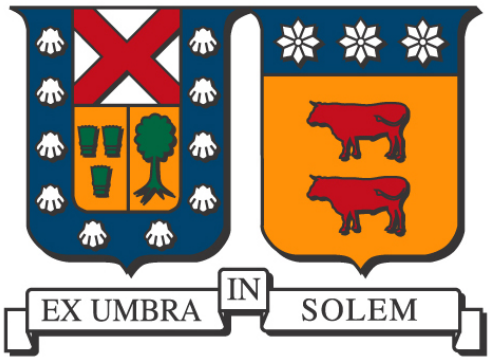
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



CONSTRUCCIÓN Y USO DE INSTRUMENTOS PARA MEDICIONES COSTERAS

SEBASTIÁN IGNACIO GAJARDO SANHUEZA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Profesora Guía: Megan Williams

Mayo 2022

Dedico esta memoria a mis padres Blanca, Ramón
y a mis Hermanos Daniel y Mauricio,
por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

En primer lugar estoy muy agradecido por haber conocido a la profesora Megan Williams y tener el honor de ser guiado por ella en el proceso de titulación. Una excelente profesora, cuya enorme pasión por el conocimiento, logra despertar el interés y deseo de aprender. Si bien la tarea encomendada fue compleja de abarcar, esta nunca dejo de ser divertida e interesante, la cual me permitió ver las cosas desde un nuevo punto de vista. Muchas gracias por todo el apoyo, tiempo, dedicación y paciencia que tuvo en cada una de las etapas de desarrollo.

También quiero agradecer especialmente al Grupo de Investigación Costera USM, donde tuve la oportunidad de conocer personas increíbles, que me apoyaron con sus ideas, diversos puntos de vista y comentarios en el desarrollo de mi investigación. Además de convertir las campañas de terreno en una experiencia inolvidable, llenas de diversión, donde fue muy enriquecedor trabajar en conjunto y poder compartir la emoción de los resultados, su compañerismo significó mucho para mí.

Agradezco de todo corazón a mis padres Blanca y Ramón, ya que sin su apoyo y amor incondicional no podría estar en el lugar donde estoy ahora. Gracias por creer en mi y darme la oportunidad de estudiar lo que más me apasiona. Agradezco a mis hermanos Daniel y Mauricio, por su constante preocupación, ánimo y motivación que me entregaron a lo largo del toda el proceso. También le agradezco a Romina, por acompañarme en este proceso, siendo mi apoyo emocional cada día.

A mis amigos, que sin duda la extensión de este apartado no sería suficiente para nombrarlos a todos. Agradezco mucho haberlos conocido ya sea durante el periodo universitario, como a lo largo de la vida. Por haber hecho que este proceso haya sido una de las experiencias más valiosas de mi vida, llena de anécdotas divertidas, que sin duda volveremos a recordar cada vez que nos reunamos.

Finalmente agradezco a la Universidad Técnica Federico Santa María, por ser mi casa de estudios, el lugar que me formó tanto como profesional y como persona, siendo el contenedor de miles de experiencias que viví en sus salas de clases, patios y pasillos. Gracias a los excelentes profesores que tuve a lo largo de mi formación y en especial aquellos que lograron dejar una enseñanza más allá del conocimiento técnico.

Resumen

En el presente trabajo de título se describe la adaptación y construcción de dos instrumentos de bajo costo para mediciones costeras, un OpenCTD y un Open Wave Height Logger (OWHL). El OpenCTD es un instrumento que sirve para recolectar datos de Conductividad, Temperatura y Presión en el agua. El OWHL es un instrumento orientado a medir los cambios de nivel del agua por medio de un sensor de presión, pudiendo aplicarse para determinar los cambios en los niveles de marea. Ambos instrumentos construidos funcionan de manera autónoma por medio de Arduino. La validación de la instrumentación fue desarrollada por medio pruebas en laboratorio y dos campañas de terreno en la desembocadura del Río Aconcagua y el Río Maipo, en la Región de Valparaíso, Chile.

Abstract

The present work describes the adaptation and construction of two low-cost instruments for coastal measurements, an OpenCTD and Open Wave Height Logger (OWHL). The OpenCTD is an instrument used to collect water data of conductivity, temperature and pressure. The OWHL is an instrument oriented to measure changes in water level using a pressure sensor, being able to determine changes in tide levels. Both instruments work autonomously using Arduino. The validation of the instrumentation was developed through laboratory tests and two field campaigns at the mouth of the Aconcagua River and Maipo River, in the Region of Valparaíso, Chile.

Índice general

Resumen **1**

Índice de figuras **7**

Índice de tablas **11**

1. Introducción **12**

1.1. ¿Qué es el ambiente costero? 14

1.2. Estuarios 15

1.2.1. Estratificación en estuarios 16

1.3. Mediciones in situ 17

1.3.1. Medición de la marea 17

1.3.2. Mezcla y circulación 17

1.4. Trabajando en el ambiente costero 18

1.4.1. La columna de agua 20

1.5. Objetivos 23

1.5.1. Objetivo General 23

1.5.2. Objetivos Específicos 23

2. Estado del Arte **24**

2.1. Implementación de Arduino para medición oceanográfica 24
2.2. Sensores de bajo costo 26
2.2.1. Sensores de presión 26
2.2.1.1. MS5803-14BA 26
2.2.1.2. MS5837-30BA 27
2.2.2. Sensores digitales de temperatura 28
2.2.2.1. DS18B20 28
2.2.2.2. TSYS01 28
2.2.3. Sensores de Conductividad 29
2.2.3.1. Sensor de conductividad con sonda Atlas Scientific 29
2.3. Materiales aplicables para contenedor 30
2.4. Proyectos de bajo costo existente para mediciones oceanográficas 31
2.4.1. OpenCTD 31
2.4.2. Open Wave Height Logger (OWHL) 32
2.4.3. Low Cost CTD 33
2.4.4. Sonda Multiparamétrica 34

