerzas involucradas en el comportamiento del medidor de corriente de mareas empleado. Como todo instrumento, este se diseña para permitir la evaluación objetiva de una o varias variables de entrada en un rango de trabajo para una precisión y error acotados.

Debido a que este dispositivo se emplea en el entorno de las infraestructuras de la industria acuícola en alta mar, se ha de tener en cuenta las características de las corrientes oceánicas, ya que estas son las que en última instancia determinan el comportamiento de las variables medidas. Por ello, es imprescindible analizar en profundidad la física de las corrientes oceánicas con el objeto de determinar los valores medios y rangos a medir, así como su correlación con la casuística que presenta el entorno de medida.

3.2.1. El Oleaje

En general se puede describir de forma subjetiva la superficie del océano, como una sucesión de picos y valles irregularmente distribuidos. Sin embargo, todas las investigaciones asumen en la literatura que las olas del océano se pueden describir en términos de su regularidad [28]. Pero también es cierto que existe la posibilidad de la aparición de olas no periódicas. En ese caso, las olas oceánicas irregulares puras son producidas por eventos inusuales como terremotos submarinos y tsunamis u objetos que caen al océano como meteoritos. Además, las aguas poco profundas con fondos marinos irregulares o los eventos climáticos extremos como huracanes también producen olas irregulares.

Sin embargo, independientemente de la complejidad de las olas del océano, este comportamiento se puede describir utilizando un modelo de Fourier. Por ejemplo, atendiendo a la elevación de la superficie del océano $\eta(t)$, sea esta descrita como la composición de varias funciones sinu-

soidales [29]. Esto es:

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{N-1} a_i \sin(\omega_i t + \phi_i), \quad (3.5)$$

donde a_0 es el nivel promedio de agua en la superficie del océano; a_i , w_i y ϕ_i son la amplitud, frecuencia y fase para cada componente sinusoidal N del modelo, respectivamente. La esquina crítica más simple de este modelo es aquella que describe una ola regular y por tanto periódica, la cual se corresponde a una única función sinusoidal. Como $\omega = 2\pi f$, el periodo de las olas del océano es $T = 2\pi/\omega$. En base a esto, es previsible que la fuerza F_W y por tanto las componentes de fuerza medidas de la Ecuación 3.4 tienen la misma forma que la Ecuación 3.5.

Por otro lado, hay un componente básico que siempre está presente. Cualquier gran concentración de agua, como los océanos o mares, se ve afectada por las fuerzas de atracción gravitatorias de la luna y el sol. Estas producen el movimiento del agua para restaurar su equilibrio. En el caso de aguas profundas, este movimiento de agua sigue un comportamiento armónico. Cada 6 horas, 12 minutos y 30 segundos hay un valor máximo o mínimo en cuanto al nivel de la superficie del océano. Se denominan marea alta y baja. En términos de la Ecuación 3.5, T es igual a 12,417 horas.

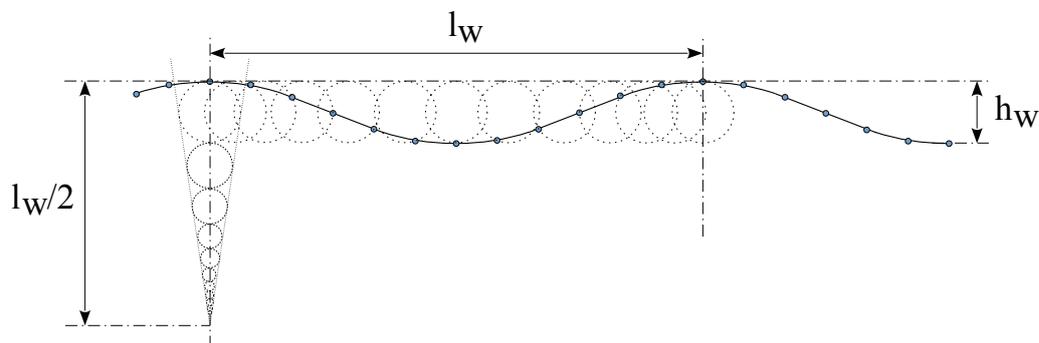


Figura 3.2: Oleaje y su comportamiento en profundidad.

Localmente, en la superficie del océano, el viento forma olas. Dependiendo de las fuerzas aplicadas, se crean una amplia variedad de diferentes tipos de ondas. Independientemente de la forma de ola oceánica formada, las corrientes que dan origen se conforman mediante la interacción de las corrientes originadas por el viento y las corrientes que concurren a varias profundidades. La literatura considera que la influencia de las olas generadas por el viento son despreciables a partir de una profundidad d_n igual o superiora a la mitad de la longitud de onda l_w (ver Figura 3.2 para mas detalles) de la ola producida por el viento.

$$d_n = l_w/2 \quad (3.6)$$

Este valor se usa como frontera para diferenciar las aguas someras de las profundas. En resumen, el comportamiento de las aguas someras, depende en gran medida del fondo marino, condiciones climáticas como viento, presión, y temperatura, entre otras, además de las fuerzas de atracción gravitatorias. En el caso de las aguas profundas, el comportamiento depende principalmente de las fuerzas gravitatorias, la temperatura y la salinidad. En general, la literatura de investigación considera que las aguas profundas están situadas entre los 7 y los 10 metros.

Además, es bien sabido que existe un límite de para la altura de una ola antes de romper [30, 31]. Si una ola alcanza una altura superior a la séptima parte de su longitud, la ola colapsa.

$$h_w(break) \geq l_w/7 \quad (3.7)$$

Finalmente, las aguas del océano no están tranquilas, en reposo, en ningún momento. Hoy en día se acepta la teoría de la circulación oceánica [33]. Debido principalmente a las atracciones de la luna y el sol, sin olvidar el aporte de los vientos aplicados a las superficies oceánicas, la salinidad y temperatura de las aguas profundas, y la plataforma de los continentes, entre otros factores, se produce un movimiento de circulación regular de las aguas oceánicas. La Figura 3.3 representa las principales corrientes oceánicas. La consecuencia es el que el agua del océano esta en constante movimiento y siempre mantiene la misma dirección [4].

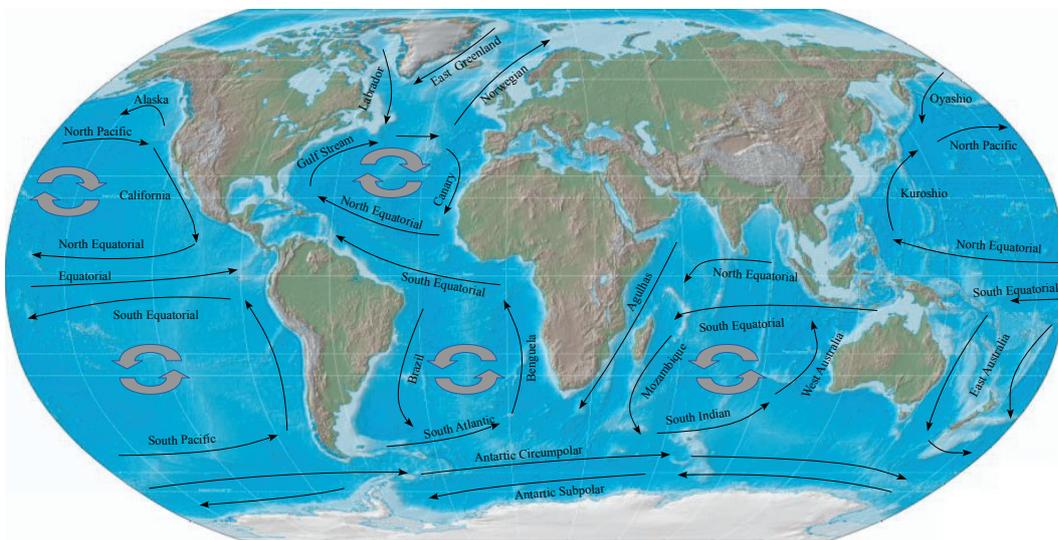


Figura 3.3: World oceans circulation map.

La propia literatura se basa en múltiples y diversas observaciones de los distintos escenarios climáticos acontecidos a lo largo del tiempo, incluso en periodos de muestreo de varios años. Se confirma que las estaciones o eventos climáticos extremos como las tormentas solo modulan el movimiento global del agua de los océanos, pero nunca cambian la dirección de sus corrientes de marea. Se ha de destacar que existen algunos estudios en la literatura sobre la influencia de los

fenómenos del cambio climático con el fin de evaluar la variación de estas corrientes oceánicas en un futuro no muy lejano [32].

3.2.2. Despliegue en una Infraestructura Offshore

La humanidad necesita cada vez más recursos y alimentos debido al crecimiento de su población. La industria alimentaria ha visto en la acuicultura una nueva oportunidad donde potenciar su expansión y por tanto obtener más recursos. Así mismo, desde un punto de vista medioambiental, la industria de la acuicultura se puede observar como una forma de reducir las técnicas de pesca tradicionales que agotan la vida de nuestros océanos. Ambas razones son la motivación de su crecimiento exponencial en los últimos años.

El impacto visual de las infraestructuras de acuicultura en alta mar es notable. En este sentido, su puesta en marcha no solo ha de cumplir con la normativa gubernamental en materia medioambiental, sino que entra en competencia directa con otras industrias muy arraigadas como el turismo, la pesca artesana o las infraestructuras portuarias. Aunque llama la atención su presencia en la superficie de los océanos, solo se observa una pequeña parte de la infraestructura [34]. En general, el volumen ocupado va desde la superficie hasta los 25 y 50 metros de profundidad (Véase la Figura 3.4 para mas detalles).

El despliegue de dicha infraestructura se ve sometida a las fuerzas del mar en el punto de despliegue. Por tanto, la instalación semi-sumergida se ve afectada en primer lugar por el viento, el oleaje y las corrientes de aguas poco profundas. Finalmente, dado que gran parte de la infraestructura está sumergida en las llamadas aguas profundas, se deben considerar también los efectos de las aguas profundas (Ver la derecha de la figura 3.4(b)) [36]. A tenor de los argumentos expuestos en el capítulo 3.2, las perturbaciones en el comportamiento de las aguas oceánicas debidas a costas irregulares, fondos marinos irregulares o aguas poco profundas, no están presentes en las fuerzas que actúan sobre las infraestructuras mar adentro u offshore. -el término "mar adentro" debe entenderse como lejos de la tierra firme, de la costa.

Como se puede observar en la figura 3.4, este tipo de infraestructura marina se compone de dos partes bien diferenciadas. Una es el sistema de amarre y la otra el de contención de la población. Específicamente, a la parte de la estructura de contención de población se le llama jaula. Con el objeto de minimizar el costo de la estructura dedicada al amarre, la disposición de las jaulas suele seguir un patrón matricial. En el ejemplo, se presenta una matriz de dos columnas y una fila única.

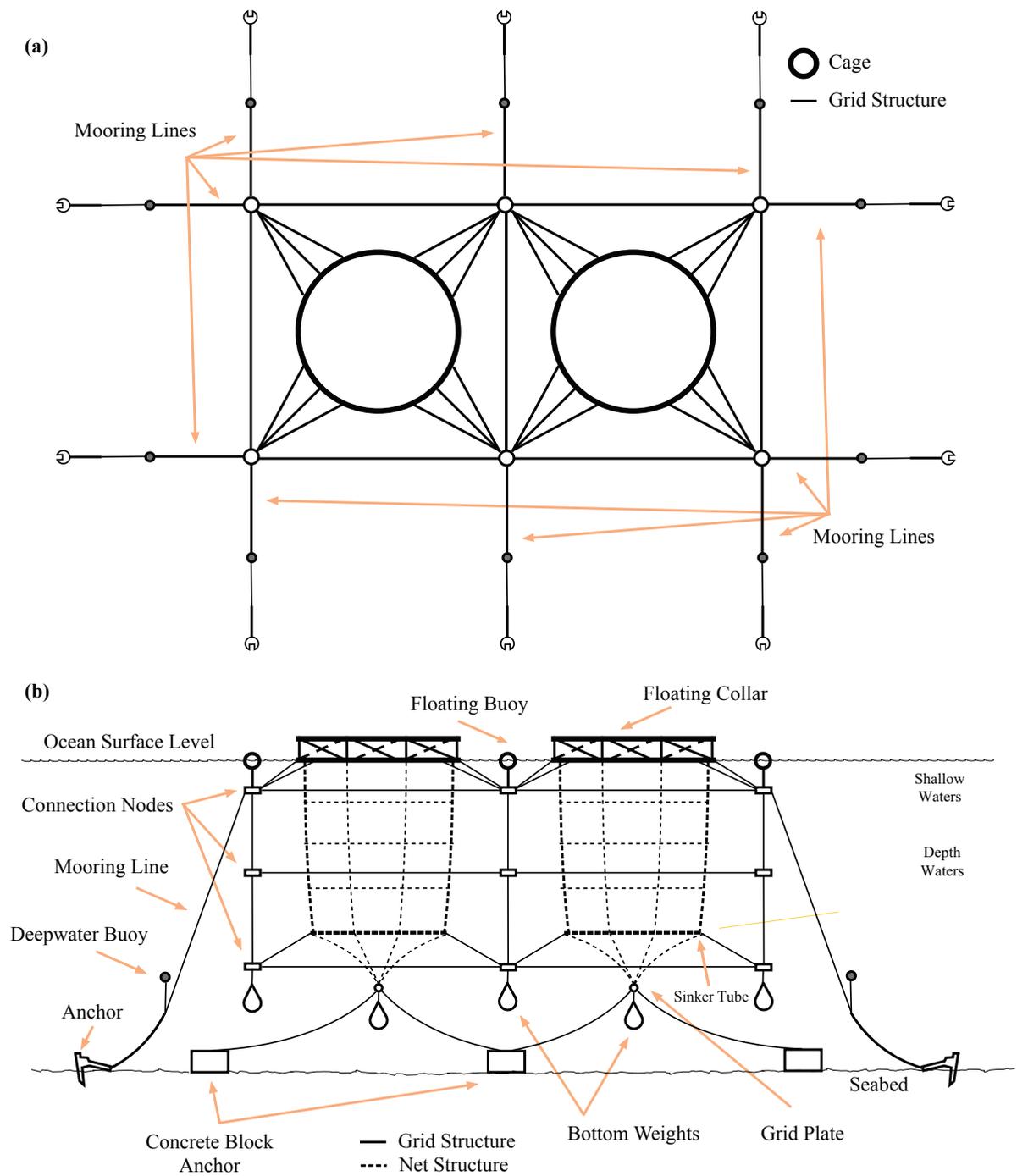


Figura 3.4: Ejemplo de infraestructura de acuicultura en alta mar para una matriz de 2×1 ; (a) vista superior y (b) vista lateral [34].

La jaula contiene a la población, pero su objetivo no es solo la de evitar que los individuos escapen de la instalación. También ha de protegerlos de los depredadores que la circundan. A efectos prácticos, la estructura de contención se construye empleando redes por lo general de polímeros sintéticos, los cuales garantizan la robustez y minimizan el peso. Por otro lado, esta estructura actúa como vela ante el flujo de aguas, de las corrientes. En otras palabras, se produce una fuerza de arrastre que ha de ser contrarrestada con una estructura auxiliar de soporte que se inserta como parte de la llamada jaula.

La jaula posee tres zonas bien diferenciadas; superficie, volumen intermedio y fondo. La sección en superficie se suele llamar collarín. Su función, en las estructuras semisumergidas, es la de dotar de flotabilidad al resto de la jaula, la cual cuelga literalmente de ella. Por otro lado, la altura del collarín fuera del agua, que es incluso cubierta con mallas, depende de la facilidad que tenga la especie alojada para saltar fuera del agua. Igualmente, dicha estructura en superficie puede ser parcialmente transitable, lo cual facilita en gran medida las tareas de mantenimiento estructural y/o alimentación de la población.

El fondo de la jaula es básicamente la parte de la estructura que cierra su volumen en la cota de profundidad mayor. Puede ser una malla, por ejemplo plana, construida específicamente para ello o un nudo de unión que agrupa todas las mallas que se han empleado en el resto de la jaula. Y por último, se tiene la parte central de la jaula que es en la que la población desarrolla su vida cotidiana.

La jaula como tal, no dispone de ningún sistema de posicionamiento/emplazamiento. Ese trabajo lo desarrolla el sistema de amarre. Este se compone de las líneas auxiliares de unión y el cabotaje de amarre. Las líneas auxiliares se componen de nodos y cabos que constituyen la unión entre jaulas y a la propia jaula como elemento independiente. La unión entre jaulas se realiza bajo la premisa de minimizar costes y por ello se suele emplear una disposición en matriz. Por otro lado, la jaula con sus redes y su estructura auxiliar de soporte no es suficiente para asegurar su integridad estructural frente a las fuerzas de las corrientes y mareas.

Las líneas de amarre están compuestas por sistemas de unión, cabotaje y anclaje. Mediante cabos y anillos de unión, se construye una estructura de columnas y largueros a las cuales se fijan las jaulas en múltiples puntos a distintas profundidades. Además estas columnas y largueros están fijados al lecho marino mediante largos cabos y anclas. Además se han de incluir numerosos pesos para contrarrestar la flotabilidad de la estructura en su conjunto y así garantizar su

verticalidad. Por último, recordar que dada una cota de altitud o profundidad fija, la posición relativa con la superficie del mar cambia. Ello implica que toda la estructura posee una variabilidad de posicionamiento vertical que ha de ser absorbida por la estructura de amarre. La solución adoptada en general es emplear cabos largos y hacer uso de catenarias variables.

3.3. Resumen

En este capítulo se ha estudiado el modelo de comportamiento del dispositivo de medida inercial. Este se basa en el principio de inclinación y arrastre para la medición de las fuerzas implicadas sobre él. El dispositivo al estar en el agua y en concreto, en el mar, hay que considerar una serie de fuerzas que actúan sobre él. Estas fuerzas son la fuerza de flotabilidad y la gravitación. Esta última implica que las mareas busquen el equilibrio gravitacional moviéndose y ejerciendo una fuerza sobre el dispositivo con un periodo determinado. El movimiento de las mareas debido a la fuerza de gravedad es periódico como se ha visto es cada 12,417 horas. Además el comportamiento de las corrientes oceánicas no es igual en la superficie que en aguas profundas. Esto implica una serie de condiciones de contorno y consideraciones a la hora de implementar una infraestructura para la práctica de la acuicultura.

El lugar ideal para el despliegue de infraestructuras relacionadas con la práctica de la acuicultura es un espacio marino protegido de las fuertes mareas y del viento, como bahías o en su defecto, playas. Sin embargo, estas áreas ya se encuentran ocupadas por otras industrias como infraestructuras portuarias o el turismo. La solución rápida y fácil es ubicar las nuevas instalaciones entre 1km y 3 km de la costa. En general, este rango de distancia proporciona un lugar donde las corrientes de aguas poco profundas no depende del fondo marino ni de la forma de la costa. En otras palabras, la mayoría de las turbulencias que aparecen en la costa no están presentes. Además, en la mayoría de los casos este rango de distancias se considera mar abierto. El despliegue elegido se sitúa en la plataforma continental. Las distancias mayores a 3 km han de ser estudiadas al detalle, ya que aumenta considerablemente el fondo marino hasta llegar a la llanura abisal.