3. Metodología **35**

3.1. Implementación con Arduino 35
3.1.1. Placa Microcontroladora 35
3.1.2. Elección de los Sensores 36
3.2. Lógica de funcionamiento 37
3.3. Requisitos de diseño 38
3.3.1. Requerimientos de uso 39
3.3.2. Requerimientos funcionales 39
3.3.3. Requerimientos estructurales 39

3.3.4. Requerimientos Técnico-Productivos 40
3.3.5. Contenedor 40
3.4. Armado del circuito electrónico 40
3.4.1. OpenCTD 40
3.4.2. Open Wave Height Logger 41
3.5. Elección de baterías 42
3.5.1. Voltajes de funcionamiento 42
3.5.2. Consumo de los instrumentos 43
3.5.3. Tiempo de funcionamiento 45
3.6. Construcción de instrumento 46
3.6.1. Elección de adhesivos 46
3.6.2. Adaptación de piezas 3D 48
3.6.2.1. Modelación de piezas en Software 48
3.6.3. Pruebas de Hermeticidad 49
3.6.4. Ensamblaje 50
3.7. Validación de instrumentación 50
3.7.1. Prueba de laboratorio 50
3.7.2. Prueba de comparación con instrumento comercial 51
3.7.2.1. Levelogger 5 LTC 51
3.7.2.2. HOBO U20L 52
3.7.2.3. YSI: 600LS Water Level Sonde 53
3.7.2.4. RBRconcerto³ 53

4. Validación de instrumentación **55**

4.1. Calibración y ensayo en laboratorio 55
4.1.1. Sensor de presión 55

4.1.2. Sensores de temperatura 58
4.1.3. Sensor de Conductividad 61
4.2. Campaña de Terreno: Desembocadura del Río Aconcagua 64
4.2.1. Aprendizajes 66
4.3. Campaña de Terreno: Desembocadura del Río Maipo 67
4.3.1. Sensores de Presión HOBO y OWHL en las estaciones P y M . . . 68
4.3.2. Resultados OpenCTD en el punto P 71
4.3.3. Resultados comparando el OpenCTD-YSI entre los Puntos P y A . . 73

5. Resultados **81**
5.1. Análisis de Salinidad y Densidad en la campaña del Río Maipo 81
5.2. Sensores de Temperatura 84
5.3. Sensores de Conductividad 85
5.4. Análisis de costos 86

6. Discusión **88**

7. Conclusión **90**

A. Anexos **94**
A.1. Recomendaciones 94
A.1.1. Cierre hermético del contenedor 94
A.1.2. Cuidados con la humedad 95
A.1.3. Recomendaciones para calibración de sensores 96
A.1.3.1. Sensor de Temperatura 96
A.1.3.2. Sensor de Conductividad 96
A.1.4. Selección de MicroSD 97

A.2. Mantenimiento 98
A.2.1. Sonda de conductividad 98
A.2.2. Sensor de temperatura 98
A.2.3. Sensor de presión 99
A.2.4. Adhesivos en uniones 99
A.3. Costos 100
A.3.1. OpenCTD 100
A.3.2. Open Wave Height Logger 101
A.4. Fotos de instrumentos construidos 104
A.4.1. OpenCTD 104
A.4.2. Open Wave Height Logger 106

Referencias **108**

Índice de figuras

1.1. Descripción de las partes de un estuario según la definición de Dionne (1963) 15

1.2. Distribución salina a lo largo de un estuario a) De cuña salina, b) Parcialmente mezclado y c) Bien mezclado 16

1.3. Variación de parámetros con la profundidad dentro de la columna de agua en el océano 20

2.1. Ejemplos de placas de desarrollo basadas en Arduino 25

2.2. Placa de desarrollo Arduino UNO 26

2.3. Sensor MS5803 27

2.4. Sensor MS5837 27

2.5. Sensor DS18B20 con sistema para inmersión en líquidos. 28

2.6. Sensor TSYS01 con sistema de contencion y proteccion para la inmersión en líquidos ofrecido por la empresa BlueRobotics, ... 29

2.7. Circuito de conductividad y sonda Atlas Scientific para medir conductividad en líquidos 30

2.8. OpenCTD desarrollado por el grupo de Oceanography For Everyone 32

2.9. OWHL desarrollado por Luke Miller 32

2.10. Low Cost CTD desarrollado por Jonas Auråen 33

2.11. Esquema de la Sonda Multiparamétrica desarrollada por LANRESC 34

3.1. Adalogger Feather M0 de la marca Adafruit 36
3.2. Placas de desarrollo con sus componentes soldados 36
3.3. Esquema de elementos necesarios para un Datalogger 38
3.4. Esquema de conexiones OpenCTD en protoboard 41
3.5. Placas PCB OWHL, a) Placa CPU, b) Placa Power, c) Placa MS5803 . . . 42
3.6. Analog Discovery 2 43
3.7. Consumo de corriente del OpenCTD en 1 segundo 44
3.8. Consumo de corriente del OpenCTD en 1 segundo 45
3.9. Consumo de corriente del OWHL en 1 segundo 45
3.10. Adhesivo PVC Oatey 47
3.11. Adhesivo epoxi Gorilla 47
3.12. Adhesivo epóxico Loctite E20HP y Resina epóxica de baja viscosidad . . . 48
3.13. Tapa de OpenCTD modificada en diámetro y perforación para el sensor TSYS01 en SolidWorks 49
3.14. Prueba de hermeticidad en contenedor prototipo de OpenCTD 50
3.15. Levelogger LTC de la marca Solinst 51
3.16. Medidor de Presión HOBO de la marca Onset 52
3.17. YSI 600LS 53
3.18. RBRconcerto³ 54

4.1. Estanque de pruebas 56
4.2. Respuesta del sensor a una profundidad de $5, 7, 10, 15[\mathrm{cm}]$ 57
4.3. Error del sensor de presión para distintas temperaturas, el tipo de línea representa el error en agua a distinta temperatura. 58
4.4. Gráfico con sensores sin calibrados 60
4.5. Gráfico con sensores calibrados 61

4.6. Gráfico con los instrumentos Solinst, RBR y OpenCTD para valores estandarizados 63

4.7. Comparación de temperatura OpenCTD sin calibrar y YSI CTD del año 2021 64

4.8. Gráfico con sensores sin calibrar 65

4.9. Gráfico con sensores con calibración 66

4.10. Puntos de Medición 67

4.11. Sensores de Presión OWHL 3 y HOBO en el punto M 68

4.12. Sensores de Presión OWHL 2 y HOBO en el punto P, mediciones realizadas el año 2021 69

4.13. Sensores de Presion OWHL 3 y HOBO en el punto M, mediciones realizadas el año 2021 69

4.14. Correlación entre OWHL y HOBO en Punto P 70

4.15. Comparación de series de tiempo entre el OpenCTD, incluyendo mediciones de presión OWHL y HOBO en Punto P 72

4.16. Instalación de los YSI en superficie y profundidad en la cuerda guía para la estación A 73

4.17. Instalación del YSI en superficie 74

4.18. Instalación del YSI en profundidad junto al ancla 74

4.19. Esquema de profundidad de funcionamiento de los instrumentos en los puntos A y P 75

4.20. Comparación de series de tiempo de profundidad entre el OpenCTD y los YSI CTD 75

4.21. Comparación de series de tiempo de conductividad entre el OpenCTD y los YSI CTD 76

4.22. Comparación de series de tiempo de temperatura entre el OpenCTD del punto P y el YSI en superficie en el Punto A 77

4.23. Temperaturas sin aplicar coeficientes de calibración 78

4.24. Temperaturas con coeficientes de calibración de laboratorio 79

4.25. Temperaturas con coeficientes de calibración de laboratorio 80

5.1. Comparación de series de tiempo de salinidad entre el OpenCTD del punto P y los YSI en superficie y profundidad en el Punto A 82

5.2. Comparación de perfiles del CastAway en punto P, con valores de salinidad obtenidos los YSI en el punto A y el OpenCTD en punto P para el día 07/09/2021, en las horas 12:11:25-12:13:35-12:50:59-12:52:29 en UTC . . 83

5.3. Comparación de series de tiempo de densidad entre el OpenCTD del punto P y el YSI en superficie y profundidad en el punto A 84

5.4. Regresiones lineales ensayo 2 86

A.1. Tapon de prueba con goma expansiva 94

A.2. Bolsas de Gel de Silica 95

A.3. Comparación de consumo de corriente para un OWHL con una tarjeta MicroSD genérica y una tarjeta MicroSD marca Maxell 97

A.4. Limpiador para sondas de conductividad Atlas Scientific 98

A.5. OpenCTD 104

A.6. Sensores del OpenCTD 105

A.7. Partes e interior del OpenCTD 105

A.8. OWHL 106

A.9. Partes del OWHL 106

A.10. Sensor de presión OWHL 107

A.11. Circuito interno OWHL 107

Índice de tablas

2.1. Materiales aplicables 31

3.1. Especificaciones técnicas generales del Levelogger LTC 51

3.2. Especificaciones técnicas de los sensores del instrumento HOBO U20L . . 52

3.3. Especificaciones técnicas instrumento YSI 600LS 53

3.4. Especificaciones técnicas de instrumento RBRconcerto³ 54

4.1. Valores α y β para cada sensor 60

4.2. Valores α y β para cada sensor 61

4.3. Comparacion de isntrumentos Solinst, RBR y OpenCTD, respecto de los estandares de conductividad 63

4.4. Coordenadas en grados decimales, los nombres de las estaciones señalan puntos característicos observados en terreno. donde A:Ancla, P:Palos y M:Medio 68

5.1. Resumen de coeficientes de calibración de los ensayos realizados, junto con el RMSE y R^2 con respecto a cada ensayo 85

5.2. Resumen de los RMSE y R^2 obtenidos en cada ensayo 86

Capítulo 1

Introducción

Chile cuenta con un extenso territorio oceánico, abarcando una longitud de costa en el territorio continental e islas adyacentes que suma alrededor de 83.850 km, sin embargo, existe una baja capacidad de observación y monitoreo continuo de su océano (Winckler et al., 2020). Actualmente el SHOA opera solamente con 45 mareógrafos de manera continua (Winckler et al., 2020) y menos de 10 boyas oceanográficas costeras (Farías et al., 2019).

Al no tener una base datos robusta y un monitoreo continuo de la costa chilena, se están ignorando importantes fenómenos físicos como las zonas de oxígeno mínimo, que afectan a la biología de las especies que las habitan (Apablaza and Palma, 2006), los cambios en el nivel del mar, la estratificación salina y de temperatura presente en estuarios que entrega parámetros importantes sobre la circulación, mezcla y transporte de sedimentos entre el río y el océano.

Uno de los problemas que dificulta la implementación de sistemas de monitoreo de parámetros costeros de manera extensa, es el costo de los equipos. Esto se debe a que dicha instrumentación cuenta con sensores de alta precisión y un diseño que les permite resistir el entorno marino de manera óptima. Sin embargo, para el estudio de fenómenos costeros, no siempre es necesario contar con un equipo que soporte condiciones extremas, ya que muchos análisis son realizados en aguas someras, por lo que los equipos comerciales suelen estar sobrecalificados para esta tarea. Otra problemática asociada es el vandalismo. Al estar un equipo de alto costo situado a poca profundidad, este puede ser extraído con facilidad por personas ajenas a la investigación, generando

la pérdida de la información acumulada y del costo invertido en el equipo.

Como solución a las problemáticas presentadas, se propone la construcción y validación de equipos de medición costera utilizando materiales accesibles, que se comporten de manera adecuada en el entorno marino y en conjunto con sensores de bajo costo controlados por medio de un microcontrolador reprogramable contenido en una placa de desarrollo. La programación es realizada por medio de la plataforma Arduino, permitiendo establecer una conexión sencilla entre los sensores y el microcontrolador de manera adaptable según las necesidades del usuario.