Actualmente existe tecnología industrial para operar sin problemas hasta 2,5 km de profundidad -es el caso de la industria de extracción de petróleo mar adentro. Sin embargo, cuanto mayor es la profundidad, mayor es el costo y por lo tanto tiene que estar justificada la explotación. En el caso de la industria de la acuicultura en alta mar, para que sea rentable, la implementación y el mantenimiento operativo se realizan mediante herramientas marinas tradicionales. Los materiales utilizados en las infraestructuras incluyen boyas, anclas, cabos y redes; y la profundidad

de estas instalaciones está limitada a 35-150 metros, lo que corresponde a un emplazamiento de 1 a 3 km de la costa.

Capítulo 4

Unidad de Medida

Aunque en los capítulos anteriores se ha avanzado muchas de las características y prestaciones del instrumento de medida bajo evaluación, es imprescindible detallar sus capacidades y modo de funcionamiento. Esta información condiciona en gran medida los desarrollos y aplicaciones del instrumento.

4.1. Equipo Hardware

El instrumento a emplear es una implementación hardware basada en un sistema empotrado. Se ha desarrollado por completo dentro de la División de Microelectrónica y Microsistemas (DMEMS) del Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA). La Figura 4.1 muestra un diagrama de bloques básico que describe esta arquitectura y una fotografía de uno de los prototipos fabricados.

El sistema empotrado está compuesto por un μ controlador de un solo núcleo y un acelerómetro digital de tres ejes. El sistema está gestionado por el microcontrolador de ultra baja potencia. En este caso, es el MKL17Z256 de NXP. Este circuito integrado incluye un núcleo ARM Cortex M0+ con una velocidad máxima de 48 MHz, una memoria flash para programas y datos de 256 kB y 32 kB de memoria RAM. Además posee múltiples unidades periféricas como puertos de entrada salida digital, convertor analógico a digital, puertos de comunicación serie estándar como RS-232, I2C y SPI.

El microcontrolador se encuentra conectado directamente, mediante sus puertos I2C y SPI, a un acelerómetro y una memoria digital(uSD). También dispone de un subsistema de comunicaciones de radio frecuencia de baja frecuencia (LF-RFID). Sin embargo, este último no es objeto de evaluación en este TFM. Se hace uso como acelerómetro digital, el dispositivo de NXP MMA 8451Q. Posee tres ejes con 14/8 bit como elemento de medida inercial. Por otro lado, es

imprescindible incluir un acumulador de energía para permitir que la unidad de medida (UM) funcione de modo autónomo. El propósito final de la UM es integrarse en una red de sensores submarinos [34]. La unidad de energía permite variaciones entre los 1.8-2.7 V con lo cual es posible emplear un amplio rango de baterías.

El coste total de instrumento es inferior a \$50. El microcontrolador, la μ SD y la batería cuestan alrededor de \$8 cada uno. Por otro lado, la capsula cuesta \$12. La placa de circuito impreso cuesta alrededor de \$4. Y unos pocos componentes discretos, conectores y material para soldar suman el resto hasta \$50 comentados.

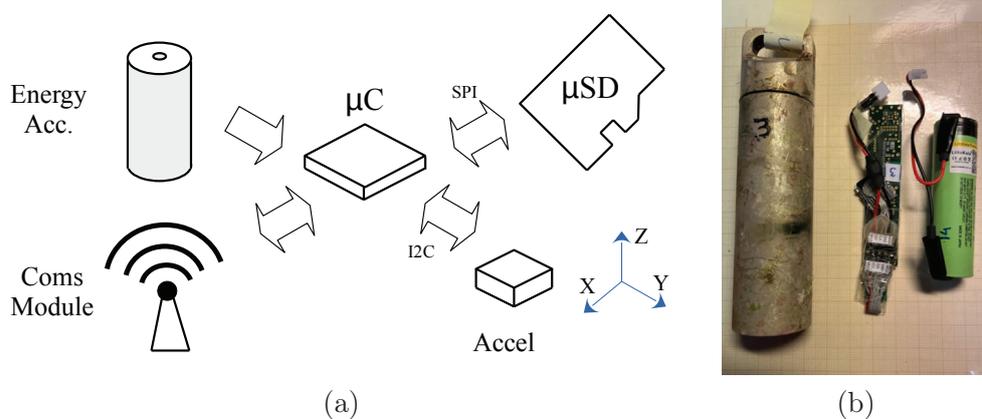


Figura 4.1: Diagrama de bloques del dispositivo de medida (a) y dispositivo fabricado (b). el prototipo de la fotografía fue utilizado en la campaña de toma de datos (2021), de más de 180 días a 25 m de profundidad

4.2. Consideraciones Especiales

El dispositivo ha sido diseñado para operar bajo estrés en su alimentación por baterías. Los casos extremos contemplados son por ejemplo reducción de la tensión de alimentación, o pérdida de la misma, o por ejemplo también el empleo de sistemas de alimentación basados en recuperación de energía. Estos supuestos tienen en común que la pérdida de la tensión de alimentación hace pasar al microcontrolador por el estado inicial de reset cada vez que falla la misma. La primera consecuencia es que se rompe el hilo de ejecución. El núcleo implementado es capaz de recordar el último estado, para así proceder a ejecutar correctamente la planificación especificada por el usuario.

Por otro lado, no se debe olvidar que el dispositivo se ha de desplegar en el océano a profundidades de hasta 50m. Ello implica que las comunicaciones inalámbricas estarán muy limitadas en términos de distancia o incluso en la mayoría de los casos serán inexistentes. El dispositivo de

medida se ha ideado para trabajar en el llamado modo "standalone." aislado/independiente. Y cuando es posible el uso de una red de comunicación, por disponibilidad de la misma, se utilizará para dar soporte a la gestión del dispositivo, en primer lugar, y en segundo lugar al volcado de datos si es posible -en función del ancho de banda disponible. Por ello, en la descripción que sigue, se centra en el funcionamiento "standalone", donde la ejecución siempre comienza en el estado de reset.

4.3. Operatividad Software

Más que describir línea a línea el código, es de interés presentar el diagrama funcional donde se establece su funcionamiento básico. La figura 4.2 presenta dicho esquema de operatividad.

El sistema empotrado tiene implementado un núcleo de ejecución a modo de software "bare metal--no hay Sistema Operativo (SO). El núcleo de ejecución siempre arranca tras una inicialización/reset, y dispone de un bucle que ejecuta dos tareas de forma iterativa y secuencialmente. Una de las tareas es la planificación especificada por el usuario y la otra tarea siempre es un tiempo espera. En la planificación especificada, el usuario define un orden de subtareas o experimentos a ejecutar. Al final de la ejecución de los experimentos, el sistema pasa a un modo de espera, dando por finalizada la lista de tareas programada.

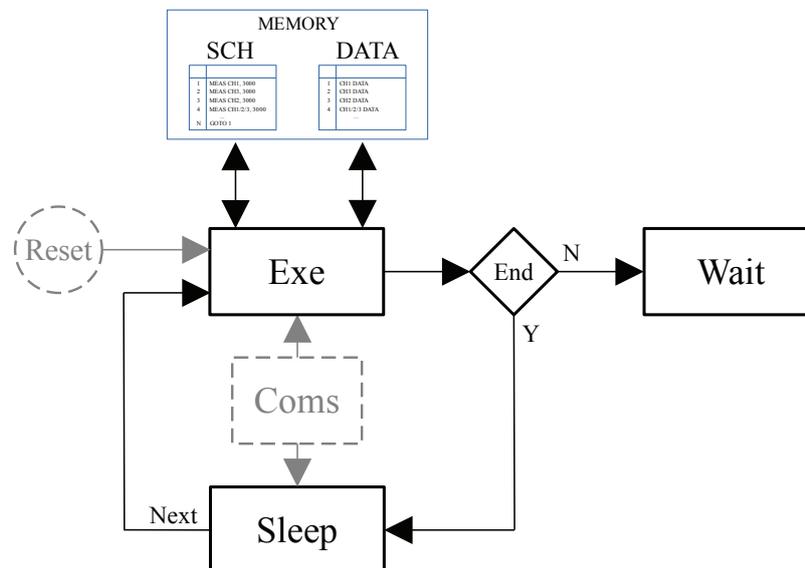


Figura 4.2: Esquema básico de ejecución del instrumento a evaluar.

La disponibilidad y capacidad de comunicación está presente y es posible emplearla en cualquiera de las dos tareas del bucle de ejecución. Llegados a este punto, es necesario recordar que el dispositivo se encuentra sumergido en el mar. Las comunicaciones inalámbricas, aún en baja

frecuencia como en LF-RFID, están muy limitadas. Este TFM no aborda dicha problemática, y se centra en el funcionamiento del dispositivo y sus características como instrumento oceanográfico, siguiendo el modo "standalone".

Esta forma de operar se ha de complementar con la información de estado del dispositivo. La figura 4.3 presenta los modos de operación y estados del instrumento. Hay que distinguir que el dispositivo tiene sólo dos modos de funcionamiento. Uno de ellos dirigido a su normal uso y otro a su programación/gestión.

- **Supervisor:** Como se puede intuir, este modo permite tomar el control absoluto del dispositivo. En este modo se puede desde el núcleo de software, programar planificaciones, extraer datos de variables de depuración y por su puesto, descargar las medidas realizadas en la última ejecución.
- **Autónomo:** Este es el modo en el que se ejecuta el diagrama de la figura 4.2. Es decir, es el modo de funcionamiento normal del instrumento donde se ejecutan las medidas programadas en la planificación especificada. Este modo posee dos fases posibles. La ejecución y la espera entre tareas.

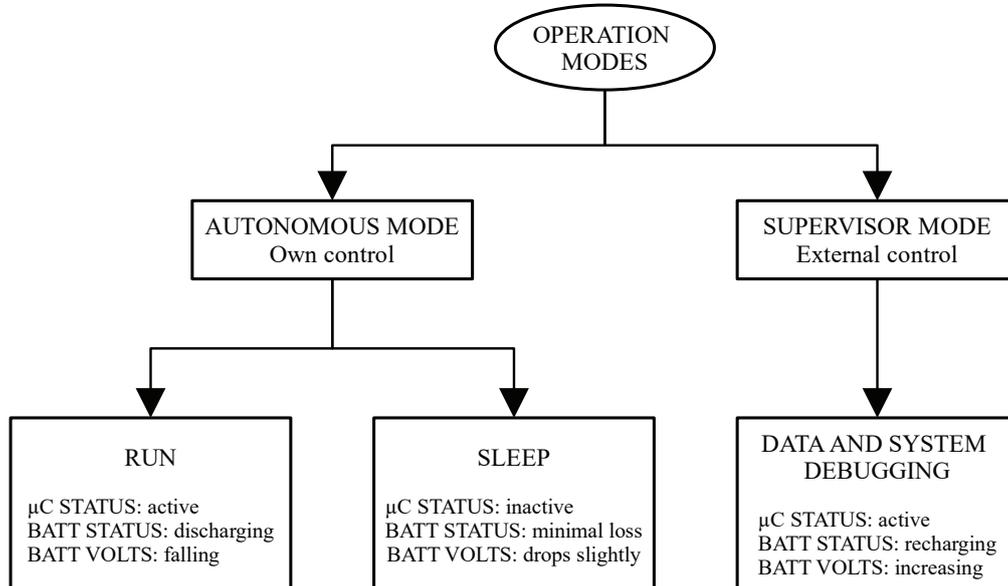


Figura 4.3: Diagrama de modos, estados y fases del instrumento.

4.4. El planificador

El caso crítico más común para el tipo de instrumento de medida inercial es su despliegue en modo autónomo/independiente ("standalone"). Donde el instrumento está aislado de las fuentes

de energía externas, donde se ejecuta todo el proceso de medición empleando como fuente de energía una batería a bordo.

Dado que la energía es limitada, la programación adquiere una gran importancia. En este sentido, la programación define cuanto tiempo deben durar las adquisiciones (ráfaga) y cuánto debe de esperar el instrumento para la siguiente ráfaga.

Obtener las aceleraciones y temperaturas es un procedimiento de medición que consta de 3 pasos. El primero es configurar e instalar el instrumento (Despliegue). En este paso, el usuario programa los ajustes requeridos en el instrumento, como la relación de muestreo, la velocidad máxima, el período de ráfaga, el tiempo de espera entre ráfagas, entre otros. Luego en un segundo paso (Experimento), el dispositivo mide las aceleraciones y la temperatura siguiendo las instrucciones programadas. El último paso consiste en recuperar el instrumento y descargar los datos adquiridos (Recuperación y descarga).

En capítulos anteriores y en particular el esquema de ejecución de la figura 4.2 y el esquema de operación de la figura 4.3, la UM implementa un bucle de ejecución de medida y/o código y de espera en cada iteración. En este TFM se ha adaptado dicho comportamiento para que se permita la ejecución de cuantas iteraciones sean necesarias para la ejecución del caso crítico en tres fases. Es decir, una primera fase de despliegue, el experimento propiamente dicho y por último la recogida y descarga de los datos.

La Figura 4.4 presenta estos tres pasos además del diagrama de bloques de ejecución implementando en el instrumento. A la derecha de la figura se presenta el modo de trabajo del microcontrolador (CPU) y el acelerómetro (ACC). Las acciones de este diagrama de bloques son las siguientes:

- **Programa:** Al comienzo, el microcontrolador y el acelerómetro están activos por defecto. Es hora de especificar los parámetros de adquisición de datos. El instrumento está conectado a un PC y también está cargando su batería. Una vez el usuario termina la programación, va a Hibernación₁.
- **Hibernación₁:** La CPU está en modo de funcionamiento de parada (VLPS) y el acelerómetro está completamente apagado. Durante el despliegue transcurre un tiempo (t_D), donde se deben realizar las operaciones de buceo.
- **Configuración:** La CPU se activa utilizando su temporizador de bajo consumo (LPWUT).

La CPU se enciende, se configura el ACC y se inicia la adquisición de aceleraciones.

- Medición:** El ACC adquiere los datos utilizando una FIFO interna de 32 muestras. Tenga en cuenta que el ACC utilizado no requiere el soporte de la CPU, por lo que la CPU pasa al estado de VLPS.
- Cache/Almacenamiento:** Una vez que la FIFO del acelerómetro está a punto de llenarse, se genera una interrupción hardware para activar la CPU. Inicialmente, todos los datos de la FIFO están almacenados temporalmente en la RAM del microcontrolador. Se usa memoria RAM de 24 KB como memoria intermedia. Si es necesario adquirir más aceleraciones y la memoria intermedia no está llena, el bucle interno ejecuta un nuevo ciclo de medidas. Si esta memoria intermedia se llena, su contenido pasa a la uSD. El bucle interno implementa el modo de adquisición de ráfagas.
- Hibernación₂:** La CPU cambia al modo VLPS y el acelerómetro se apaga. Implementa el retraso entre las adquisiciones de ráfagas utilizando el bucle externo. La CPU se despierta usando su propio temporizador LPWUT.
- Hibernación₃:** Finalizada la adquisición de datos, la CPU vuelve al modo VLPS, el acelerómetro se apaga por completo. El dispositivo pasa a modo de espera (t_R), tras el cual se puede recuperar el control del sistema, y proceder a la descarga de los datos adquiridos en un PC.

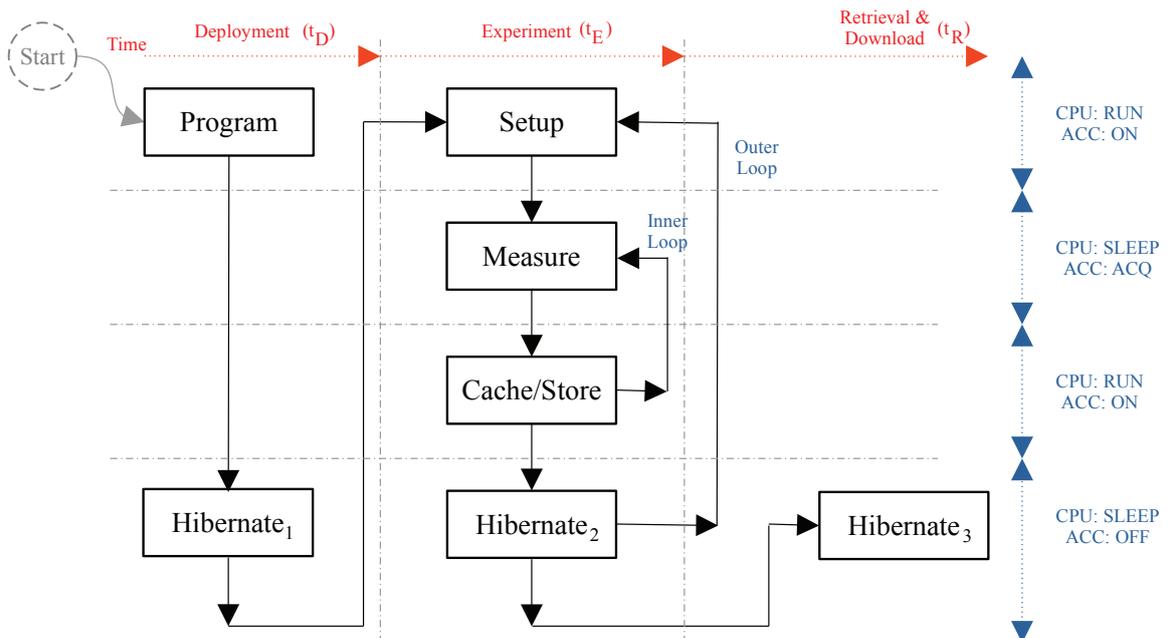


Figura 4.4: Cronograma de ejecución implementado en el medidor de corriente de aguas profundas propuesto para la ejecución de casos críticos.

4.5. Programador de Planificación

La Figura 4.5 presenta el Panel Frontal de la aplicación en LabView para programar la planificación del experimento. La programación se detalla en una tabla donde cada línea especifica: a) la acción a realizar en cada iteración del bucle del SO implementado en la UM y b) el tiempo de espera posterior a este (véase en la figura la tabla identificada como Schedule).

La interfaz gráfica desarrollada es capaz de:

- **Load:** Carga de una planificación almacenada previamente.
- **Save:** Almacena la planificación actual.
- **Insertar** en la planificación:
 - **No Experiment:** un experimento que no ejecuta nada.
 - **LED ON:** enciende el LED durante un periodo de tiempo.
 - **Code LED:** parpadea el LED un número de veces.
 - **Acc Algorithm:** ejecuta un algoritmo sobre las medidas.
 - **Raw Acc Experiment :** captura datos crudos de aceleraciones.
 - **Insert Checksum:** calcula e inserta el código de seguridad.
 - **End Experiment:** finaliza la ejecución de la planificación.
 - **Fill Schedule:** inicializa el resto de la planificación con fin de experimento.
 - **Temp & Volt:** mide la temperatura y tensión de alimentación de la UM.
- **Delete Index:** elimina la iteración especificada.
- **Move Last 2 Index:** traslada la última iteración a la posición indicada.
- **Copy Sch from View Tab:** copia la planificación desde la UM.
- **Remove All:** borra la planificación.
- **Compute Delays:** estima el tiempo total de la planificación.

La inmensa mayoría de acciones posibles implementadas, se corresponden con la inserción de acciones a ejecutar en cada iteración del bucle de ejecución del SO de la UM. La interfaz funciona como una FIFO (First In First Out), en la que el primer elemento es el más antiguo y el último en agregarse el último de la tabla. Pero es posible por ejemplo, insertar el último elemento agregado a una posición especificada.