La presente memoria se incorpora dentro del proyecto FONDECYT “Improving understanding of sediment dynamics in strong salinity stratification using innovative field methods” que como parte de la investigación, involucra mejorar el entendimiento y la práctica de sensores de bajo costo aplicados a estuarios con fuerte estratificación salina en Chile. Específicamente se construirá un OpenCTD (Thaler et al., 2020), instrumento para medir conductividad, temperatura y presión, por medio de sensores controlados por Arduino y un instrumento Open Wave Height Logger (Lyman et al., 2020) que registra las variaciones de altura del oleaje. Sin embargo, uno de los desafíos es realizar las adaptaciones necesarias para recrear los proyectos con los materiales accesibles en Chile, debido a la diferencia de productos ofrecidos en Estados Unidos donde se originan los proyectos. Además, se implementará un sensor de temperatura de respuesta rápida, que no está incorporado en el proyecto OpenCTD original, para evaluar su desempeño.

La validación de funcionamiento de los equipos será realizada en primer lugar a través de pruebas en laboratorio, calibrando los sensores por medio de soluciones estandarizadas y verificando la hermeticidad del contenedor de componentes electrónicos. En segundo lugar, se realizarán comparaciones con equipos comerciales donde se dispone de un RBRconcerto^3, que es un CTD comercial de alta precisión de la marca RBR, un YSI 600ls que tambien es un CTD de la marca YSI, un sensor de presión HOBO U20L de la marca Onset y un CTD CastAway de la marca Sontek.

Para finalizar la validación se realizarán campañas de terreno con el fin de estudiar la estratificación y ciclos de marea en los estuarios del Río Maipo y Río Aconcagua, ubicado en la Región de Valparaíso, Chile.

1.1. ¿Qué es el ambiente costero?

El ambiente costero es la zona donde ocurren las interacciones de las masas de tierra y agua, generando diferentes ambientes como humedales, estuarios, bahías, aguas someras, manglares y arrecifes costeros. Estos ambientes están propensos a efectos provocados por el cambio climático, como erosiones costeras, aumento del nivel del mar y cambios globales en los patrones de circulación oceánica (Harley et al., 2006), por mencionar algunos.

La presente memoria esta enfocada en el desarrollo de instrumentación para medición de aguas someras para los ambientes estuarinos.

Un motivo para estudiar los sistemas estuarinos, se debe a que casi el 60 % de las grandes ciudades a nivel mundial se encuentran cercanas a un estuario (Miranda et al., 2017), donde las actividades industriales derivan parte de sus desperdicios, degradando la calidad del agua. En 1972 Schubel y Pritchard describieron las principales fuentes que generan los distintos tipos de contaminación en estuarios (Schubel and Pritchard, 1972) como las siguientes:

- Organismos patógenos, materia orgánica y nutrientes → Desperdicios municipales.
- Pesticidas y herbicidas → Actividades agrícolas.
- Metales pesados, aceite, manchas, sustancias, químicos tóxicos → Proveniente de la industria, pesca, atmósfera, carreteras y caminos.
- Calor → Plantas generadoras de energía.
- Sedimentos → agricultura y construcción en general.

En los estuarios ocurren importantes fenómenos de mezcla y circulación, por la interacción río-océano, donde los contaminantes pueden quedar recirculando por mucho tiempo en los ecosistemas dañando la flora y fauna de los sectores (Miranda et al., 2017).

Por otra parte, los estuarios son utilizados como laboratorios naturales para comparar modelos teóricos que se enfocan en determinar y predecir la dinámica de los procesos de mezclas, circulación y transporte de sedimentos.

1.2. Estuarios

En el ámbito de ingeniería la palabra estuario es usada para indicar una región costera interior donde las aguas fluviales se encuentran con el agua salada transportada por las corrientes mareales, extendiéndose río arriba, tan lejos como la influencia de la marea alcance (Miranda et al., 2017), por lo que la extensión del estuario puede llegar varios kilómetros río arriba según la fuerza de la marea. En ellos ocurren diversos fenómenos físicos de transporte de sedimento, mezcla y circulación de aguas.

En los estuarios se pueden identificar generalmente 3 zonas, representadas en la Figura 1.1:

- Zona interior o marina: Con conexión con el mar abierto, donde ingresan sedimentos provenientes del mar y una influencia predominante de agua salada.
- Zona media: Sujeta a mezclas intensas de agua salada y agua dulce descargada por el río, existe transporte de sedimentos de origen fluvial y está propensa a cambios estacionales.
- Zona exterior o fluvial: Caracterizada por contener predominantemente agua dulce pero influenciada por las oscilaciones de la marea.

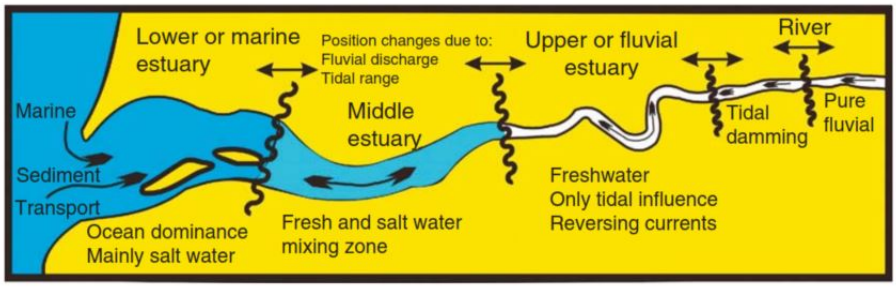


Figura 1.1: Descripción de las partes de un estuario según la definición de Dionne (1963)

Fuente: Imagen obtenida de Perillo (1995)

1.2.1. Estratificación en estuarios

La estratificación es una de las características más importante de los estuarios, ya que afecta la distribución vertical de químicos y biota de los estuarios (Winckler et al., 2020). Está fuertemente relacionada con los cambios de la marea, ya que al subir el nivel del mar, el agua salada ingresa al interior del estuario por el fondo del cauce, oponiéndose a la descarga de agua dulce del río, que se mueve por la capa superficial (Figura 1.2a). Lo anterior genera una estratificación debido a la diferencia de densidad entre el agua dulce (fluvial) y salada (marina). Este fenómeno generalmente inhibe las mezcla de las aguas (Geyer, 1993), lo que puede llegar a tener un gran impacto en la ecología marina, ya que no solo queda afectada la densidad de las aguas, sino que también la temperatura, turbidez, turbulencia y dirección de flujo. Además la capa subyacente del agua puede generar condiciones de hipoxia si el tiempo de residencia de las aguas es muy largo, por la lenta renovación de las aguas. En la Figura 1.2 se presentan los 3 grados de estratificación vertical de salinidad que se puede encontrar en estuarios.