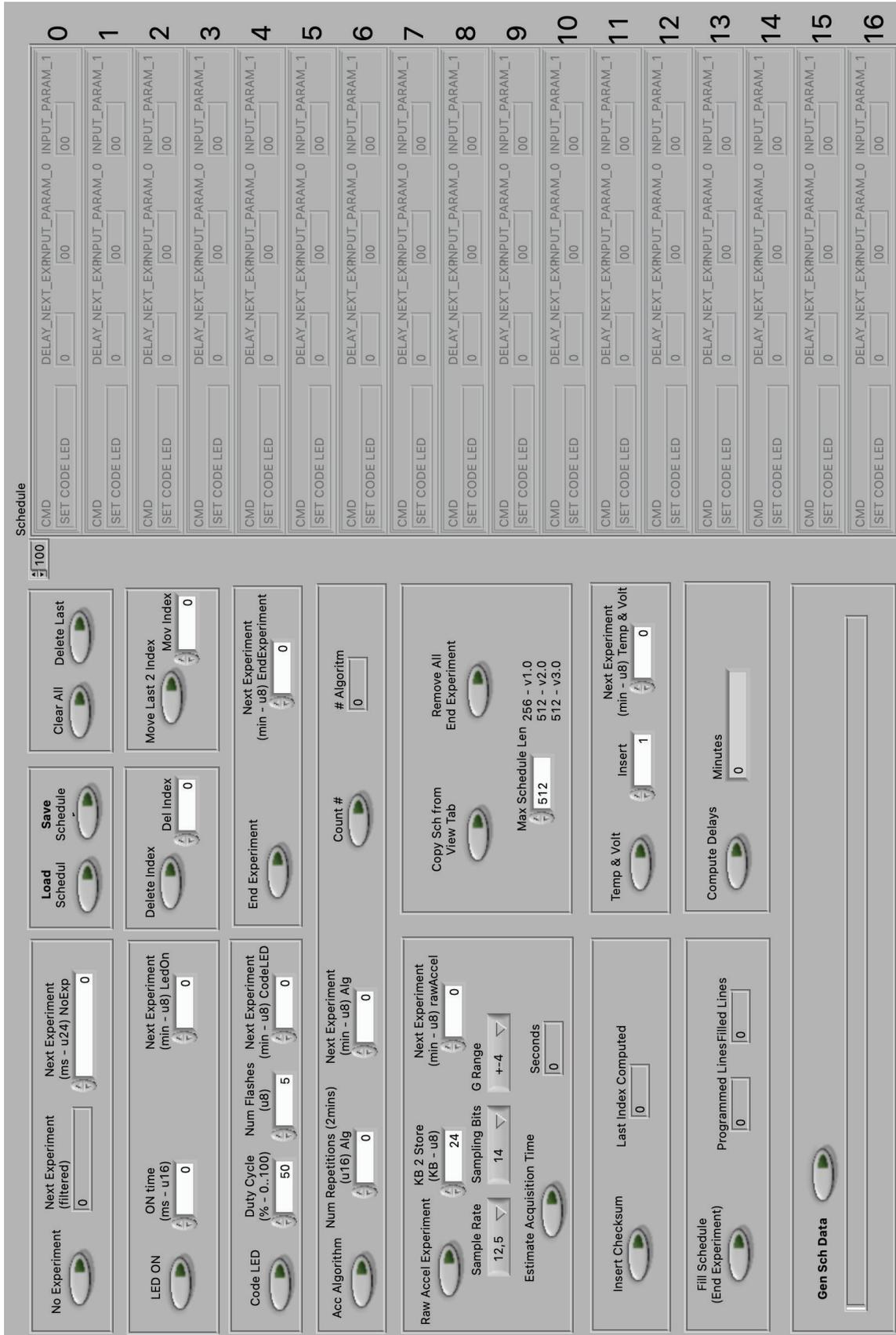


Figura 4.5: Panel frontal del programador de planificación desarrollado.

En esta versión de software es posible ejecutar cinco tipos de funcionalidades en la fase de ejecución. Encender un led, hacer parpadear el led con una frecuencia y ciclo de trabajo, adquirir datos crudos de aceleración en los 3 ejes, adquirir datos y procesarlos, medir la tensión de alimentación y temperatura y por último, no hacer nada. También es posible introducir comandos manualmente sobre la tabla de planificación. Eso sí, asumiendo que la introducción manual de los códigos no es chequeada y por tanto es una fuente de error. Y por tanto, esta última opción no es aconsejable a los usuarios noveles o inexpertos.

Durante el test del código y cuando se implementan nuevas funcionalidades, se utiliza el parpadeo de leds como código visual. El código se depura en un entorno de programación que incluye una interfaz con las herramientas de depuración. Sin embargo, el test de experimentos se realiza en modo "standalone", y durante esta fase se activan los códigos visuales aludidos. En fase de ejecución normal, se deshabilitan estos códigos.

En la figura 4.4, el planificador sólo especifica las iteraciones del bucle que ejecuta el SO de la UM. Es decir, los bucles identificados como Inner Loop y Outer Loop de dicha figura. Se debe tener en cuenta que la acción de programar (Program en la figura), la ejecuta el usuario cuando descarga la planificación a la UM. Y por ello, se recomienda que para ejecutar correctamente dicha planificación, el primer experimento se corresponda con una acción de "No Experiment" y se le fije el periodo de tiempo que se desea para el `Hibernate1`. De caso contrario, la ejecución de la planificación entenderá que dicho tiempo inicial es cero.

La figura 4.6 presenta un ejemplo de planificación para la captura de 3 periodos de aceleraciones con sus datos en crudo durante un periodo de 120 segundos. En ella se puede observar que la primera iteración ordena la ejecución de "No Experiment", junto a un retardo de 69 segundos (0x45) para la ejecución de la siguiente iteración.

Se puede observar en el ejemplo de planificación presentado que se finaliza el experimento en la iteración once y tras ella se ha de insertar un código cíclico redundante (Cyclic Redundancy Check, CRC) para darle validez a la planificación.

Este TFM se vio en la necesidad de modificar ligeramente el código fuente para que admitiese el comando "GOTO 1", el cual se intercambiaba por la orden "End Experiment". Con ella se garantizaba que el núcleo ejecutase de forma indefinida las fases de medida y espera, sin dar oportunidad a que el experimento finalice.

Schedule				
CMD	DELAY_NEXT_EXRNPUP_PARAM_0	INPUT_PARAM_1		
NO EXPERIMENT	45	05	32	0
SET CODE LED	0	03	32	1
LED ON	0	E8	03	2
GET RAW ACCEL	0	0C	45	3
LED ON	10	E8	03	4
LED ON	0	E8	03	5
GET RAW ACCEL	0	0C	45	6
LED ON	10	E8	03	7
LED ON	0	E8	03	8
GET RAW ACCEL	0	0C	45	9
LED ON	0	E8	03	10
END EXPERIMENT	0	00	00	11
CRC Checksum	0	1E	E2	12

Figura 4.6: Planificación de ejemplo para la captura de 3 ráfagas de aceleraciones durante 120 segundos.

4.6. Consumo de Energía

A pesar de que el diagrama de bloques que se presenta en la Figura 4.4 está diseñado e implementado para trabajar en términos de ultra baja potencia, hay cuestiones clave de diseño que se deben explicar sobre el uso de la CPU y el ACC. En lugar de optimizar de forma conservadora todo el diseño, se ha preferido dar una visión general del sistema para enfocar la optimización de aquellos recursos con un alto consumo. El instrumento propuesto tiene principalmente tres consumidores de energía, la CPU el ACC y la memoria uSD.

La tabla 4.1 presenta los datos de consumo de la UM en términos de corriente y tiempo requerido para un experimento en el que se hace pasar al instrumento por todos los estados posibles y así evaluar el consumo. Estos datos se han obtenido durante fases de caracterización previa.

Se puede observar que la CPU seleccionada tiene varios modos de trabajo. Desde los modos

de alto rendimiento hasta los modos de ultra bajo consumo, cuantos más módulos internos estén apagados, menor será el consumo de energía. En este sentido, se necesita usar al menos un modo de ejecución y un modo de suspensión. El modo de funcionamiento seleccionado pertenece a la frecuencia máxima de trabajo donde se define el comportamiento de ultra baja potencia. Si aumenta la frecuencia por encima de este límite, aumentará sustancialmente el consumo de energía. No se selecciona una frecuencia más baja porque se pretende hacer una transferencia de datos rápida entre las tres componentes. La frecuencia de trabajo de la CPU es de 8 MHz en el modo de ejecución de muy baja potencia VLPR (Very Low Power Run). El consumo de energía de la CPU en este modo es inferior a $500 \mu\text{A}$ según sus hojas características.

Por otro lado, el modo de suspensión/hibernación seleccionado es el etiquetado como VLPS (Very Low Power Stop)). En este modo todo los módulos del microcontrolador están deshabilitados a excepción del reloj interno, el modulo de interrupciones externas y su RAM, que conserva sus valores. El microcontrolador MKL17Z256 consume por debajo de $1 \mu\text{A}$.

Tabla 4.1: Consumo de corriente en la adquisición de datos del peor corner-case. [35]

Module	Mode	Current	Time
CPU	VLPS	$1 \mu\text{A}$	325.48 s
CPU	VLPR	0.45 mA	2.2 s
ACC	Acquisition	$6.0 \mu\text{A}$	327.68 s
ACC	Data Transfer	0.57 mA	1.9 s
uSD	Sleeping	$2.0 \mu\text{A}$	326.48 s
uSD	Data Transfer	0.57 mA	1.9 s
uSD	Data Write	127 mA	1.9 s

4.7. Resumen

En este capítulo se ha presentado por un lado el hardware empleado en el prototipo de dispositivo de medida de corrientes marinas. El sistema basado es un sistema empotrado del tipo "bare metal". No hay S.O sino un núcleo de software propio para la ejecución de una planificación especificada por un usuario. Esta planificación se especifica con una interfaz de alto nivel en LabView.

El instrumento ejecuta un bucle en la que cada iteración se compone siempre de una fase primera de ejecución de medidas especificadas por el usuario y posteriormente una fase de espera y vuelta a empezar. Solo se puede salir de dicho bucle cuando la fase de iteración determina que se produce el conjunto de eventos y condiciones para ello. Finalizado el bucle, el instrumento pasa a un modo de espera para su recogida y posterior descarga de datos.

Por otro lado, se ha descrito el funcionamiento interno del dispositivo someramente, para posteriormente comprender como se programa un experimento y como se ha planificado la toma de datos empleados en este TFM. Tras describir el planificador implementado en la UM, se pasa a describir el entorno software que lo permite programar. También se tienen en cuenta de los consumos de los distintos modos de trabajo.

Capítulo 5

Fuentes de Error

En este capítulo se detallan a grosso modo las principales fuentes de error presentes en la toma de muestras durante los experimentos realizados por el instrumento de medida UM. Se identifican en primer lugar los principales problemas en los que se ve sometido el dispositivo, así como los relacionados con el tratamiento de los datos.

Las principales fuentes de error presentes en la toma de medida son las siguientes:

- **Alineación.**
- **Frecuencia de muestreo.**
- **Tiempo de vida y Temperatura del dispositivo.**
- **Precisión en la medida.**

5.1. Alineación

Dada una medida de aceleraciones de una UM desplegada en el océano, donde no hay fuerzas que actúan excepto la gravedad, la dirección X de la UM es paralela al vector de gravedad. En el mismo escenario, el plano que incluye las direcciones Y-Z es paralelo a la superficie del océano. Por lo tanto la dirección X es normal a la superficie del océano. Finalmente la aceleración X es negativa, hacia abajo, (en dirección al fondo del mar) y positiva hacia arriba. Por esta razón, en este trabajo se identifica la dirección X como vertical.

Siguiendo esta nomenclatura y desde un punto de vista práctico, hay que tener en cuenta otras consideraciones. La primera es el desalineamiento. La disposición de los ejes está estrechamente relacionada con la posición del circuito integrado (IC) de medida de la aceleración. Si bien la ortogonalidad de los ejes medidos está garantizada, es obligatorio verificar la desalineación de

dicho circuito de medida con respecto al encapsulado de la UM.

En general las fuentes de este error se deben a la desalineación soportada durante los pasos de colocación y soldadura de la construcción de la placa de circuito impreso (PCB), al carecer de un eje de elaboración automática sin calibración o con rangos de incertidumbre excesivos. Además, la estructura de soporte interna para albergar la batería y la placa de circuito impreso son fuente de errores de desalineación. En este caso, se debe garantizar la fijación de cada elemento en el interior de la capsula. En caso contrario, habrá que tener en cuenta un nuevo error producido por el movimiento en semi-libertad de las piezas en el interior de la capsula.

Asegurada la fijación de cada elemento dentro de la capsula de la UM, el error de desalineación se cancela al eliminar el error por compensación regular. En cada proceso de montaje de la UM, antes de sellar la capsula, se deben de fijar los elementos internos. Y luego se obtiene el desplazamiento por desalineación. Por tanto, si se asume que la estructura interior no posee holgura, se puede asumir que este error es constante sobre la medida. Por tanto, la solución para eliminar éste, se ha de evaluar uno a uno, para cada UM fabricado.

Para corregir este error, lo que se ha de realizar es una medida de los datos crudos de aceleración, situando la UM en una posición de reposo conocida y restar la inclinación de la base a los datos medidos.

5.2. Frecuencia de Muestreo

Por otro lado y desde un punto de vista práctico, la frecuencia de muestreo utilizada por la UM es otro tema importante. Dado que se está tratando con señales, esas señales también tienen su propio ancho de banda. El teorema de Nyquist define el límite inferior de la frecuencia de muestreo de la UM. Es bien sabido que cuanto mayor sea la frecuencia seleccionada, mejor será su reconstrucción y postprocesado. Sin embargo, la UM es un sistema de ultra baja potencia. Por lo que aumentar la frecuencia de muestreo implica un mayor consumo energético. Con lo que se define un compromiso entre la energía consumida y la frecuencia de muestreo.

En nuestros experimentos se selecciona una frecuencia de muestreo de 12.5 Sps (Samples per second del termino inglés: muestras por segundo). Según la literatura, se espera que el ancho de banda máximo de los datos adquiridos sea de 3 Hz [38, 37]. Este valor representa más del doble de la frecuencia máxima esperada.

Tanto la frecuencia de muestreo como su límite teórico según Nyquist han de tomarse con reserva, pues también es importante reseñar que el teorema de Nyquist se refiere a señales puras sinusoidales. En otras palabras, el funcionamiento en términos de un filtro se ve afectado en amplitud y fase, y es ligeramente distinto a como trabaja ese mismo filtro en su zona paso banda.

Y por último se ha de tener en cuenta que, suponiendo una señal ideal de entrada, al hacerla pasar por un filtro de respuesta impulsiva (Finite Impulsive Response, FIR), el resultado a la salida en el dominio de la frecuencia es la forma del filtro. Por tanto, el ancho de banda del FIR va a determinar el ancho de banda mínimo detectable. Es decir, la resolución en frecuencia del mismo.

5.3. Tiempo de Vida y Temperatura

Tomando los datos de la tabla 4.1, es posible estimar el consumo medio por horas de un experimento que consiste en ejecutar un bucle indefinido que toma datos de forma continuada, durante 5 minutos, para acto seguido almacenarlos en la memoria y volver a adquirir. La energía total necesaria es de $1.56 \mu\text{Ah}$ para realizar la medida. Se dota al prototipo de una batería Panasonic NCR18650B (Lithium-ion, 3.7 V y 3400 mAh) como fuente de energía, se puede repetir nuestro experimento un total de 188 días. Todo ello si se mantienen las condiciones medioambientales donde la UM se despliegue.

Queda fuera del ámbito de este TFM la evaluación de dicha longevidad en función del rango de temperaturas de la zona de despliegue. Sin embargo, Canarias es conocida mundialmente por su estabilidad térmica entorno a los $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a lo largo del año. Si se tiene en cuenta que el calor específico del agua es superior al del aire, se entiende porqué el agua de mar tiende a tener una temperatura inferior a la del aire. Por tanto, las variaciones de temperatura en la profundidad del mar son menores a las que hay en superficie. Y por ello, se espera que la variación de temperatura no afecte significativamente a la carga disponible en la batería seleccionada, si su despliegue se realiza en aguas de Canarias.

5.4. Precisión

El prototipo de medida de mareas de aguas profundas empleado en este TFM se basa en medir directamente el vector de aceleraciones y sus componentes en frecuencia de la corriente de agua, en lugar de medir la velocidad del agua en promedio. Dado que se utiliza un acelerómetro

comercial, el rendimiento del instrumento es el mismo que el del acelerómetro utilizado. Según la hoja de especificaciones de dicho acelerómetro, la resolución es de $g/4096 = 0.2441\text{mg} = 2.39\text{mm/s}^2$. El rango de trabajo es de $\pm 2g = \pm 19.6 \text{ m/s}^2$. El ruido de salida medido es de $3.4 \text{ mg}/\sqrt{Hz}$.

5.5. Resumen

En este capítulo se han identificado las fuentes de error a las que se van a ver sometidos los datos adquiridos de las corrientes marinas a procesar. En primer lugar se identifican los problemas de alineamiento que poseen este tipo de equipos por el mero hecho de disponer de la medida de aceleración. Además se plantea la problemática relativa al tratamiento de los datos en términos de frecuencia donde la respuesta impulsiva del sistema condiciona los valores de frecuencia cercanas a la denominada frecuencia de corte.

Por otro lado, se introduce la temperatura como fuente de error, aunque no es objeto de estudio de este TFM. Las variaciones de temperatura afectan a las tensiones de alimentación de acuerdo con las baterías utilizadas. Finalmente, se estima el valor de resolución del instrumento basado directamente en las características del acelerómetro empleado -el acelerómetro incluye su propio ADC.

Capítulo 6

Series de Datos

En este capítulo se describen los datos y procedimientos seguidos durante una campaña de largo plazo durante 2021 por varias UM. Con el objeto de caracterizar y obtener datos de aceleración y temperatura, tanto sin procesar en el dominio como analizados en términos de su frecuencia.

Por otro lado, una vez se han analizado los datos en crudo, es decir en el dominio del tiempo, se pasa a analizar los datos procesados utilizando el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Estos datos se han estudiado para determinar las frecuencias de las componentes principales de las mareas en varias ventanas temporales (corto, medio y largo plazo). En este análisis se ha abordado la problemática de definir dicha ventana temporal.

6.1. Experimentos

Todos los experimentos en este trabajo siguen el mismo procedimiento. El primer paso es programar la UM para obtener los datos de aceleración y temperatura, sin posterior procesamiento (datos crudos), durante un período de tiempo específico. Dado que el laboratorio está ubicado en tierra y alejado del lugar de despliegue, el inicio de la captura de datos debe de retrasarse. Otra consideración a tener en cuenta es que el despliegue debe encajar con otras operaciones de buceo que estén programadas en la infraestructura de acuicultura en alta mar. En general, cada campaña de medidas incluye un retardo de al menos 48 horas entre la puesta en marcha de la planificación y el momento en el que se comienza a capturar datos de aceleración, todo ello con el objetivo de proporcionar un margen de tiempo a los buceadores para ejecutar el despliegue efectivo.

Una vez que comienza el experimento, los datos en crudo de aceleración y temperatura se capturan continuamente a una frecuencia de muestreo fija, durante 5 minutos y se almacenan en su tarjeta de memoria (uSD). Tan pronto como finaliza el experimento, la UM entra en modo de suspensión de energía a la espera de ser recuperado. Finalmente con la UM retornada a nuestro laboratorio, se extrae la memoria uSD y se copian los datos sin procesar adquiridos a un PC (Windows 10, i7-4930K 3,4GHz, 64GB RAM). Todos los datos presentados en este documento se calcularon utilizando LabView 2021 de National Instruments.

6.1.1. Ubicación

Con el fin de la obtención medidas reales, en condiciones naturales, se desplegaron varias unidades de la UM en una jaula off-shore en explotación. La infraestructura de acuicultura utilizada es propiedad de Aquanaria S.L. en las Islas Canarias (España). La Figura 6.1 muestra la ubicación de las islas canarias en el océano Atlántico. La Figura 6.1 (b) y (c) son dos fotografías del satélite Sentinel 2 en las bandas RGB de la isla de Gran Canaria (GC) y una ampliación del área donde se ubica la instalación de acuicultura en alta mar.

La ubicación exacta de la instalación en alta mar esta en las coordenadas $27^{\circ} 46' 28''$ N y $15^{\circ} 28' 23''$ W. Se encuentra a unos 2 km de la costa. Esta instalación está ubicada en medio de un fondo marino semiplano de 1 km de ancho con una batimetría que comienza en 25 metros y termina en 50 metros. El fondo marino de toda la instalación offshore tiene una profundidad de 35 metros. Los fondos marinos en el área ocupada no tienen formas irregulares. La instalación en alta mar está compuesta por dos arreglos independientes de jaulas de 2×6 . Los dispositivos se desplegaron en las dos líneas de amarre más expuestas a la corriente de agua a 15 m de profundidad.

6.2. Datos Crudos

Una primera campaña de datos se centró en obtener las medidas de corrientes de marea en términos de aceleraciones en un periodo de tiempo corto, para así comenzar a analizar los datos obtenidos. En este sentido, la Figura 6.2 muestra 20,48 segundos de datos sin procesar, capturados el 5 de mayo de 2021 a las 15:44 en el lugar descrito en la Sección 6.1.1 a una profundidad de 15 metros. Este período de tiempo corresponde a 256 muestras de aceleración. La imagen muestra la magnitud del vector aceleración ACC_{XYZ} y sus tres ejes ortogonales ACC_X , ACC_Y and ACC_Z en términos de aceleración gravitatoria g ($9,81 \text{ m/s}^2$).

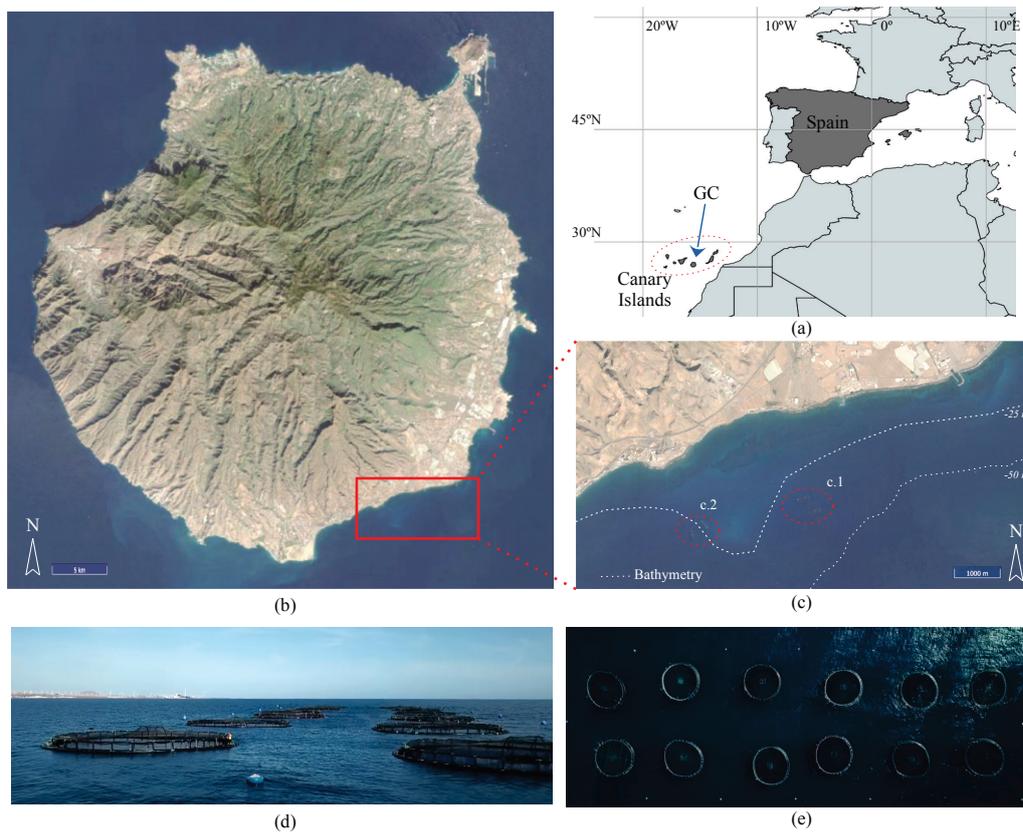


Figura 6.1: Ubicación usada para evaluar la UM propuesta (a) mapa de las Islas Canarias en el Océano Atlántico (b) y (c) fotos satelitales de Gran Canaria y ubicación de las instalaciones de acuicultura en alta mar en el sur de GC(c.1): Infraestructura de Aquanaria S.L. , (c.2): Otras infraestructuras de acuicultura en alta mar(d) vista superior (e) una de las 2×6 matrices de jaulas utilizadas en nuestros experimentos

Durante este período capturado, la magnitud de la aceleración medida (ver ACC_{XYZ} en la Figura 6.2) esta cerca de la unidad. El rango de aceleraciones es de $[0,876, 1,078]$ g. Si se tiene en cuenta que la aceleración de la gravedad es de 1 g, el rango de variación de la medida es básicamente $[-0,124, 0,078]$. Se ha de tener en cuenta que la magnitud se calcula mediante el teorema de Pitágoras, su variación es menor que la variación de sus componentes en la mayoría de los casos.

Por otro lado, si se observa ACC_X (dirección vertical), se aprecia que sus valores medidos están cerca de la unidad. Implica que la UM está la mayor parte del tiempo en posición vertical. En otras palabras, la fuerza de la marea tiene valores bajos, cercanos a cero. Como era de esperar, la señal en el dominio del tiempo que se presenta en la Figura 6.2 muestra una curva continua con varios máximos/crestas y mínimos/valles. En este punto, es posible detectar los periodos/-frecuencias de las señales de las corrientes de aguas profundas involucradas, usando por ejemplo un detector de picos y valles [39].

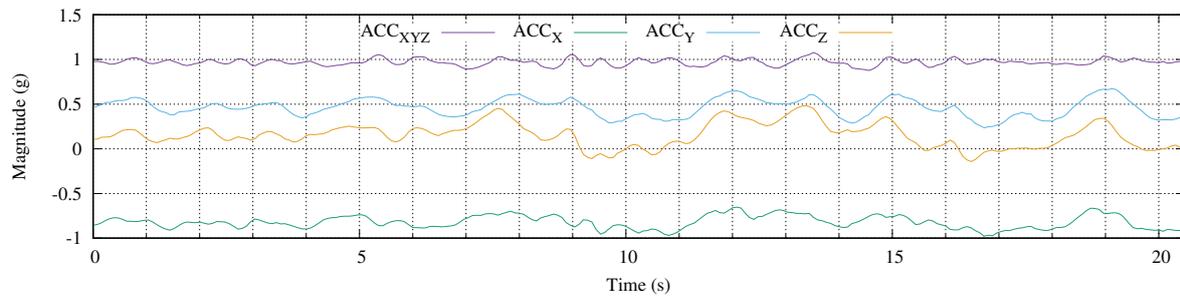


Figura 6.2: 256 muestras de datos crudos de aceleraciones a una frecuencia de 12,5 muestras por segundo.

Dado que se busca los períodos/frecuencias de las olas del océano en aguas profundas, es interesante estudiar esas señales en términos de frecuencia. La Figura 6.3 muestra los datos de aceleración sin procesar presentados anteriormente, pero en términos de distribución de frecuencia. En este experimento, primero se capturan los datos de aceleración sin procesar usando nuestra UM en la ubicación que se describió anteriormente en la Sección 6.1.1. Los datos adquiridos se almacenan en la tarjeta de memoria uSD. Una vez descargados los datos en nuestro PC en el laboratorio, se procesan utilizando el algoritmo Fast Fourier Transform (FFT) con LabView 2021 de National Instruments.

Debido a que el algoritmo FFT depende de la longitud de los datos de procesamiento, se usan todas las longitudes posibles en potencias de dos, entre 8192 y 128. De esas longitudes de datos se han seleccionado para presentarlos en este documento los que se corresponden a 8192, 1024 y 128 muestras tal y como se puede observar en la figura 6.3. Puesto que la UM utiliza una frecuencia de muestreo de 12,5 sps, estos datos sin procesar corresponden a 655,36, 81,92 y 10,24 segundos, respectivamente.

Téngase en cuenta que sólo se presentan los datos del eje vertical. Al ser un sistema ortogonal, el sistema de adquisición de aceleraciones, las variaciones en un eje están relacionadas unas con otras. Por tanto la respuesta en frecuencia es similar en todos los ejes, variando únicamente las magnitudes de la misma.

La amplitud de las señales disminuye a cero a medida que aumenta su frecuencia. Aunque la frecuencia máxima obtenida basados en el teorema de Nyquist es de 6,25 Hz, solo se representan señales de hasta 3 Hz porque las señales obtenidas por encima de 2,5 Hz son la línea de base de ruido del sistema. Siendo éste cercano a cero.

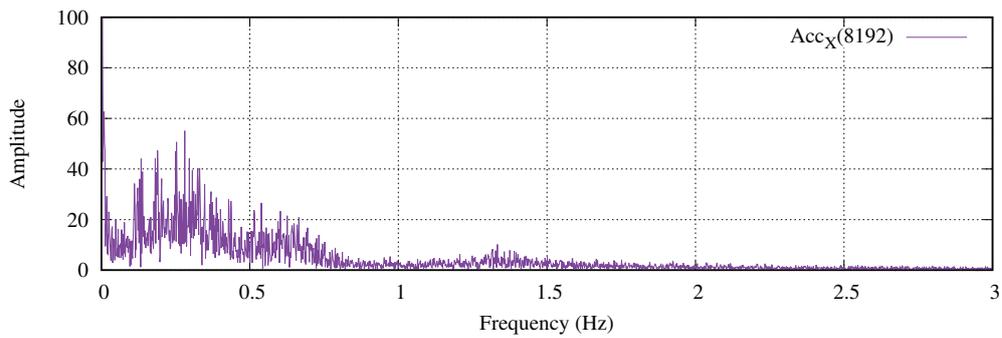
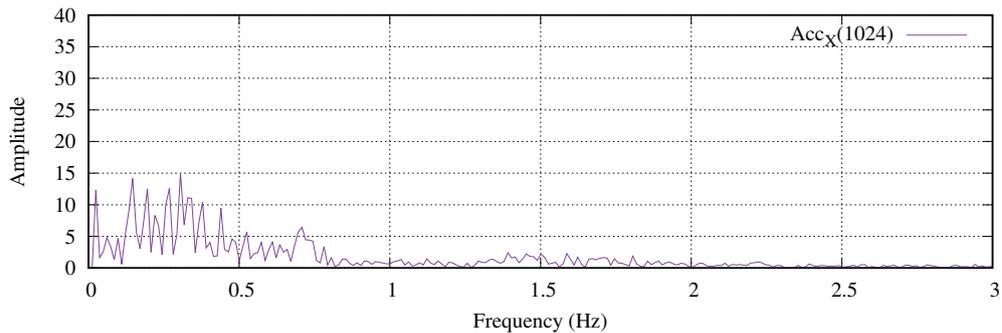
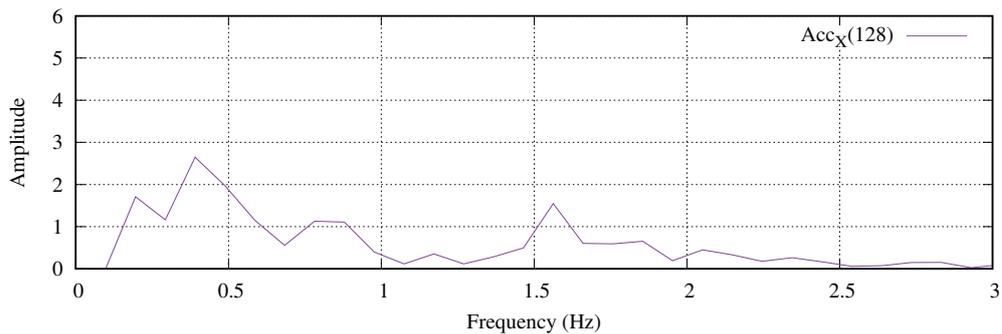
a) Length(ACC_X)=8192b) Length(ACC_X)=1024c) Length(ACC_X)=128

Figura 6.3: Representación en frecuencia de los datos adquiridos para diferentes números de muestras (a) 8192 muestras, (b) 1024 muestras y (c) 128 muestras para el eje vertical.

A primera vista, independientemente del eje estudiado para todas las representaciones en frecuencia, la presencia de ruido es notoria. La razón es simple, dado que las corrientes de marea se generan de forma aleatoria, las señales adquiridas también lo son. Sin embargo, la literatura describe que dada una onda o corriente de marea con periodo/frecuencia $T_w=1/f_w$, su amplitud es modulada. Esta modulación en aguas profundas es la mitad de la frecuencia original. Por lo tanto, su descomposición en frecuencia tendrá el armónico fundamental y los componentes resultantes de las envolventes creadas. Este efecto se llama Velocidad de Grupo.

En este sentido, la figura 6.3(a) presenta claramente modulaciones AM a 0,25 Hz, 0,6 Hz y 1,3 Hz. Las diferencias de potencia entre esas modulaciones también son significativas, 30 dB y 20

dB entre ellas. Además, la transformada de longitud 1024 presentada en la Figura 6.3(b) muestra modulaciones entre 0,2 Hz y 0,4 Hz de forma igualitaria y también en 0,75 Hz. Se percibe entorno a 1,5 Hz otra componente pero muy atenuada. La respuesta en frecuencia para 128 muestras de longitud ofrece tres picos claros con respecto a la base de ruido. Este comportamiento es idéntico en las otras componentes (ejes Z e Y).

A medida que la longitud de la FFT se hace más pequeña, la resolución empeora. Obviamente, el esfuerzo computacional requerido es menor con una longitud menor. Además, esta reducción produce una menor potencia espectral y la tendencia de los lóbulos de modulación es a desaparecer. En el caso de frecuencias fundamentales o portadoras, este comportamiento no es tan pronunciado, por lo que a medida que se reduce la longitud de la transformada, la portadora sobresale de sus lóbulos.

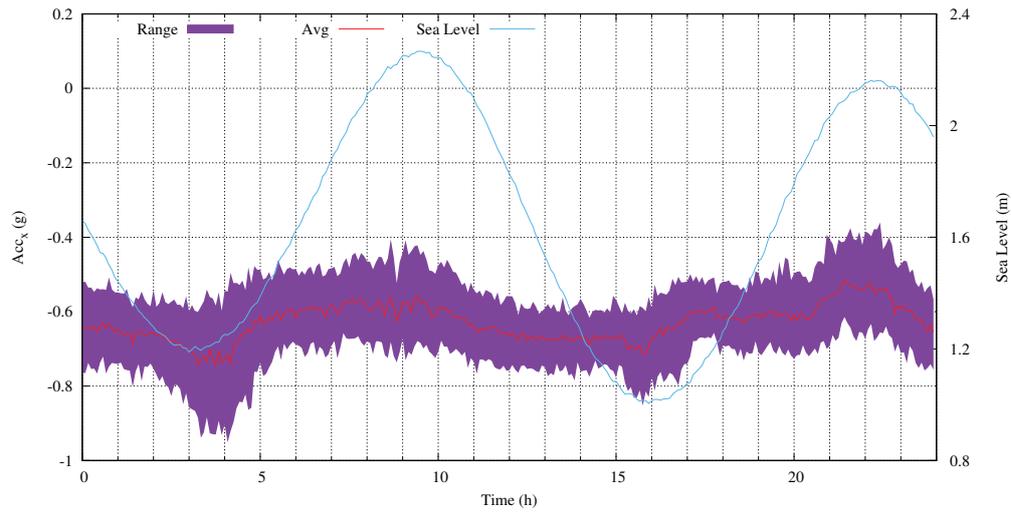
Del estudio en términos de frecuencia, se concluye que es posible obtener una medida muy precisa de las frecuencias de las ondas fundamentales con un bajo coste computacional utilizando longitudes de FFT reducida. Sin embargo, la medición de los lóbulos de la modulación requiere grandes longitudes en la FFT.

6.2.1. Veinticuatro Horas

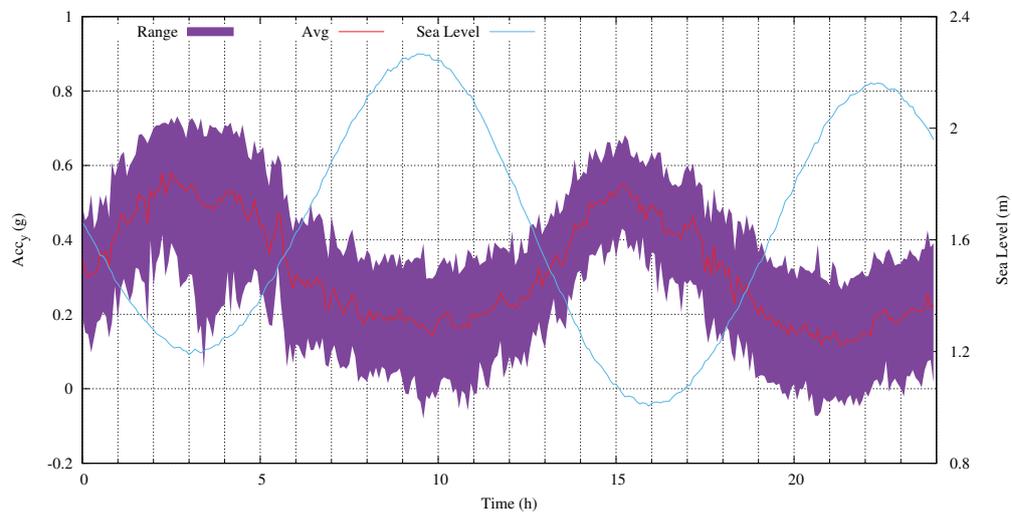
Se evalúan los datos crudos obtenidos en periodos cortos de tiempo, el siguiente experimento propone comprobar el comportamiento de las aceleraciones durante un día completo. La Figura 6.4 muestra las aceleraciones de los tres ejes ortogonales durante 1 día. La adquisición comenzó el 5 de mayo de 2021 a las 12:00 horas. Además de las aceleraciones, también se muestra el nivel del mar medido en el puerto Las Palmas 2 con coordenadas $28^{\circ} 8' 32,78''\text{N}$ y $15^{\circ} 24' 37,00''\text{W}$, también denominado FARO [40]. El mareógrafo y la infraestructura de acuicultura se encuentran a una distancia de $3' 46'' \text{ S}$ y $22' 46,48'' \text{ W}$, lo que representa una longitud lineal de 41 km.

Las Figuras 6.4(a), (b) y (c) presentan, referidas a su ordenada izquierda, el rango de aceleraciones medidas y las aceleraciones promediadas para ACC_X , ACC_Y y ACC_Z respectivamente. Además, atendiendo a su ordenada derecha, el nivel del mar medido por el mareógrafo FARO en unidades de metros.