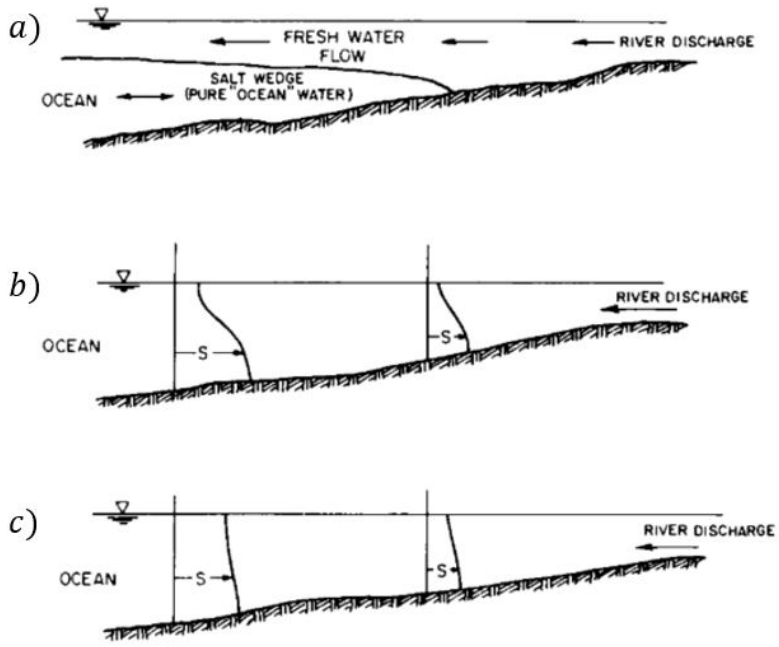


Figura 1.2: Distribución salina a lo largo de un estuario a) De cuña salina, b) Parcialmente mezclado y c) Bien mezclado

Fuente: Imagen modificada de Fischer et al. (1979)

1.3. Mediciones in situ

Para entender el comportamiento físico de los estuarios, se deben contrastar los modelos y ecuaciones teóricas con datos observados en el lugar de estudio (Mediciones in situ), con el fin de comparar la efectividad de los modelos y encontrar parámetros de calibración para las ecuaciones. En los estudios estuarinos es necesario conocer parámetros como: la marea, mezcla y circulación de las aguas provenientes del río-océano y la cantidad de sedimentos presentes en el agua. Para cada parámetro existen diferentes técnicas de medición, que se explicaran a continuación.

1.3.1. Medición de la marea

Para medir los cambios en el nivel del agua producidos por la marea, existen principalmente 4 tecnologías como son descritas por Souza et al. (2011):

- Sistemas ”Still Well”: Consiste en un sistema con un pozo que para inmovilizar el agua y remover el efecto de la gravedad dejando solo las olas provenientes de la marea y oleaje, luego por medio de un flotador y un sistema de poleas con un lápiz acoplado en superficie, se va registrando el cambio de la marea.
- Sistemas de presión: En este caso se mide la presión con un elemento sumergido y dicho valor se convierte en altura, teniendo conocimiento de la densidad del agua y la aceleración de gravedad local.
- Sistemas acústicos: Por medio de un pulso sonoro emitido en profundidad, se mide la distancia a la superficie del agua.
- Sensores de radar: Utilizan las frecuencias de radar con un funcionamiento similar al de los sistemas acústicos.

1.3.2. Mezcla y circulación

La mezcla de las aguas, se puede conocer por medio de la temperatura y salinidad. Generalmente se miden utilizando un instrumentos CTD (Souza et al., 2011), que registran la conductividad del agua, temperatura y presión, por medio de sensores, luego aplicando fórmulas de conversión, se obtiene la salinidad y profundidad del agua.

Como se describe en Souza et al. (2011), la circulación del agua se puede medir utilizando un enfoque Lagrangiano por medio de un drifter, que consiste en un flotador libre, que sigue la ruta de las corrientes del agua y se va registrando su posición en intervalos de tiempo. Desde una perspectiva Euleriana, actualmente se utilizan instrumentos acústicos llamados ADCP (acoustic Doppler current profilers), que miden el cambio de frecuencia entre las ondas de sonido que envía el instrumento emisor y las ondas que recibe por el rebote con las partículas suspendidas del agua, ya que es proporcional la velocidad del fluido.

1.4. Trabajando en el ambiente costero

Al desarrollar instrumentación para mediciones costeras, se debe tener en consideración que las propiedades del agua salada, son distintas a las del agua dulce. A continuación se presenta un listado con las principales propiedades que se deben considerar según Moore et al. (2010):

- Propiedades químicas: Existe concentración de sal disuelta, en el océano la salinidad promedio esta entre 34 a $35[\mathrm{g/m^3}]$, es corrosiva y atenúa las señales de radio.
- Propiedades eléctricas: El agua marina es un buen conductor de la electricidad, por lo que pueden causar corto circuitos.
- Propiedades mecánicas: Posee densidad, gravedad especifica, presión hidrostática, flotabilidad, compresibilidad y viscosidad.
- Propiedades acústicas: Propagación de ondas sonoras.
- Propiedades ópticas: Absorción de la luz, turbidez, refracción.
- Propiedades térmicas: Capacidad térmica, conductividad térmica.

Por lo tanto, se debe tener criterio a la hora de seleccionar los materiales del contenedor, ya que los metales son propensos a la corrosión en los entornos oceánicos, además deben soportar las presión constante de la columna de agua según la profundidad donde se estén realizando las mediciones.