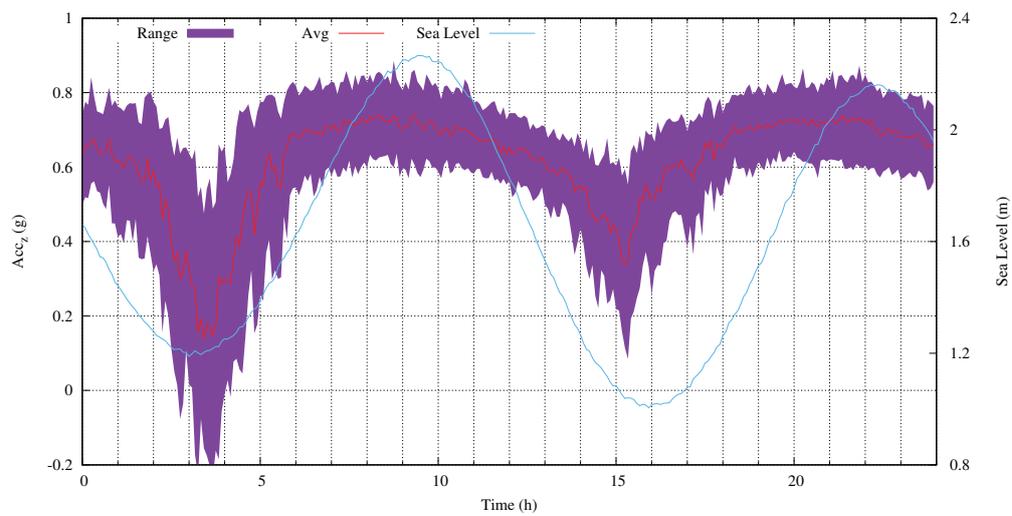
Como se indicó en el apartado 3.2, aproximadamente cada 6 horas acontece un máximo o mínimo nivel de la superficie del océano. Como se está adquiriendo un día completo, hay dos máximos y dos mínimos. En la Figura 6.4 se muestra la dirección vertical de la UM como ACC_X .



(a)



(b)



(c)

Figura 6.4: Adquisición de datos con las muestras de 1 día de (a) ACC_X , (b) ACC_Y y (c) ACC_Z aceleraciones.

Teniendo en cuenta que para esta aceleración, una medida cercana a uno significa que la UM esta en posición vertical. Se observan los dos máximos y mínimos claramente en el comportamiento de las aceleraciones del nivel de la superficie del océano. Además, existe un retraso entre picos y valles.

Se ha de tener en cuenta, que el valor máximo viene dado por la acumulación de agua en la zona de máxima atracción de la tierra con la luna y el sol. Para alcanzar el valor máximo, las corrientes de marea deben mover el agua hasta alcanzar ese valor. Una vez que se alcanza, las mareas dejan de empujar en la misma magnitud. Dado que el dispositivo se encuentra en aguas profundas, nunca invierte la dirección debido al movimiento circulatorio global de los océanos lo impide.

La Figura 6.4(a) muestra el comportamiento descrito. La verticalidad de la UM alcanza su máximo 4 horas después de comenzar este experimento de día completo iniciado a las 12:00 del mediodía del 5 de mayo de 2021. La UM vuelve a una posición vertical alrededor de las 15:00 del mismo día y continúa más o menos en la misma posición durante 2 horas. Después de este tiempo, las fuerzas de gravitacionales actúan sobre el mar repitiendo la misma operación hasta el fin de la captura de datos crudos.

El inicio de la verticalidad de la UM está perfectamente sincronizado, en términos temporales, con el nivel mínimo medido en la superficie del océano en ese día a esa hora. Unas 12 horas después, ocurre un evento similar al que se muestra en las mediciones de ACC_X .

Por otro lado, si se observa el comportamiento de los otros ejes medidos, se aprecia el mismo comportamiento. Mientras que ACC_Z sigue la misma tendencia que ACC_X , la respuesta de ACC_Y es similar pero la tendencia es inversa. Los rangos de movimientos registrados con los ejes paralelos a la superficie del océano son mayores que los obtenidos en la dirección vertical.

Mientras que en aguas poco profundas el movimiento del agua fluye en una dirección y sigue patrones circulares en profundidad debido a las ondas superficiales, en aguas profundas su movimiento sigue la teoría clásica del movimiento de fluidos. Es decir, el agua sigue una sola dirección y si hay fluctuaciones, se deben a irregularidades en el fondo del mar, otras nuevas fuerzas entrantes o cambios de temperatura. Como se discutió previamente en el apartado 3.1, se espera que los valores medidos incluyan la aceleración debida a la gravedad más las fuerzas de marea. Dado que no se prevén corrientes verticales en las áreas marinas bajo estudio, se espera medir fuerzas paralelas a la superficie del océano.

Cuando se aplica una fuerza incidente paralela a la superficie del océano F_w a la UM, basándose en la Ecuación 3.4, las fuerzas tangenciales y centrípetas medidas resultantes son:

$$F_C = F_w \times \cos(\alpha) + F_g \times \sin(\alpha), \quad (6.1)$$

y

$$F_T = F_w \times \sin(\alpha) + F_g \times \cos(\alpha). \quad (6.2)$$

Donde α es la diferencia angular entre el vector normal de la superficie del océano y la fuerza incidente en el plano que contiene ambos vectores.

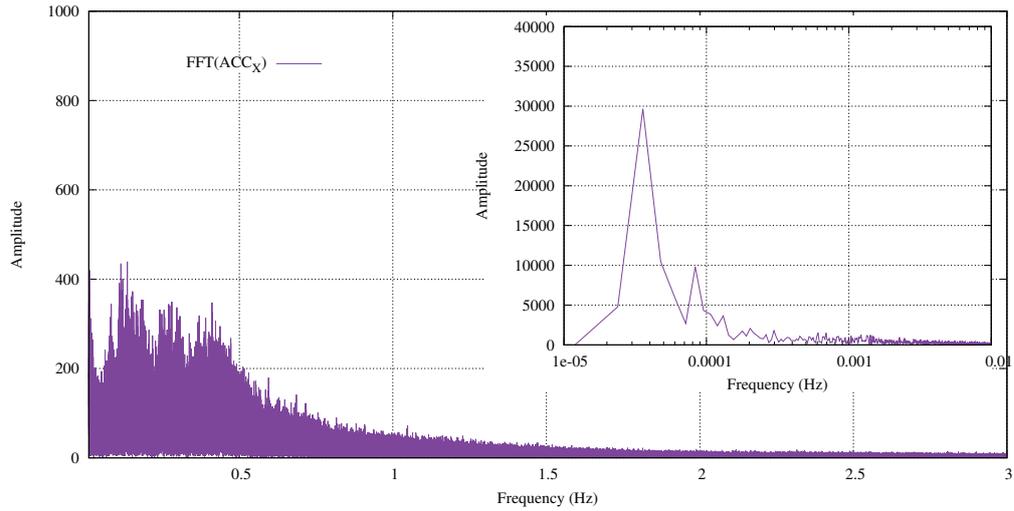
Se ha de tener en cuenta que la mayor parte del tiempo la posición de la UM está cerca de la vertical, en base a las ecuaciones 6.1 y 6.2, la medición es más sensible/variable en los ejes Y y Z que en el eje X, es decir F_T . Por esta razón, la fuerza gravitatoria posee mas representatividad en las figuras 6.4(b) y (c) que en la figura 6.4(a).

Por otro lado, la Figura 6.5 ilustra los mismos datos sin procesar capturados a lo largo de un día completo representados en términos de la frecuencia. En este caso la longitud de la FFT es $2^{20} = 1,048,576$ muestras que representan 23 horas, 18 minutos y 6,08 segundos. Por lo tanto, se capturan algo menos de 2 ciclos de marea completos.

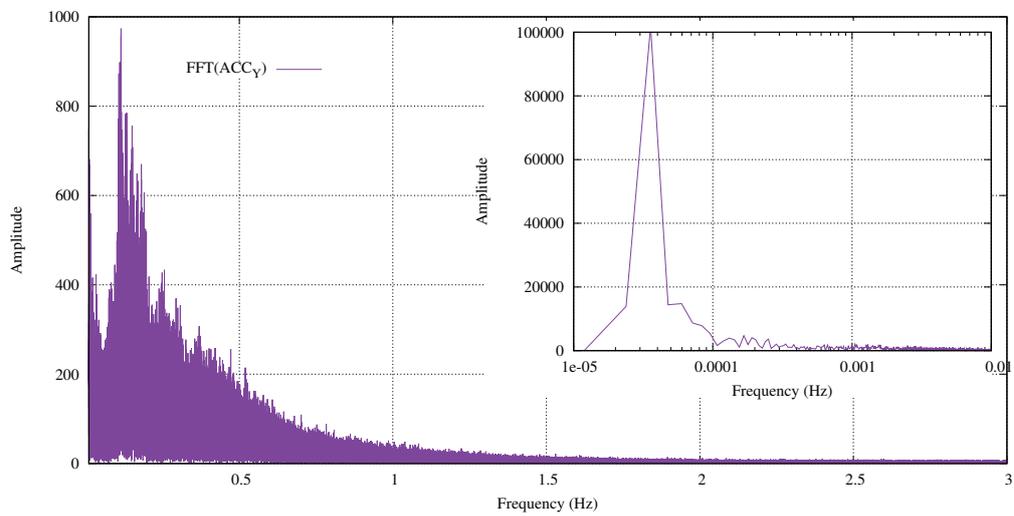
A primera vista, en comparación con la FFT de 10 minutos (consulte las figuras 6.5 y 6.3(a) para mas detalles), la señal y su lóbulo en la banda de 1,0 a 1,5 Hz ha desaparecido bajo la base de ruido. Sin embargo, esta conclusión es incorrecta. En este escenario, para una frecuencia de muestreo determinada, aumentar la longitud de la FFT mejora la visibilidad de las señales repetitivas y reduce las señales de un solo evento. Por lo tanto, una FFT de gran longitud es básicamente una función de distribución de probabilidad. Entonces, la señal de 1,5 Hz está ahí, pero su probabilidad de ocurrencia es muy baja en comparación con las otras frecuencias.

Por otra parte, la señal originada por la fuerza gravitatoria tiene un período $T = 44.701,2$ s, es decir, una frecuencia de $22,37 \mu\text{Hz}$. Cada figura incluye también una ampliación del rango de frecuencia ultra baja de la FFT, en escala logarítmica, de $1\text{E-}5$ a $0,01$ Hz. En este sentido, para todos los ejes de las UM esas subfiguras ampliadas presentan un pico de frecuencia en $35,76 \mu\text{Hz}$. Representa una señal con un periodo de 7 horas 46 minutos y 4,2 segundos. Obviamente, esta frecuencia no es debida a las fuerzas gravitacionales.

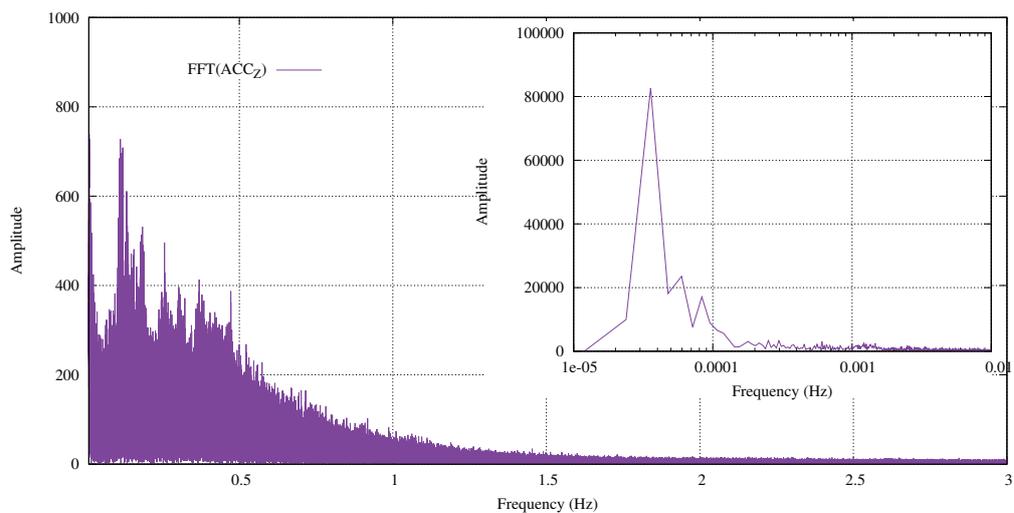
Este es otro problema debido a la longitud de FFT y la frecuencia de muestreo seleccionada.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.5: Representación en el dominio de la frecuencia de los datos adquiridos para un día completo. (a) $\text{FFT}(\text{ACC}_x)$, (b) $\text{FFT}(\text{ACC}_y)$ y (c) $\text{FFT}(\text{ACC}_z)$.

Siguiendo los criterios de Nyquist, una frecuencia de muestreo de 12,5 sps permite reconstruir correctamente una señal sinusoidal de 6,25 Hz. En este sentido, una FFT calculada con una señal de entrada de 2^{20} muestras tiene una resolución de $12,5/2^{20}=11,92 \mu\text{Hz}$. Suponiendo un error de ± 1 bin, el valor de la figura está bien. Por lo tanto, hay un problema de resolución. Para una frecuencia de muestreo dada y con una resolución de $0,1 \mu\text{Hz}$, la longitud de la FFT se calcula como:

$$\text{length}(FFT) \geq 2^{\text{Log}(\frac{\text{SamplingFrequency}}{\text{resolution}})/\text{Log}(2)} = 2^{\text{Log}(\frac{12,5\text{Hz}}{0,1\mu\text{Hz}})/\log(2)} = 2^{26,89} \quad (6.3)$$

Suponiendo el valor de la Ecuación 6.3 como longitud de la FFT, el tiempo resultante para una frecuencia de muestreo de 12,5 Hz es de 124,27 días. Por otro lado, esas muestras necesitan una memoria de $6\text{bytes/muestra} \times 2^{27}\text{muestras} = 768 \text{ MB}$. Independientemente del esfuerzo computacional para ejecutar una FFT de esta longitud, este número de memoria no es práctico para un microcontrolador de ultra baja potencia como el dispositivo integrado en nuestra UM.

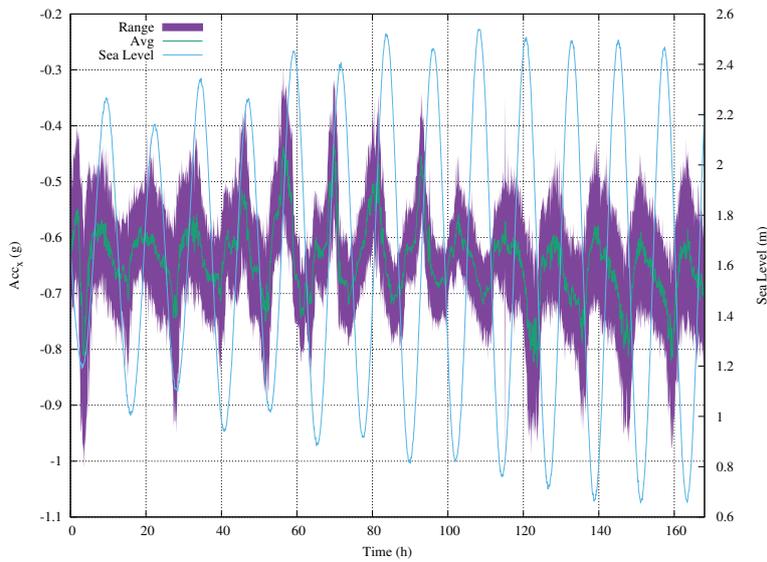
Atendiendo a la Ecuación 6.3, la manera fácil de reducir el número de muestras para obtener la resolución deseada es básicamente reducir la frecuencia de muestreo. Sin embargo, esta solución no es posible porque los 12,5 sps son necesarios para medir la frecuencia de onda máxima posible basada en [37].

6.2.2. Una Semana

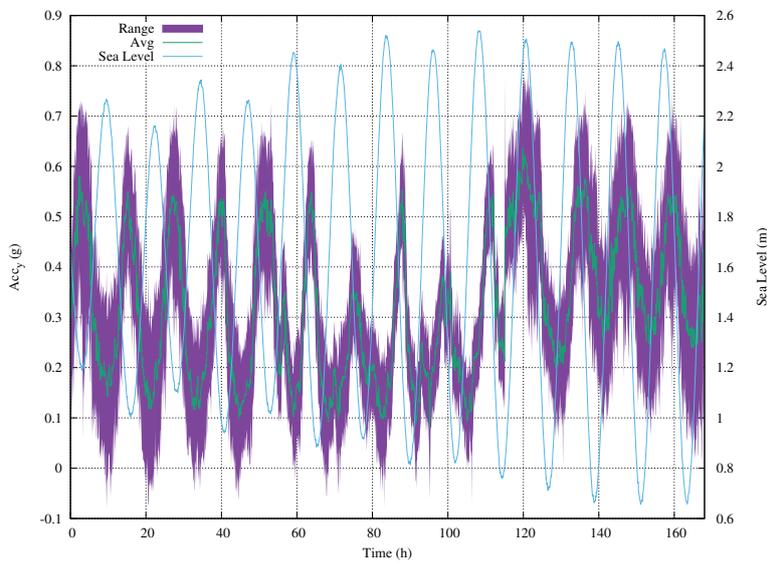
Las Figuras 6.6(a), (b) y (c) presentan la medida continua durante toda la semana (168 horas) utilizando una frecuencia de muestreo de 12,5 Hz para las tres aceleraciones ortogonales de nuestra UM. Esas cifras también incluyen el nivel de la superficie del océano para las fechas de captura en el eje de ordenadas derecho. El experimento comenzó el 5 de mayo de 2021 a las 12:00 PM y finalizó el 12 de mayo a la misma hora.

En todas las figuras, la acción de la fuerza gravitacional está claramente presente. Justo antes de la marea alta, las aceleraciones son máximas. Alcanzado el valor máximo de la marea, las aceleraciones reducen progresivamente su valor. El comportamiento inverso aparece para la marea de reflujo. El número total de muestras para una semana completa es de 7,46 millones de muestras. En términos de sensibilidad, como el registro de 10 minutos o de un día completo, la variabilidad de los movimientos es mayor en los ejes Y y Z de nuestra UM medidos paralelos a la superficie del océano.

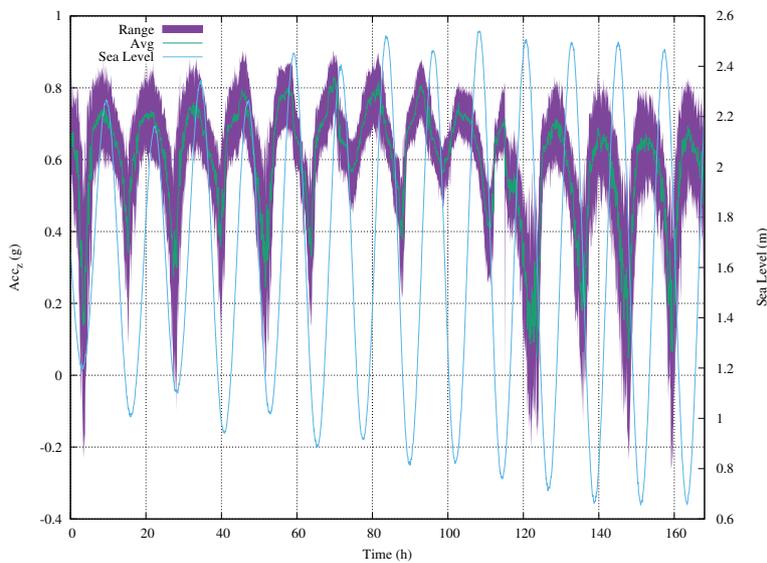
La periodicidad de las fuerzas gravitatorias no implica que los máximos y mínimos alcanzados



(a)



(b)



(c)

Figura 6.6: Representación en el dominio del tiempo de los datos adquiridos para una semana completa de muestras. (a) ACC_X , (b) ACC_Y y (c) ACC_Z .

a nivel de la superficie del océano sean idénticos día tras día. Es decir, a pesar de que todos los días hay picos y reflujos intercalados, cada aproximadamente 6 horas, el recorrido de las señales para alcanzarlos no es el mismo. Esta es la razón por la que se observan diferentes formas de onda a lo largo del tiempo en los datos de aceleración adquiridos.

Por ejemplo, la Figura 6.6(a) que muestra las medidas de ACC_X , presenta durante las primeras 40 horas adquiridas un comportamiento similar. En este período mensual, los picos y reflujos del nivel del océano comienzan cerca del nivel medio del océano y ambos comienzan a aumentar su distancia al nivel medio del océano. En términos del nivel del mar, este período corresponde al inicio de la subida del nivel del mar a lo largo del mes. Las próximas 40 horas pertenecen al ascenso de este máximo nivel de atracción gravitatoria del mes. Los picos aumentan hasta su máximo y los reflujos se mantienen cerca del nivel medio del océano. Luego, 40 horas donde los picos mantienen valores similares y los reflujos decrecen al valor mínimo. Finalmente, en el resto de horas se mantienen los valores máximos y mínimos.

Como se indicó en el apartado 6.2.1, la extracción de la frecuencia de las mareas gravitatorias de los datos sin procesar adquiridos no es práctica usando la FFT. En este sentido, en este trabajo se ha utilizado un detector de picos y reflujos reduciendo la frecuencia de muestreo a 5 minutos en lugar de 12,5 sps. La reducción de este valor se aplica mediante promediación. Solo para cumplir con una implementación práctica en nuestra propuesta, tan pronto como se adquiere una muestra a 12,5 sps, este valor se acumula junto con otros durante 5 minutos.

6.3. Comparativa

La Tabla 6.1 presenta la comparativa entre varios medidores de corriente comerciales y de investigación actuales. En general, la técnica basada en Doppler requiere una instalación en el fondo marino en comparación con la que podría instalarse en una línea de amarre. Las otras soluciones adoptadas se basan en una boya flotante. Es necesario resaltar que el instrumento utiliza la llamada frecuencia de muestreo interno (F_s) para medir la corriente de agua, no coincidiendo con la frecuencia de muestreo observada (F_s) en los datos de salida (Ver F_s y F_{si} en la Tabla 6.1). La excepción es el instrumento basado en turbinas, donde se produce un pulso por cada 360 grados de rotación de sus palas y no existe una frecuencia de muestreo como tal. Esta diferencia de frecuencias es necesaria para preprocesar los datos muestreados y aumentar su rendimiento original utilizando un promedio u otra técnica de filtrado.

F_s está en el rango de un par de minutos hasta 64 Hz en los dispositivos estudiados. El valor más común es alrededor de 1 Hz. En nuestro instrumento es de 12,5 Hz.

Se ha de tener en cuenta que algunos dispositivos Doppler son instrumentos de uso general y la frecuencia de muestreo aumenta hasta 64 Hz. Esto se debe a que otras especificaciones de aplicación para alcanzar mayores velocidades de objetos, como mediciones en aguas poco profundas, deformación de estructuras sumergidas, movimiento de biomasa, caudales de ríos, son otros objetivos de este tipo de equipos. En esas otras aplicaciones, las velocidades esperadas son mayores que las aplicaciones en aguas profundas.

En esta aplicación, la medición de la velocidad máxima está en el valor promedio de los dispositivos basados en inclinación. Por otro lado, la precisión es mejor que la de los dispositivos estudiados. La resolución alcanzada en nuestra propuesta es igual a la mejor solución Doppler (0,01 cm/s).

La mayoría de las soluciones utilizan como memoria para registrar los datos muestreados una tarjeta de memoria digital. Sin embargo, existen algunas soluciones industriales donde se incluyen una memoria interna que no se actualiza y es imposible adquirir una serie continua de datos debido a esta carencia. Algunos dispositivos incluyen una conexión a un servidor de Internet, pero esta ventaja de comunicación presenta varias penalizaciones en términos de tiempo de ejecución y tamaño.

El tamaño, la forma geométrica y el peso del instrumento juegan un papel importante en la metodología de medición, además de depender del tamaño de la batería utilizada. En nuestro caso, el instrumento propuesto es el de menor volumen. En la tabla 6.1, el costo de los dispositivos va desde \$20 k hasta \$50-40. El instrumento UM evaluado en este TFM está en la gama de bajo coste.

En general, el consumo de energía y fuente de energía determinan el tiempo de ejecución "standalone" del instrumento. El tiempo de funcionamiento "standalone" de la tabla se obtiene para el caso crítico en el que el instrumento utiliza su propia batería como fuente de alimentación. En este caso, el instrumento realiza mediciones continuas de más de 180 días a su máximo rendimiento.

Dado que la mayoría de las aplicaciones se ejecutarán en modo "standalone", es muy importante evaluar su eficiencia en términos de consumo de energía. La literatura de investigación y especialmente las soluciones comerciales no presentan tales datos de forma clara y concisa. Sin embargo, se puede comparar el número total de mediciones obtenidas en las mismas condiciones

Tabla 6.1: Comparativa entre soluciones industriales y de investigación.

Ref	Método	Ubicación	Año	F. Interna		V_{max} (m/s)	Precisión $\pm \% + \text{cm/s}$	Resolución (cm/s)	Tamaño (mm \times mm)	Peso (kg)	Datos	Stand Alone T. Ejecución	Num. Muestras	Coste
				F_{si} (Hz)	F_s (Hz)									
[41]	Doppler	Seabed	2022	23	4	5.0	$1\% + 1$	2.5	75×500	2.3	μSD	4 weeks	672	\$10-20 k
[42]	Doppler	Seabed	2022	250	64	7.0	$1\% + 0.1$	2.5	75×824	3.2	μSD	6 days	2304	\$10-20 k
[43]	Doppler	Seabed	2020	50	2	3.0	$1\% + 0.15$	0.01	139×356	7.0	μSD	2 hours	1	\$8-15 k
[44]	Turbine	Mooring	2020	-	(*1)	6.1	1%	NA	125×250	2.0	EC	NB	-	\$6-8 k
[45]	Tilt	Seabed	2015	8	1/60	0.8	$3\% + 3$	0.1	27×750	0.34	μSD	4 weeks	2.8	\$1.1-1.5 k
[46]	Tilt	Buoy	2022	1/120	1/120	1.1	NA	6.18	500×400	NA	IS	NB	-	2 k
[47]	Tilt	Mooring	2018	1	1	0.15	NA	NA	51×127	NA	μSD	56 days	2.8	\$50
[48]	Tilt	Buoy	2014	1	1	0.6	4%	5.0	78×380	NA	IM	6.2 hours	1.55	\$100
[10]	Tilt	Seabed	2020	10	1/60	1.0	20%	NA	245×2000	3.0	μSD	NB	-	NA
Our	Accel	Mooring	2022	12.5	12.5	0.8 (*2)	$0.85\% + 0.035$	0.01 (*3)	25.4×130	0.15	μSD	180 days	13500	\$50

*1: Cada vuelta produce un pulso.

*2: Asumiendo $\Delta v = \frac{1}{2} \Delta a / F_s$ y $\Delta a = 2g$.*3: Asumiendo $\Delta v = \frac{1}{2} \Delta a / F_s$ y $\Delta a = g/4096 = 0.2441 \text{mg}$.

NA: No Disponible. NB: Sin Modo Batería.

 μSD : Memoria microSD. EC: Contador Externo. IS: Servidor en Internet. IM: 21.4 K muestras en Memoria Interna.

como una figura de mérito de eficiencia energética (FoM). La columna etiquetada como Núm. Muestras en la tabla 6.1 presenta el FoM calculado como el tiempo de ejecución en modo "standalone" multiplicado por la frecuencia de muestreo (F_s).

Tomando como referencia el instrumento Doppler por ser el más preciso y de alta resolución [43], las otras soluciones Doppler son más eficientes en términos de número de datos capturados hasta tres órdenes de magnitud (ver referencia [42] en la segunda fila). La razón de ello es la resolución. La solución Doppler más eficiente tiene menos resolución (hasta 2 órdenes de magnitud). De manera similar, otros enfoques basados en inclinación son de 1,55 a 2,8 mejores pero a costa de una peor resolución. Si se compara el instrumento presentado con la mejor solución Doppler, la ventaja de usar la UM evaluada es cuatro órdenes de magnitud mejor con la misma resolución y precisión.

6.4. Resumen

Los datos adquiridos en una campaña a largo plazo en el año 2021, en condiciones naturales, por varias unidades de UMs en una jaula off-shore en explotación -la infraestructura de acuicultura utilizada es propiedad de Aquanaria S.L. en las Islas Canarias (España)- se han estudiado para determinar las frecuencias de los componentes dominantes de las mareas oceánicas en alta mar, a corto (10 minutos), medio (1 día) y largo plazo (una semana).

En el análisis realizado se aborda la problemática de definir la ventana temporal a analizar. Los efectos físicos a observar en el comportamiento de las mareas poseen frecuencias muy dispersas. La traslación de esos datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia ha visibilizado la problemática de extraer unas frecuencias fundamentales rodeadas de unos lóbulos equivalentes a una modulación en amplitud.

El estudio de frecuencia se basa en la FFT. Las limitadas capacidades de esfuerzo computacional del prototipo de UM empleado introducen la asignación de recursos como una variable de diseño para determinar el algoritmo para extraer las frecuencias fundamentales de las mareas oceánicas en áreas marinas.

Se ha demostrado que la frecuencia de muestreo seleccionada de 12,5 sps permite medir las corrientes de marea locales más rápidas, así como las debidas a las fuerzas de gravitacionales. Los más rápidos están por debajo de los 3 Hz y los más lentos alrededor de los 23 μ Hz. El rango de frecuencias a medir requiere diferentes técnicas para ser eficiente en términos de memoria y

esfuerzo de CPU dado que se trata de una aplicación de bajo consumo.

En este sentido, este trabajo ha encontrado que el uso de la FFT podría ser útil como un primer paso de aproximación para determinar el rango de las principales frecuencias cercanas a los Hz. Obtenido este rango, es mejor utilizar un detector de pico-valle en lugar de la FFT debido a la variabilidad de las señales entrantes. En todos los experimentos, nuestro prototipo ha demostrado la utilidad del método propuesto para obtener el perfil de aceleraciones de las mareas oceánicas en alta mar.

Capítulo 7

Extracción de la Frecuencia

Entendiendo las limitaciones en términos de esfuerzo computacional requeridos para resolver la obtención de las frecuencias fundamentales empleando el algoritmo rápido de Fourier (FFT), se concluye no práctico en la inmensa mayoría de situaciones abordadas en los capítulos anteriores.

Atendiendo a la literatura y aplicaciones industriales, la solución más empleada es la llamada AMPD (Automatic Multiscale-based Peak Detection, en lenguaje anglosajon) [39]. Este algoritmo extrae la frecuencia fundamental de una señal periódica que incorpora una cantidad de ruido apreciable. La gran problemática que aporta esta solución, al igual que el resto de las aportaciones en la literatura, es que su formulación matemática está basada en la desviación típica de la señal promediada. Por otro lado, y no por ello menos importante, se ha de resolver empleando variables reales.

El requisito de variables reales se puede sortear, si se cuantifican dichas variables y asume un error de cuantificación. El problema surge porque la función matemática de cálculo de la desviación típica incluye una función potencial, en particular una raíz cuadrada. Este último escollo hace imposible su implementación en un microcontrolador de ultra bajo consumo que posee sólo una unidad aritmética básica para enteros.

Por todo ello, las soluciones prácticas actuales se basan por lo general en el uso de la media móvil. Estas técnicas generalistas, promedian ventanas de tiempo para comparar unos umbrales pre-definidos de antemano. El costo computacional de estas aportaciones baja drásticamente con respecto a los requisitos de la FFT y la AMPD. Su debilidad radica en la determinación de unos umbrales precisos.

7.1. Promediado

Como se ha apuntado anteriormente, la mayoría de los instrumentos actuales usan el promediado como algoritmo básico para mejorar su resolución, tanto a nivel industrial como en la literatura científica. El promediado de muestras es un artilugio matemático sencillo de implementar. De hecho en muchos sistemas de adquisición ADC (Analog to Digital Converter, conversor analógico a digital) implementan una memoria mínima de tipo FIFO (First In First Out, primero en entrar primero en salir) que unido a un sumador más acumulador y desplazador, calculan el promedio mediante ese hardware específico sin tener que intervenir la CPU en el proceso.

7.1.1. Filtrado

Por otro lado, la función promedio no deja de ser un filtro paso bajo. De hecho, la función promedio es básicamente un filtro de respuesta impulsiva o comúnmente conocido por su siglas en inglés FIR (Finite Impulsive Response). La ecuación que modela un promediado de N muestras como expresión de un filtro es:

$$y_n = \sum_{k=0}^{N-1} (h_k \cdot x_{n-k}) \mid h_k = \frac{1}{N} \quad (7.1)$$

Se puede observar en esta ecuación, que el coeficiente h_k del FIR se calcula como la inversa del número de muestras a promediar ($1/N$).

Suponiendo un sistema de adquisición a 12,5 sps, la figura 7.1 presenta su respuesta en frecuencia para unos promediados empleando una longitud de 4, 8, 16 y 32 muestras. Si se emplea un promediado de 4 muestras, se obtiene un filtro paso bajo con un ancho de banda de aproximadamente 2,0 Hz a 3 dB. Cierto es, que la atenuación mínima alcanza unos 7 dB para el primer lóbulo de la banda eliminada. Para el promediado de 8 muestras, el ancho de banda es aproximadamente de 1,25 Hz y así sucesivamente.

7.2. Detectando las Frecuencias

Si se estudia entonces la respuesta en el dominio del tiempo del filtrado frente a la señal de entrada. Para ello se toman 128 muestras a una tasa de 12,5 sps y se comparan con las salidas de esa misma señal promediada a 4, 8, 16 y 32 muestras. La figura 7.2 presenta dicha comparativa.

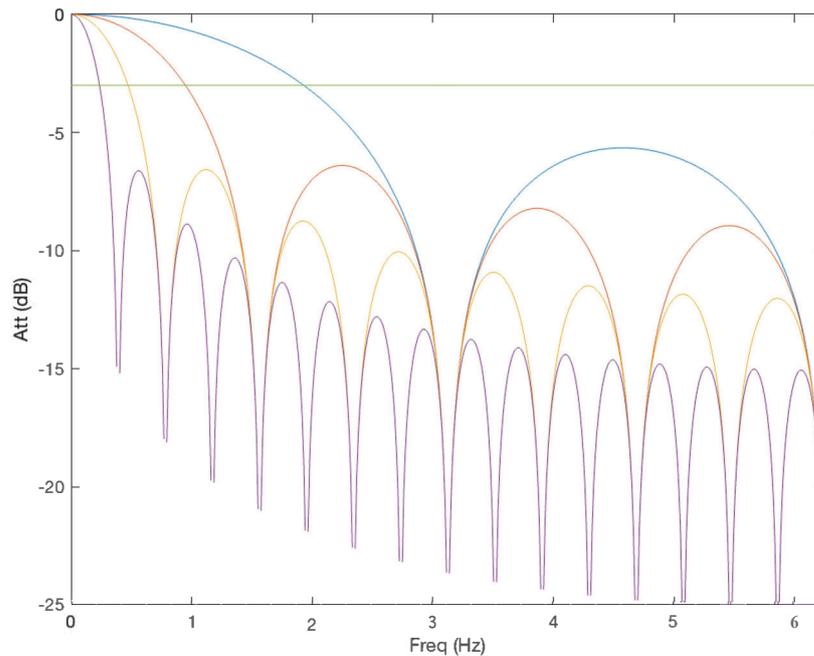


Figura 7.1: Respuesta impulsiva de un promediador de 4, 8, 16 y 32 muestras (líneas azul, roja, naranja y violeta respectivamente). La línea verde representa una atenuación de 3 dB.

En esta figura, la gráfica superior se corresponde con el promediado de 4 muestras, la segunda de 8, la tercera con 16 y la gráfica inferior con 32 muestras. Se puede observar que el promediado de tan solo 4 muestras sigue perfectamente las tendencias de la señal de entrada. Esto se debe a que con el filtro de 4 muestras, el ancho de banda efectivo del filtro alcanza los 2 Hz. Atendiendo a lo expuesto en el capítulo dedicado al estudio en frecuencia de la señal, el filtrado aplicado deja entrar el grueso de las componentes principales de la señal involucrada. Por el contrario, el ruido que se introduce por el hecho de aumentar la frecuencia de muestreo muy por encima de la frecuencia teórica de Nyquist es eliminado.

A medida que se aumenta el número de muestras a promediar, el seguimiento se va reduciendo. El aumento de muestras produce la disminución del ancho de banda del FIR y por tanto se hace el sistema menos sensible a las componentes de alta frecuencia. Si se escoge uno de esos promediados y se busca sus cruces por cero con la señal original, se puede obtener las frecuencias fundamentales que compone la medida.

A modo de ejemplo, suponiendo que la señal de entrada $s(t)$ con dos frecuencias fundamentales $f_1 = 0,5$ Hz y $f_2 = 1,75$ Hz. Las potencias de dichas frecuencias son una el doble de la otra y el ruido del sistema se encuentra a 15 dB de la frecuencia de más potencia. Atendiendo a los filtros presentados en la figura 7.1 y manteniendo la frecuencia de muestreo de la señal a 12,5 sps,

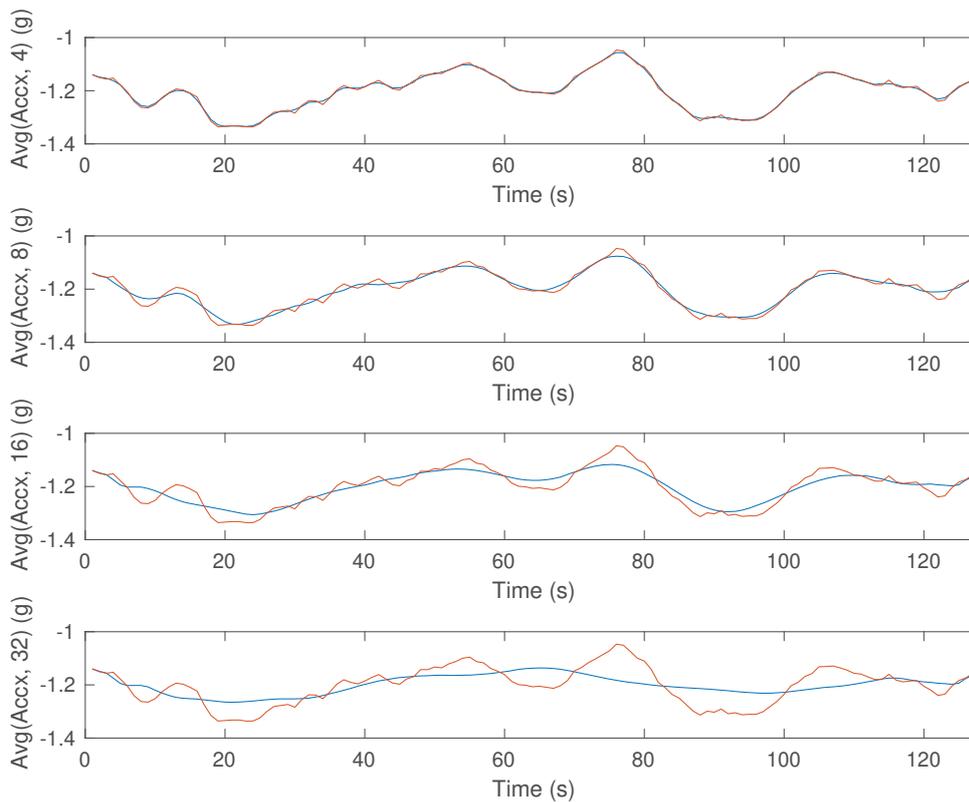


Figura 7.2: Respuesta temporal de un promediador de 4, 8 16 y 32 muestras dados 124 segundos de una señal muestreada a 12,5 sps.

es evidente que al someter a $s(t)$ a un promediado de longitud 8, la señal f_2 se ve muy atenuada. Por tanto la diferencia la señal de entrada y la señal resultante del filtro posee eminentemente la componente f_2 . Por tanto, si se detectan los pasos por cero de la función diferencia de la entrada y lo filtrado, se obtiene la frecuencia buscada.