Otro aspecto que se debe tomar en consideración son los movimientos que realiza el sistema Río-Océano, tales como corrientes, mareas, oleaje, zona de rompiente y tsunamis (Moore et al., 2010), por lo tanto se debe considerar un sistema de anclaje suficiente soportar los distintos movimientos.

Finalmente, bajo el agua coexisten diversas especies que pueden interactuar con los instrumentos, por lo que una elección adecuada del sector emplazamiento de la instrumentación se vuelve un parámetro relevante en conjunto con el tiempo que permanecerá sumergida, ya que en periodos de medición extensos, los instrumentos se ven afectados por el Biofouling, donde microorganismos se adhieren a las superficies bajo el agua, pudiendo afectar negativamente el funcionamiento de los sensores de la instrumentación (Lyman et al., 2020).

1.4.1. La columna de agua

Existen propiedades del agua que varían con la profundidad, que son de especial importancia para el estudio de la física oceánica y estuarina, que a la vez deben ser considerados para que los instrumentos sean capaces de medir. En la Figura 1.3 se indica como varia la temperatura, penetración de luz, salinidad, densidad y presión en el océano en condiciones normales.

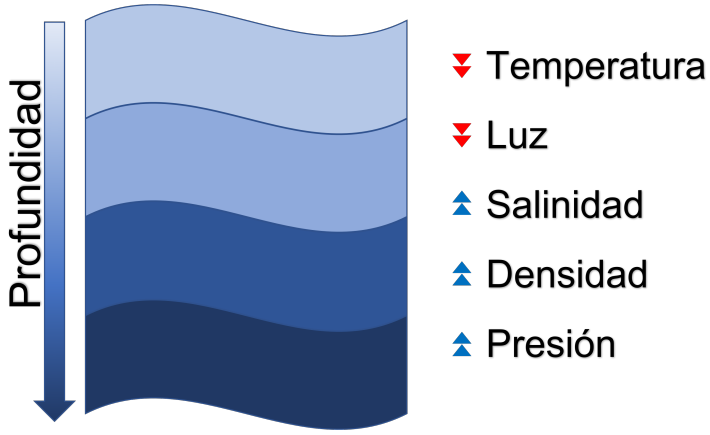


Figura 1.3: Variación de parámetros con la profundidad dentro de la columna de agua en el océano

Fuente: Elaboración propia

Una de las variables más importantes a considerar en el desarrollo de instrumentos sumergidos, es la presión que el agua ejerce sobre cualquier objeto sumergido (Ecuación hidrostática (1.1)) , ya que esta aumenta con la profundidad. Para tener una idea, se puede estimar que cada $10[\mathrm{m}]$ de profundidad en el océano, hay un aumento de $1[\mathrm{Atm}]$ en presión. Por lo que se debe asegurar la hermeticidad de los instrumentos y los materiales adecuados para resistir la presión.

$$P = P_{atm} + \rho g h \tag{1.1}$$

Donde:

P_{Atm} = Presión atmosférica
ρ = Densidad del fluido
g = Aceleración de gravedad
h = Profundidad a la que se encuentra el objeto

En condiciones estáticas la temperatura en la superficie tiende a ser más cálida que en aguas a mayor profundidad, ya que la luz solar es absorbida por la primera capa de agua. El aumento de temperatura superficial provoca una disminución de la densidad en la capa superficial, quedando atrapada y flotando sobre las capas más profundas (Moore et al., 2010). Sin embargo al incorporar la presencia de oleaje, aguas provenientes de ríos y efectos de vientos (recurrentes en los estuarios), las aguas superficiales pueden mezclarse con las profundas, haciendo que la temperatura sea una incógnita a lo largo de la columna de agua.

Otro parámetro que varía con la profundidad es la salinidad. Mientras mayor es la concentración de sal en el agua esta será más densa, por lo que esta se hundirá bajo las aguas de menor salinidad, sin embargo es un comportamiento que puede estar afectado por la altura de la columna de agua. En el caso de aguas poco profundas, pueden existir zonas de alta salinidad en la superficie debido al aumento de temperatura por acción del sol, lo que aumenta la tasa de evaporación y por ende la concentración de sal.

La densidad es un parámetro que depende de la temperatura, salinidad y presión. Generalmente el agua salada es más densa que el agua fresca, sin embargo por lo comentado anteriormente esta puede tener variaciones dependiendo de la variable que se sobreponga a las demás.

Otro efecto que varía a lo largo de la columna de agua es la penetración de luz, ya que esta disminuye con la profundidad en grandes masas de agua. Sin embargo en aguas poco profundas y claras es posible ver el fondo con facilidad, pero si las aguas presentan sedimentos en suspensión, estos limitan la penetración de la luz. Si bien, la luz, no es un parámetro que afecta directamente las mediciones de instrumentos del tipo CTD o sensores de presión, este puede dar indicios sobre la cantidad de sedimentos transportados por ríos que derivan de procesos de erosión naturales o contaminantes

externos provenientes de los centros urbanos, los cuales pueden influir en la densidad del agua, además de aumentar el grado de turbidez, pudiendo ser un indicador para el estudio de algún fenómeno físico de interés.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Construir instrumentos de medición de bajo costo y demostrar su funcionalidad en estuarios de la costa chilena.

1.5.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de la investigación están sobre la base de distintos hitos que se van desarrollando a lo largo del estudio

- Adaptar los materiales aplicados en los proyectos OpenCTD y Open Wave Height Logger a los disponibles en Chile.
- Analizar comparativamente la respuesta de sensores de medición de bajo costo frente a los de instrumentos comerciales.
- Definir métodos de calibración y mantenimiento para los instrumentos construidos.
- Medir un ciclo de marea en un estuario de la costa chilena, validando el funcionamiento de los equipos.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Implementación de Arduino para medición oceanográfica

Arduino es una plataforma de desarrollo que se basa en el uso de una placa electrónica de hardware libre, que por medio de un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra, es capaz de controlar tanto sensores como actuadores electrónicos (Artero, 2013).