Con esta técnica, la selección adecuada de la longitud del promediado y las señales diferencia es posible recorrer el espectro en el dominio del tiempo para determinar la existencia o no de una componente o varias en un ancho de banda determinado. Por otro lado, es necesario recalcar que al detectar los pasos por cero se adquiere el conocimiento de las frecuencias existentes, pero por desgracia no de su potencia.

7.3. Algoritmo de Alto Nivel

A modo de resumen, el algoritmo propuesto en este TFM para detectar las frecuencias presentes en la señal consiste en un detector de pasos por cero previo filtrado, tal y como se ha expuesto en el apartado anterior. La figura 7.1 muestra la descripción del algoritmo de alto nivel desarrollado e implementado en este TFM ejemplarizado para obtener el ruido del instrumento

(cuantificación y sobremuestreo, entre otros).

Recordemos que se tiene una señal de frecuencia máxima de poco más de 2,0 Hz. Por ello, nuestra propuesta comienza realizando un filtrado con un ancho de promediado de 4 muestras y así garantizar ese ancho de banda que es de interés.

En segundo lugar, se resta la señal filtrada a la señal de entrada. Con ello se logra eliminar las componentes inferiores a 2 Hz que contienen los armónicos fundamentales del oleaje. Para proseguir ejecutando los pasos de 3 a 6, los cuales son operaciones matemáticas/algóritmicas para detectar los ceros de la resultante. Si se entiende que el paso 4 calcula la derivada de la resultante y el 5 la cuantifica a unos valores extremos [-1, 1]. El paso último calcula la derivada segunda y es ahí donde ya se posee la información de máximos y mínimos. Los mínimos se corresponden con los cruces entre la señal original y la filtrada. Los máximos se corresponden los los máximos y mínimos de esa señal diferencia.

Paso	Comando	Descripción
		% $AccX$ = vector de muestras adquiridas
S1:	$sAccX4 = smooth(AccX, 4)$	% Promediado longitud= 4, FIR(BW = 2 Hz)
S2:	$smAccX = AccX - sAccX4$	% Diferencia señales
S3:	$asmAccX = abs(smAccX)$	% Iguala flancos de subida y de bajada
S4:	$dAccX = diff(asmAccX)$	% Calcula pendientes muestras
S5:	$nAccX = sign(dAccX)$	% -1 pendiente negativa, +1 pendiente positiva
S6:	$Solution = diff(nAccX)$	% Calcula cambios de pendiente

Tabla 7.1: Algoritmo de alto nivel para evaluar la frecuencia del ruido.

La variable *Solution*, del algoritmo presentado, es un vector que posee valores negativos en aquellos puntos donde la señal diferencia se hace cero y valores positivos donde tiene máximos y mínimos. Nuestro interés se centra en los puntos de valor negativo. Dados dos máximos contiguos, la distancia entre sus índices en el vector *Solution* es la inversa de la mitad del periodo de la frecuencia presente en la señal de entrada.

La figura 7.3 representa los valores de los vectores temporales que se obtienen al aplicar el algoritmo propuesto para obtener el ruido presente en la banda de paso superior a 2 Hz de la señal a procesar. En la gráfica superior se presenta la señal resultante de muestrear las aceleraciones con la UM empleada en este TFM. En particular se representa el las aceleraciones en el eje X. Además en este primer gráfico se representa la misma señal tras promediarla con una ventana de longitud 4. Como era previsible, la diferencia entre ambas es muy baja.

La gráfica identificada como S2 es el resultado de ejecutar el paso S2 del algoritmo que con-

siste en obtener la diferencia entre las señales representadas en la gráfica superior. A primera vista se puede observar que la señal diferencia es muy variable. Estas diferencias son de pequeña magnitud en relación a las señales que procede, pero de variación muy rápida, i.e., son componentes en alta frecuencia. En particular, la señal obtenida tiene que estar contenida dentro del filtro paso banda 2,0–6,25 Hz. Si por ejemplo se observa la curva S2 entorno a la muestra 50 ó la 90, se puede apreciar que durante 8 muestras aparece una secuencia correlativa de máximo y mínimo con una distancia de 2 muestras. Puesto que el periodo de muestreo es de 12,5 Hz, esa secuencia denota la presencia de una señal de 6,25 Hz.

7.4. Implementación

El objetivo final de este algoritmo es embarcarlo dentro de la UM que posee un ARM Cortex M0+. La única unidad aritmética que posee es entera y la operación matemática más compleja hardware que puede ejecutar es una multiplicación de enteros de 32 bits. Puesto que su SDK por defecto emplea GCC (compilador C de GNU), es posible compilar la librería matemática para el tratamiento de números reales. Sin embargo, el costo computacional sería impensable desde el punto de vista práctico, sin decir nada del consumo energético. Fijadas los condicionantes del instrumento, se da lugar a su implementación.

7.4.1. Datos de entrada

En primer lugar, a pesar de que en las gráficas expuestas en este TFM se aprecian unidades medidas en términos de g (m/s^2). La realidad es que los datos que entrega el subsistema de medida de aceleraciones al microcontrolador no dejan de ser generados en última instancia por un ADC. Los datos por tanto se encuentran expresados originalmente como vectores de enteros. La representación como vectores de números reales (punto flotante) son una mera traslación lineal que es prescindible.

La UM empleada permite muestrear a 8 y 14 bits en sus adquisiciones. En todas las pruebas realizadas se ha optado siempre por seleccionar la máxima resolución de la conversión. Por tanto la salida de nuestro ADC con 14 bits para una muestra de aceleración incluyendo signo posee un fondo de escala de 8192 para el mayor positivo y -8191 para el valor más negativo posible.

Así mismo, durante las pruebas se ha supuesto siempre que el océano no iba a producir una fuerza superior a 2 g en sus corrientes subacuáticas, la escala de entrada seleccionada es de $[-2,0, 2,0] m/s^2$. Lo que significa que si solo está presente la gravedad en la medida, se obtiene una

medida de $F_g = 4096$ y no 1.

7.4.2. Implementación de Operaciones matemáticas

Un punto importante en la implementación práctica de cualquier algoritmo es la complejidad de las funciones requeridas. Como se puede intuir, la operación de promediado es básicamente una sumatoria de multiplicaciones. Ciertamente es también que el coeficiente multiplicador es la inversa de la longitud de la ventana de promediado. Ello implica una división, operación que no se soporta por hardware en el microcontrolador de la UM.

Si dicha longitud es un número par, la operación de división se puede sustituir por un desplazador a derecha. Cada desplazamiento unitario a derecha equivaldría a una división por 2. En caso de requerir que dicha longitud requiriese un factor no potencia de dos, se podría aplicar la misma política, pero descomponiendo el número en su equivalente en sumas de potencias de dos.

Esta técnica de división es muy eficiente en términos de esfuerzo computacional, sin embargo su característica se ve empañada por la imposibilidad de abordar la división con divisores impares. En realidad sí puede emplearse tales números, pero asumiendo un error. En este TFM se optó por asumir dicho error, la forma de operar en caso de requerir un divisor impar es tomar el número par inmediatamente superior al divisor en cuestión.

Téngase en cuenta que el parámetro del algoritmo que potencialmente requeriría un divisor impar es una constante en tiempo de diseño. Por ello, el error que se asume no es tal, ya que se conoce en tiempo de diseño y por tanto es posible eliminarlo mediante por ejemplo la elección del número de muestras totales a procesar en cada fase de medida por ejemplo.

El segundo paso S2 y tercer paso S3 del algoritmo propuesto son directamente una resta y eliminar el signo. Las cuales son operaciones que se implementan con una simple resta aritmética entera para S2 y una comparación en S3. Esta última en S3 ejecutándose directamente en la CPU y no en su unidad aritmética. La función derivada (diff en matlab), realmente es la resta de los valores contiguos de muestras. Con lo que se implementa con un bucle que recorre el vector de entrada y devuelve el vector de la resta de los N-1 pares de muestras.

La figura 7.4 presenta la respuesta del algoritmo trabajando con variables enteras de 32 bits. Se puede observar que a efectos prácticos las grandes diferencias radican en las cuatro gráficas superiores que pasan de expresarse en su eje vertical de m/s^2 a unidades de conversión y por

tanto ser un número entero que representa la fracción $1/4096 \text{ m/s}^2$ por unidad.

7.5. Resumen

En este capítulo se ha abordado la extracción de los valores de frecuencia fundamental presentes en las señales obtenidas a partir de la medida de las aceleraciones empleando la UM desarrollada por la división MEMS. En primer lugar se estudia y discute en qué consiste realizar un promediado desde el punto de vista de la frecuencia y como con esa técnica se pueden extraer las medidas deseadas.

En base a ello, este TFM propone un algoritmo para realizar tal tarea. Se presenta una implementación a alto nivel del mismo y se particulariza un ejemplo del mismo en código de alto nivel para MatLab.

Además se discute en detalle su traslación a bajo nivel, con el objetivo de implementarlo en un microcontrolador ARM Cortex M0+ que no posee más que una unidad aritmética entera. Se finaliza, presentando los resultados de los distintos pasos cuando el algoritmo propuesto se ejecuta en el sistema empotrado del que versa este TFM.

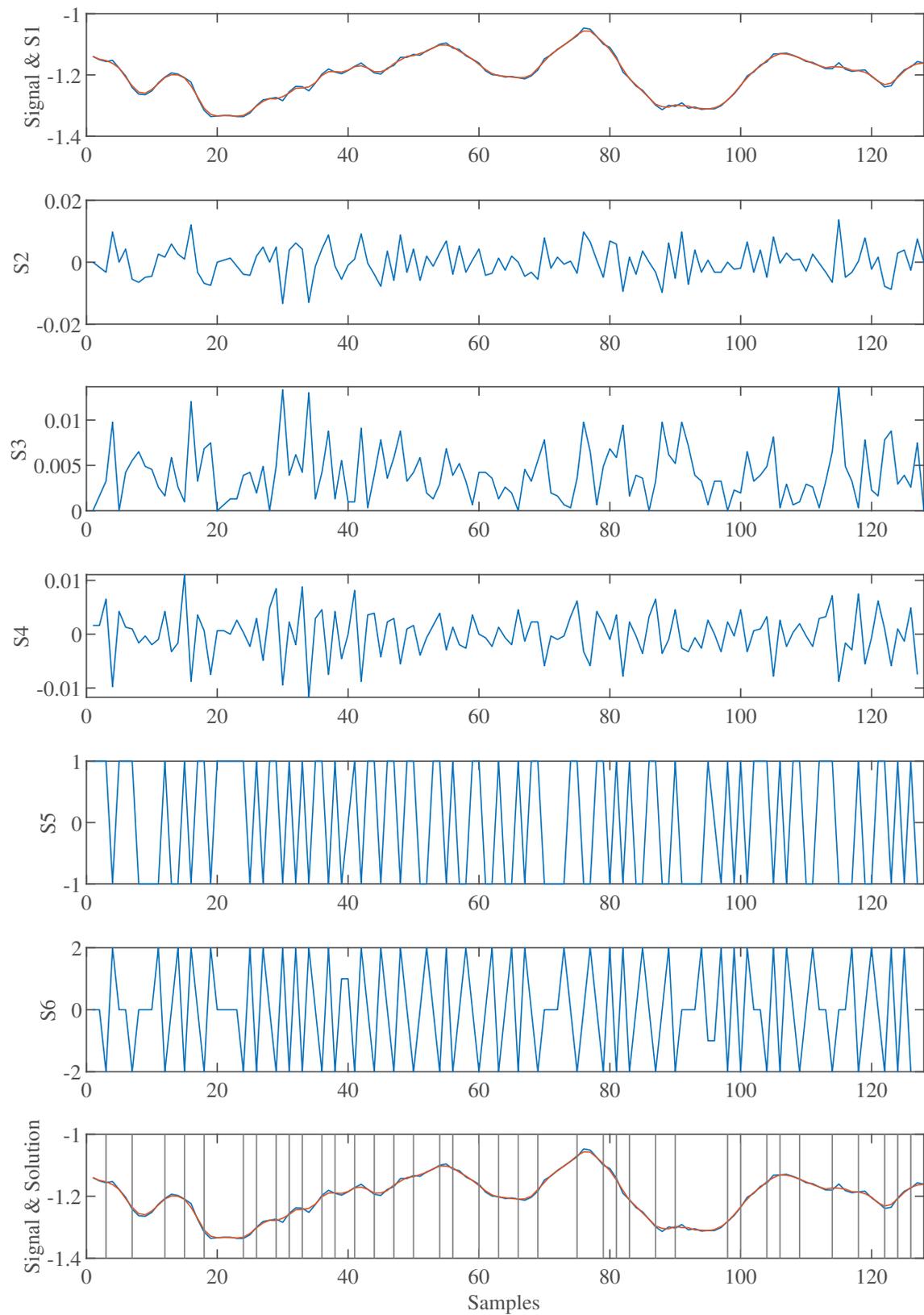


Figura 7.3: Evolución de los cálculos del algoritmo propuesto en cada paso.

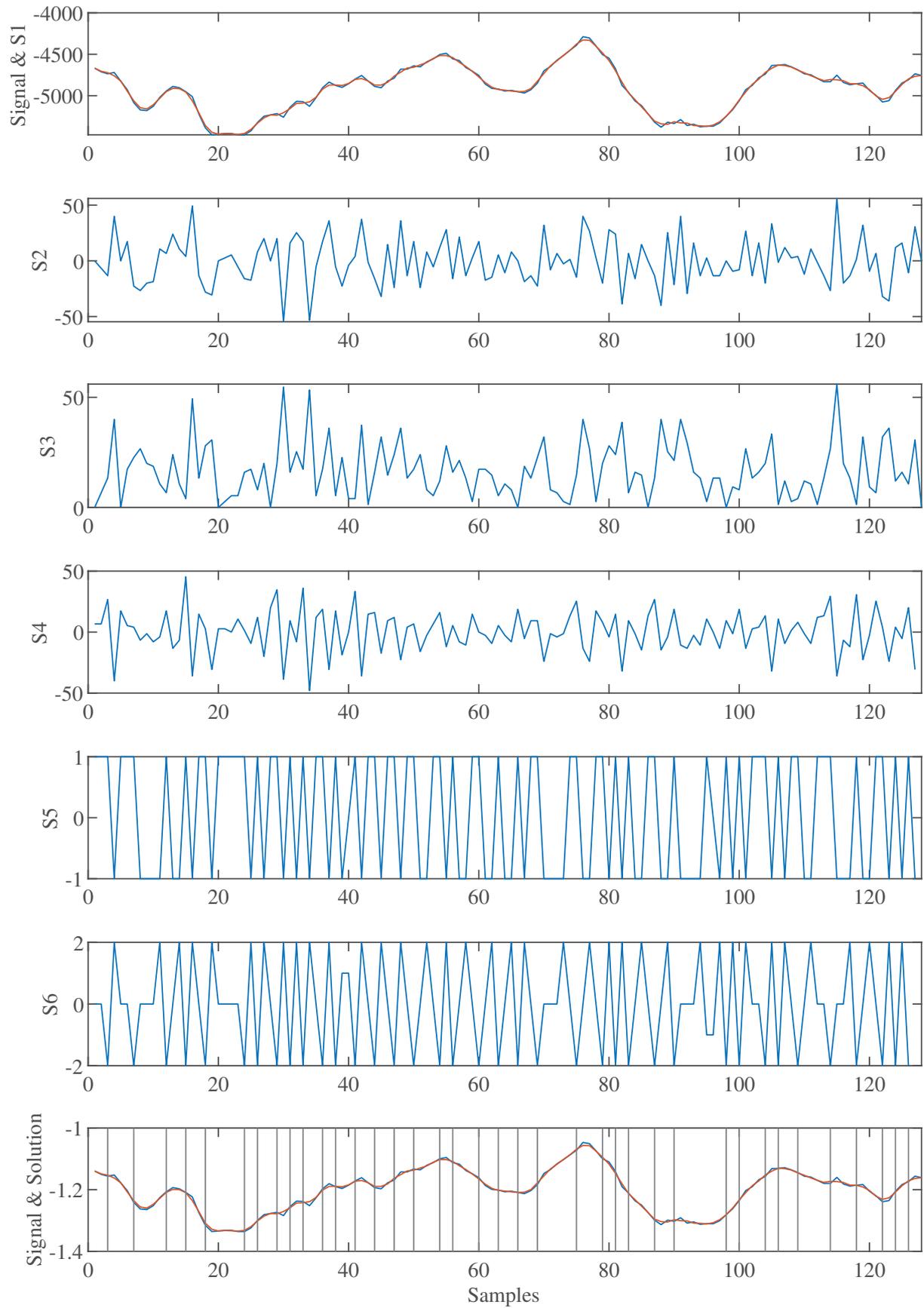


Figura 7.4: Evolución de los cálculos del algoritmo propuesto en cada paso.

Capítulo 8

Conclusiones y Líneas Futuras

El capítulo de conclusiones y líneas futuras incluye los principales hitos alcanzados en la realización del TFM, generalmente, y aquellos otros que han surgido. Sin embargo, aquí también se añade otros aspectos relativos a cómo se ha realizado el trabajo y sobre los hitos alcanzados. En cada capítulo de la memoria se ha añadido un resumen final, que también incluye las conclusiones alcanzadas. No obstante lo anterior, se concluye:

- Se han evaluado y desarrollado distintos algoritmos para la extracción de los parámetros de oleaje y mareas basándose en un sistema empotrado de ultra bajo consumo. Este sistema está orientado a determinar las corrientes marinas a distintas profundidades a partir de medidas inerciales. El microsistema de medida inercial se utiliza para desarrollar un instrumento que monitorice parámetros estructurales y ambientales en el proyecto “MOONLIGHT: MOORiNg Line sensInG for offsHore aquaculTure” (PID2020-117251RB-C21, Ministerio de Ciencia e Innovación, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada).
- Se han procesado series de datos procedentes de campañas de medidas de larga duración, de 189 días, en condiciones operativas reales. En las instalaciones de Aqvanaria S.L., Castillo del Romeral, Gran Canaria, España, se ha desplegado la tecnología sobre líneas de amarre de jaulas mar adentro.
- Las series de datos adquiridos (aceleraciones), han permitido correlar las frecuencias de aceleraciones y del oleaje y las mareas.
- Con la FFT (Transformada Rápida de Fourier), se han estudiado la frecuencia de las componentes dominantes de las mareas en alta mar a corto, mediano y largo plazo. Las frecuencias obtenidas están de acuerdo con las series de datos disponibles del Ministerio de Defensa en colaboración de Puertos del Estado.