El microcontrolador es capaz de controlar y establecer diferentes conexiones de sensores, lo que permite monitorear las variables ambientales con el fin de recolectar datos y estudiar el comportamiento de los diferentes fenómenos existentes en el entorno y llegar a predecir su comportamiento a futuro. Existen muchos instrumentos especialmente diseñados para este fin, desarrollados por distintas empresas, sin embargo la adquisición de estos instrumentos puede llegar a ser muy costosa, ya que generalmente estos son capaces de soportar condiciones de alta exigencia. En el caso de las investigaciones costeras de estuarios, en particular para aguas someras, la demanda de resistencia frente a presión no es demasiado exigente, por lo que un instrumento comercial suele superar ampliamente esta demanda, además al estar relativamente cercanos a la superficie, son propensos a ser dañados o extraídos de su posición por agentes externos.

Como solución para el problema presentado se pueden desarrollar instrumentos de bajo costo, aplicando materiales y sensores más económicos, que se ajusten a las variables ambientales que se quieran medir y permitir ampliar la cantidad de mediciones

existentes.

Actualmente en el mercado existen diversas placas basadas en Arduino, ofreciendo una amplia gama de precios y desarrolladores, algunos ejemplos de ellos se muestran en la Figura 2.1.

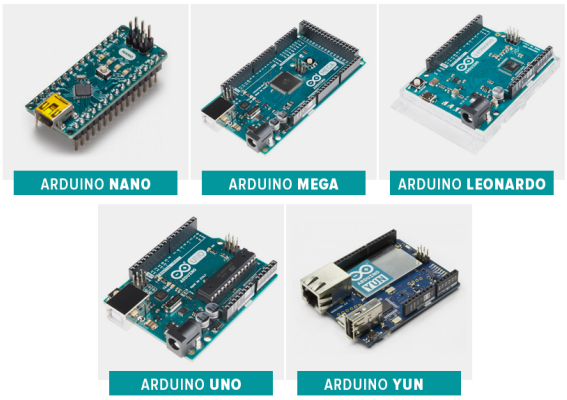


Figura 2.1: Ejemplos de placas de desarrollo basadas en Arduino

Fuente: Sitio web de Arduino Chile, https://arduino.cl

La estructura general de una placa Arduino se muestra en la Figura 2.2, sus componentes principales se describen a continuación:

1. Conector USB: Conector que permite la comunicación entre el Arduino y un computador, mediante USB u otro similar.
2. Alimentación: Conector de alimentación, para energizar el Arduino al funcionar de manera autónoma.
3. Entradas/Salidas digitales: Pines de entrada/salida que trabajan en valores binarios.
4. Entradas analógicas: La magnitud de la señal puede tomar cualquier valor dentro de un intervalo.
5. Pines de alimentación: Pines para alimentar los actuadores conectados al Arduino y también para alimentar por medio de una batería.
6. Microcontrolador: Dispositivo reprogramable de la placa, que ejecuta el programa previamente escrito.

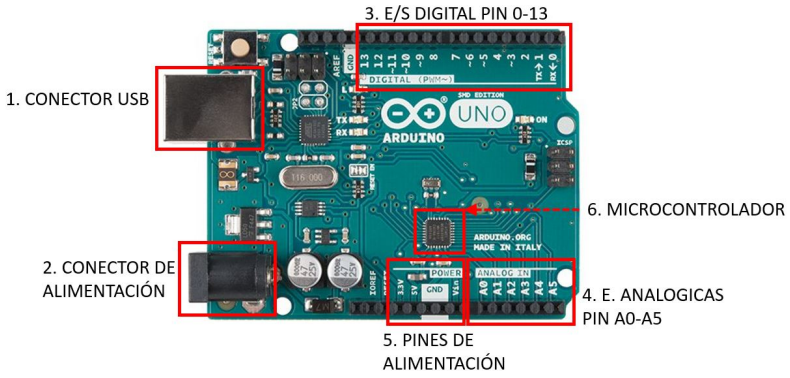


Figura 2.2: Placa de desarrollo Arduino UNO

Fuente: Esquema modificado a partir del sitio web de Arduino Chile, https://arduino.cl

Dependiendo del fabricante, las características de la placa de desarrollo podrán variar entre ellas, ya sea incorporando distintos microcontroladores, formas de alimentación, tamaño de la placa y conectividad. Sin embargo mantienen el mismo esquema general, lo que otorga la capacidad de elegir una placa de desarrollo adecuada para las características particulares del proyecto.

2.2. Sensores de bajo costo

2.2.1. Sensores de presión

Los sensores de presión están basados en un elemento piezorresistivo, que al deformarse es capaz de detectar el cambio de resistencia y medir la diferencia de voltaje cuando se aplica presión, en el caso de fluidos registra el peso de la columna de agua sobre él.

2.2.1.1. MS5803-14BA

El sensor MS5803 mostrado en la Figura 2.3 es un sensor de bajo costo que permite medir presión de líquidos hasta los $14[\mathrm{bar}]$ o $1{,}4[\mathrm{MPa}]$. Se debe tener en consideración que este sensor mide la presión absoluta del fluido alrededor de el, incluyendo el aire, por lo que es necesario contar con mediciones de presión atmosférica en el exterior, para

determinar la presión neta ejercida por el fluido. A modo de referencia, teniendo en cuenta la presión atmosférica, el sensor permite medir hasta una profundidad $130[\mathrm{m}]$ en agua salada aproximadamente.

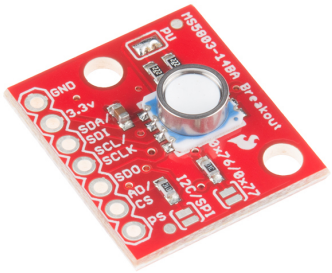


Figura 2.3: Sensor MS5803

Fuente: Imagen referencial de https://www.sparkfun.com

2.2.1.2. MS5837-30BA

El sensor MS5837 mostrado en la Figura 2.4 es un sensor de bajo costo que permite medir presión de líquidos hasta los $30[\mathrm{bar}]$ o $3[\mathrm{MPa}]$, a modo de referencia puede medir hasta una profundidad de $300[\mathrm{m}]$ aproximadamente bajo el agua. Sin embargo el aumento de capacidad de medición disminuye la resolución del instrumento a un máximo $0{,}2[\mathrm{mbar}]$.