- Dada los recursos de computación requeridos para resolver el algoritmo FFT , para el sistema de medida inercial se ha desarrollado una solución práctica basada en un detector de picos-valles. El algoritmo propuesto se ha aplicado a las series de datos de campañas de largo plazo. El algoritmo se fundamenta en el promediado de un determinado número de muestras.
- El procesado se fundamenta en un filtrado FIR digital, y una posterior resta de señales procesadas. El tiempo entre pasos por ceros es dos veces la frecuencia de interés.
- El algoritmo desarrollado y embarcado en el microsistema permitirá el aumento de las funcionalidades y hace posible prescindir de los datos crudos capturados y almacenar sólo las frecuencias y amplitudes de las corrientes oceánicas en la unidad de almacenamiento.

Atendiendo a los objetivos planteados al comienzo de este TFM, se puede concluir que se han cumplido los mismos. En referencia a estos, indicar que desde el punto de vista de la dedicación al trabajo, alcanzar cada uno de los objetivos a supuesto un reto personal que requiere un esfuerzo constante, independientemente, de la fase en la que se encontrase el trabajo.

En primer lugar, la toma de contacto con la UM supuso el primer esfuerzo importante de este trabajo. Como se ha indicado a lo largo de este documento, este instrumento se encuentra en fase de prototipo. A pesar de no requerir programarlo a bajo nivel, las particularidades del mismo hicieron imprescindible entender la arquitectura y operatividad del mismo, al margen de los clásicos usos, características y teoría relativas a este tipo de equipo oceanográfico. Poniendo en valor la formación en ingeniería, los nuevos conceptos referentes al océano, mares y comportamiento del agua requieren un especial cuidado para entender muchas de las decisiones que se tomaron a la hora de desarrollar la UM y el porqué de ciertas funciones operativas.

Uno de los grandes hándicap en el trabajo es el desfase que hay entre las campañas de datos y la recogida de datos. En Tecnología Electrónica se presupone, por lo general, que todas las pruebas de cualquier dispositivo se han de realizar en un entorno controlado, lo cual que permite reproducir aquellos eventos de interés o esquinas críticas. En el caso de este TFM, puesto que el dispositivo se encuentra en fase de prototipo, las pruebas a las que se someten, an la actualida, van más allá de la etapa de validación del software y test del hardware. En la actualidad, se trata de comprobar la solidez de los datos obtenidos, en comparación con los disponibles en bases de datos. Por otro lado, el desarrollo de nuevos algortimos van más allá de verificarlos, y se requiere comprobar en la práctica que se obtienen mejores resultados que los instrumentos comerciales. Ello implica que cualquier prueba requiere una fase de despliegue, otra de medidas y otra de recogida. A lo largo de ese periodo, desde que sale del laboratorio el equipo programado, hasta

que vuelve, pasa mucho tiempo en comparación con las pruebas tradicionales a las que se está acostumbrado en electrónica.

Por otro lado, el dispositivo se pone a trabajar en condiciones reales. Y dichas condiciones son completamente aleatorias. Ello implica que la variable tiempo se amplie hasta que las condiciones que se pretenden evaluar se dan. Por ejemplo, una prueba del equipo con la llamada mar de fondo, es decir, inclemencias climáticas fuera de lo usual. Es un acierto que en la división MEMS se posean capturas de datos de unas pocas horas e incluso de hasta 6 días. Fué a lo largo de este TFM, cuando se realizó una campaña de toma de medidas de largo plazo, donde también se realizó una prueba de tiempo de vida .

El resultado de dicha toma de datos es muy clarificante de la cotidianidad en las pruebas que se desarrollan con este tipo de instrumental. En la prueba se desplegaron seis UM. Los equipos se situaron en tres líneas de amarre a una profundidad de 15 y 25 metros. Las líneas de amarre se seleccionaron por la empresa siguiendo un criterio de máxima exposición a la corriente. La prueba de tiempo de vida consistió en una vez arrancada la medida, esta se ejecutase hasta que la batería lo permitiera. Se capturarían datos por periodos de cinco minutos indefinidamente.

El horizonte temporal máximo esperado era de 188 días como se ha calculado en apartado correspondiente de esta memoria. A los 189 días del comienzo de la campaña, se procedió a recoger las seis unidades. Una de ellas se perdió, sin saberse a que fue debido. De las cinco recuperadas, una de ellas dejó de funcionar a los 45 días pues su batería se deterioró. Tras observar en detalle la batería y su deterioro, se concluyó que la batería empleada era una imitación. De las cuatro restantes, una de ellas ejecutó 154 días de muestreo. Ello se debió a un error humano. Por error programó 22 semanas de captura, que era la propuesta inicial de la empresa antes de decidir dejarlas las 27 semanas (189 días). Aún así, se comprobó que el resto de energía que tenía esa batería se correspondía con la que hubiese necesitado para llegar a las 27 semanas. Las otras tres UM lograron alcanzar las 27 semanas. Una de ellas incluso tenía energía para alcanzar la semana 32.

El algoritmo propuesto en este TFM se ha logrado en base a trabajar con los datos reales de esas 4 botellas. La disponibilidad de los datos no garantizan la consecución de los objetivos del TFM. Hay que tener en cuenta que en la división MEMS se tenía una idea de que tipo de implementación sería la más factible. De ella ha mandado los requisitos y guiado el camino para la consecución, pero es el trabajo sobre las señales, primero identificando las frecuencias en el PC de sobremesa mediante las técnicas tradicionales como detectores de pico, buscadores de máximos

e incluso la transformada de Fourier para llegar a encontrar y afinar el algoritmo que se presenta en este documento.

Por otro lado, una vez se posee el algoritmo en alto nivel, es necesario realizar un proceso de optimización y refinado que permita implementarlo, en primera instancia en el propio equipo de sobremesa, para posteriormente llevarlo a la plataforma de programación de la UM. Este trabajo también se ha realizado, pero no se presenta en este documento, pues como se ha visto en el capítulo anterior, presentar un cuadro con varios bucles que simplemente suman un vector y a su resultado se le desplaza a derecha para aplicar una división.

El embarque de este algoritmo como parte de la UM se traduce no solo en el aumento de las funcionalidades de la misma, sino que es posible prescindir de los datos crudos capturados y almacenar sólo las frecuencias y amplitudes de en la unidad de almacenamiento. Considere que la reducción de consumo de energía debida al almacenamiento pasa de 127 mA a 0.45 mA. Suponiendo que ambos procesos tienen una duración idéntica en el peor de los casos, la reducción supone un factor de 282 veces. En otras palabras, se dispone de aproximadamente 66 mA/s en cada medida de 5 minutos de duración. Para la batería de 3400 mA supone un 8,8% de su máxima capacidad y en términos de vida de la UM, pasaría a tener una longevidad de 173 días.

Por último, considero importante resaltar que este trabajo no se cierra aquí a pesar de cumplir satisfactoriamente con los objetivos planteados al comienzo del mismo. Se abre un amplio conjunto de posibilidades tras el desarrollo de este TFM, es decir líneas futuras. Por un lado, del análisis de las señales crudas hay muchas ideas que han surgido a lo largo de este TFM como es aplicar otras operaciones matemáticas como la lognormal. No es descartable también el empleo de Inteligencia Artificial, en forma de redes neuronales o algoritmos evolutivos. Por otro lado, desde el punto de vista de la medida la aplicación de la llamada fusión de sensores para combinar ya no solo uno de estos dispositivos, sino un grupo de ellos e interrelacionar las medidas para caracterizar por ejemplo las corrientes no en un punto, sino en su integridad.

Bibliografía

- [1] B. Villas, F. Arduin, A. Ayet, MA. Bourassa, P. Brandt P, et all., Integrated Observations of Global Surface Winds, Currents, and Waves: Requirements and Challenges for the Next Decade. *Front. Mar. Sci.* 6:425. 2019, doi: 10.3389/fmars.2019.00425
- [2] R. M. Samelson, "The Theory of Large-Scale Ocean Circulation", Cambridge University Press, 2011, ISBN: 9780511736605.
- [3] Melvin E. Stern, "Ocean circulation physics", Academic Press, Londres 1975, ISBN: 0-12-666750-0.
- [4] M. G. Velarde; R. Y. Tarakanow; A. V. Marchenko, "The Ocean in Motion: Circulation, Waves, Polar Oceanography", Springer Oceanography, 2018, ISBN: 978-3319719337
- [5] H. Song; C. Kuang; X. H. Wang; Z. Ma; "Wave-current interactions during extreme weather conditions in southwest of Bohai Bay, China", *Ocean Engineering*, 2020, 216.
- [6] R. Prashant; K. Rajni,"Spectral wave modeling of tsunami waves in Pohang New Harbor (South Korea) and Paradip Port (India)", *Ocean Dynamics*, 2020, 70, 1515 – 1530.
- [7] Li, J.; Gao, F.; Zhang, D.; Cao, W.; Zhao, C. Zonal Distribution Characteristics of Microplastics in the Southern Indian Ocean and the Influence of Ocean Current. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 290. <https://doi.org/10.3390/jmse10020290>.
- [8] Annett S. Trebitz, "Characterizing Seiche and Tide-driven Daily Water Level Fluctuations Affecting Coastal Ecosystems of the Great Lakes", *J. of Great Lake Research*, 32 (1), 2006.
- [9] Young, I.R.; Ribal, .A. Can Multi-Mission Altimeter Datasets Accurately Measure Long-Term Trends in Wave Height?", *Remote Sens.*, 2022, 14, 974. <https://doi.org/10.3390/rs14040974>
- [10] Kjeldorff, M.; Kutteneuler, J.; Kirchner, N.; Krützfeldt, J.; Sundberg, M., "Water current measurements using oceanographic bottom lander LoTUS", *Applied Ocean Research*, 2020, 94. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101982>

- [11] Bugnon, F. J.; and Whitehouse, I. A.; "Acoustic Doppler current meter", IEEE Journal of Oceanic Eng., 16 (4) , 1991, doi: 10.1109/48.90908.
- [12] Le Menn, M.; Morvan, S.; "Velocity Calibration of Doppler Current Profiler Transducers". J. Mar. Sci. Eng. 2020, 8, 847. <https://doi.org/10.3390/jmse8110847>
- [13] Jourdain de Thieulloy, M.; Dorward, M.; Old, C.; Gabl, R.; Davey, T.; Ingram, D.M.; Sellar, B.G. "Single-Beam Acoustic Doppler Profiler and Co-Located Acoustic Doppler Velocimeter Flow Velocity Data", Data 2020, 5, 61. <https://doi.org/10.3390/data5030061>
- [14] Song, D.; Chen, Z.; Fu, J.; Wang, X.; Jiang, W.; Wu, J., "Novel Underwater Glider-Based Absolute Oceanic Current Observation Solutions", IEEE Sensors Journal, 21 (6), 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3048136.
- [15] Bae, H.S.; Kim, W.-K.; Son, S.-U.; Kim, W.-S.; Park, J.-S. An Estimation of the Backscattering Strength of Artificial Bubbles Using an Acoustic Doppler Current Profiler". Sensors 2022, 22, 1812. <https://doi.org/10.3390/s22051812>
- [16] Park, H.; Jung, S., "Design and Automated Optimization of an Internal Turret Mooring System in the Frequency and Time Domain", J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9, 581. doi: 10.3390/jmse9060581
- [17] Baker, R.C. Flow Measurement Handbook—Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications; Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2000; p. 524
- [18] Ticina, V.; Katavic, I.; Grubisic, L. Marine Aquaculture Impacts on Marine Biota in Oligotrophic Environments of the Mediterranean Sea – A Review *Frontiers in Marine Science*, **2020**, 7, 1–11
- [19] Erol, B. Evaluation of High-Precision Sensors in Structural Monitoring. Sensors 2010, 10, 10803-10827. <https://doi.org/10.3390/s101210803>
- [20] Ahmed Zaib, M.; Waqar, A.; Abbas, S.; Badshah, S.; Ahmed, S.; Amjad, M.; Rahimian Kolor, SS; Eldessouki, M. Efecto del diámetro de la pala en el rendimiento de la turbina de corriente oceánica de eje horizontal. Energías 2022 , 15 , 5323. <https://doi.org/10.3390/es15155323>
- [21] Mohd Badrul Salleh; Noorfazreena M; Kamaruddin, Zulfaa; Mohamed-Kassim; Savonius hydrokinetic turbines for a sustainable river-based energy extraction: A review of the technology and potential applications in Malaysia <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100554>.

- [22] Fu, S.; Johnstone, C. "Numerical Performance Model for Tensioned Mooring Tidal Turbine Operating in Combined Wave-Current Sea States", *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1309. <https://doi.org/10.3390/jmse9111309>
- [23] Johnstone, C.; Pratt, D.; Clarke, J.; Grant, A. A techno-economic analysis of tidal energy technology. *Renew. Energy* 2013, 49, 101–106.
- [24] Wullenweber, N.; Hole, L.R.; Ghaffari, P.; Graves, I.; Tholo, H.; Camus, L. SailBuoy Ocean Currents: Low-Cost Upper-Layer Ocean Current Measurements. *Sensors* 2022, 22, 5553. <https://doi.org/10.3390/s22155553>
- [25] Johanning, L.; Smith, G.H. Mooring design approach for Wave Energy Converter. *J. Eng. Marit. Environ.* 2006, 220, 159–174.
- [26] Pantelakis, D., Doulgeris, C., Hatzigiannakis, E., Arampatzis, G. (2022). Evaluation of discharge measurements methods in a natural river of low or middle flow using an electromagnetic flow meter. *River Research and Applications*, 38(6), 1003– 1013. <https://doi.org/10.1002/rra.3966>
- [27] Rodríguez García, D.; Montiel-Nelson, J.-A.; Bautista, T.; Sosa, J. Application of NSGA-II to Obtain the Charging Current-Time Tradeoff Curve in Battery Based Underwater Wireless Sensor Nodes. *Sensors* 2021, 21, 5324. <https://doi.org/10.3390/s21165324>
- [28] Chen, Y.-H.; Yang, R.-Y. "Study on Array Floating Platform for Wind Energy and Marine Space Optimization". *Sustainability* 2021, 13, 14014. <https://doi.org/10.3390/su132414014>
- [29] Ian R. Young, *Regular, Irregular Waves and the Wave Spectrum*", *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, John Wiley and Sons, Ltd. 2017 ISBN: 978-1-118-47635-2
- [30] M. Miche, "Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante..*Annales de Ponts et Chaussées*, 1944.
- [31] G. Ducrozet, F. Bonnefoy, Y. Perignon, "Applicability and limitations of highly non-linear potential flow solvers in the context of water waves, *Ocean Engineering*, 142, 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.003.
- [32] Pallmall, A. O. (2021). El cambio climático, una amenaza global. *El cambio climático, una amenaza global*, 1-650.
- [33] J. Pedlosky, "*Ocean Circulation Theory*". Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1996, ISBN: 978-3-642-08224-5

- [34] G. Santana Sosa, J. Santana Abril, J. Sosa, J.-A. Montiel-Nelson, T. Bautista, "Design of a Practical Underwater Sensor Network for Offshore Fish Farm Cages", *Sensors* 2020, 20, 4459. doi: 10.3390/s20164459
- [35] Rodríguez García, D.; Montiel-Nelson, J.-A.; Bautista, T.; Sosa, J. Application of NSGA-II to Obtain the Charging Current-Time Tradeoff Curve in Battery Based Underwater Wireless Sensor Nodes. *Sensors* 2021, 21, 5324. <https://doi.org/10.3390/s21165324>
- [36] Michelsen, F. A.; Klebert, P.; Broch, O. J.; Alver, M. O. Impacts of fish farm structures with biomass on water currents: A case study from Frøya", *Journal of Sea Research*, 154, **2019**, <https://doi.org/10.1016/j.seares.2019.101806>
- [37] X. Zhang, R. Simons, J. Zheng, C. Zhang, "A review of the state of research on wave-current interaction in nearshore areas", *Ocean Engineering*, 243, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110202.
- [38] M. Lewis, S.P. Neill, P. Robins, M.R. Hashemi, S. Ward, "Characteristics of the velocity profile at tidal-stream energy sites", *Renewable Energy*, 114 (A), 2017, doi:10.1016/j.renene.2017.03.096.
- [39] Scholkmann, F.; Boss, J.; Wolf, M. An Efficient Algorithm for Automatic Peak Detection in Noisy Periodic and Quasi-Periodic Signals. *Algorithms* 2012, 5, 588-603. doi: 10.3390/a5040588
- [40] Puertos del Estado, Spain, "Mareografo de Las Palmas 2", Available online: <https://portus.puertos.es/PortusData/rtChart?station=3450¶ms=SeaLevel&dirParams> (Accesed on 23 May 2022).
- [41] "Aquadopp 300 m: Highly Versatile Single-Point Current Meter", Technical specification Guide, Nortek, 2022, <https://www.nortekgroup.com/es/products/aquadopp-300m/pdf> (Accesed on 6 Jul 2022)
- [42] "Vector 300 m: High Accuracy and Single-Point Current Meter", Technical specification Guide, Nortek, 2022, <https://www.nortekgroup.com/es/products/vector-300-m/pdf> (Accesed on 6 Jul 2022)
- [43] RCM Blue", Technical specification Guide, Aanderaa, 2020, https://www.aanderaa.com/media/pdfs/d4060_rcm_blue.pdf
- [44] "SS-B1 Monitoring: Universal Current Meter", Technical specification Guide, HyQuest Solutions, 2022,

- https://cdn.hyquestsolutions.eu/fileadmin/Water_Flow/OSS-B1/Flyer/CurrentMeter_OSS-B1_en.pdf
- [45] "TCM-1 Current Meter", Universal User Guide, Lowell Instruments LLC, 2022, <https://lowellinstruments.com/products/tcm-1-tilt-current-meter/> (Accesed on 20 May 2022)
- [46] Lu, H.-Y.; Cheng, C.-Y.; Cheng, S.-C.; Cheng, Y.-H.; Lo, W.-C.; Jiang, W.-L.; Nan, F.-H.; Chang, S.-H.; Ubina, N.A. .^A Low-Cost AI Buoy System for Monitoring Water Quality at Offshore Aquaculture Cages"Sensors **2022**, 22, 4078. doi: 10.3390/s22114078
- [47] Beddows, P.A.; Mallon, E.K. Çave Pearl Data Logger: A Flexible Arduino-Based Logging Platform for Long-Term Monitoring in Harsh Environments"Sensors **2018**, 18, 530. <https://doi.org/10.3390/s18020530>
- [48] Marchant, R. Stevens, T.; Choukroun, T.; Coombes, G.; Santarossa, M.; Whinney, J.; Ridd, P. .^A Buoyant Tethered Sphere for Marine Current Estimation", IEEE J. of Oce. Eng., 39 (1), **2014**, doi: 10.1109/JOE.2012.2236151.