Figura 2.4: Sensor MS5837

Fuente: Imagen referencial de https://www.mouser.cl

2.2.2. Sensores digitales de temperatura

Para medir temperatura con Arduino, generalmente se utilizan sensores de temperatura digitales, ya que son sencillos de acoplar a los proyectos tanto en mecanismo de funcionamiento como en hardware.

2.2.2.1. DS18B20

El sensor DS18B20 es un termómetro digital que permite medir temperaturas en el rango de -55 a $125[^{\circ}\mathrm{C}]$. Cada sensor tiene un código serial único, que permite conectar múltiples sensores en una sola línea de datos por medio del protocolo 1-wire. Se pueden encontrar en formatos sumergibles en fluidos, por lo que son ideales para realizar instrumentación subacuática.



Figura 2.5: Sensor DS18B20 con sistema para inmersión en líquidos.

Fuente: Imagen obtenida de Sari and KIRINDI (2019)

2.2.2.2. TSYS01

El sensor TSYS01 es una tecnología más avanzada para medir temperatura en comparación que el DS18B20, con mayor precisión. Puede medir un rango de temperaturas entre -40 a $125[^{\circ}\mathrm{C}]$. La empresa BlueRobotics, vende este sensor en

un formato para inmersión en líquidos, orientado a la utilización en ROVs sumergibles (Vehículos operados remotamente), sin embargo puede ser adaptado para implementar en instrumentación.

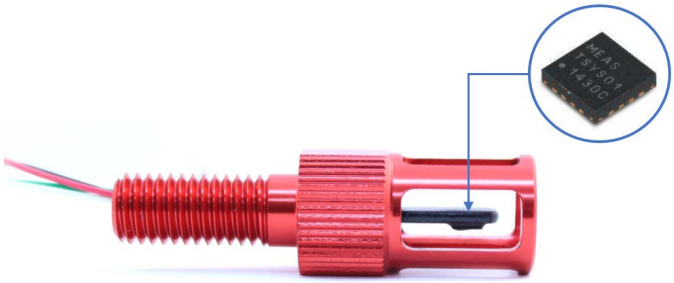


Figura 2.6: Sensor TSYS01 con sistema de contencion y proteccion para la inmersión en líquidos ofrecido por la empresa BlueRobotics,

Fuente: Imagen del sitio https://bluerobotics.com/,
modificada incluyendo la posición del sensor

2.2.3. Sensores de Conductividad

2.2.3.1. Sensor de conductividad con sonda Atlas Scientific

La empresa Atlas Scientific vende el circuito para medir conductividad junto con la sonda para inmersión en agua. El principio de funcionamiento es que al interior de la sonda existen 2 electrodos posicionados al lado opuesto de cada uno, luego un voltaje alterno es aplicado a los electrodos, causando que los cationes se muevan al electrodo cargado negativamente, mientras que los aniones se mueven al electrodo positivo. Mientras más libre de electrolitos esté el liquido, mayor será la conductividad eléctrica.

La sonda tiene un coeficiente K, que representa la distancia entre los electrodos de la sonda dividido por el área de los electrodos. Atlas Scientific dispone de 3 sondas con distinto coeficiente K, que abarcan diferentes rangos de conductividad:

- $K = 0{,}1 \rightarrow 0{,}07[\mu S] - 50000[\mu S]$ (Condiciones de baja conductividad)
- $K = 1{,}0 \rightarrow 5{,}00[\mu S] - 200000[\mu S]$ (Condiciones de conductividad media)
- $K = 10 \rightarrow 10[\mu S] - 1[S]$ (Condiciones de alta conductividad)

Para el caso de los estuarios, donde el agua se puede presentar tanto dulce como salada o una mezcla de ellas, la sonda que permite abarcar los rangos de conductividad para dichas condiciones, es la que posee el coeficiente K=1.0.

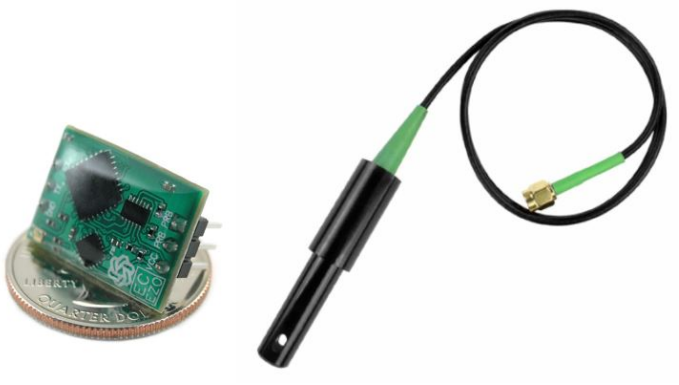


Figura 2.7: Circuito de conductividad y sonda Atlas Scientific para medir conductividad en líquidos

Fuente: Imágenes del sitio https://atlas-scientific.com

2.3. Materiales aplicables para contenedor

El circuito electrónico debe ser encapsulado en un contenedor hermético, que no permita filtraciones y pueda resistir los parámetros ambientales donde será empleado. Los materiales más comunes para aplicar en aguas salinas son metales y plásticos.

Para la selección del material se deben considerar:

- Resistencia del material
- Densidad
- Resistencia a la corrosión
- Costos de construcción
- Disponibilidad del material

En la Tabla 2.1 se presentan los materiales comúnmente utilizados para realizar contenedores.

Tabla 2.1: Materiales aplicables

Materiales		**Resistencia a la tracción**	**Módulo de elasticidad**	**Densidad**	**Resistencia a la corrosión**	**Costos en dólares EEUU**	
		MPa	GPa	Kg/m3		Por varilla	Por Kg
METALES	Acero al carbono	500	200	7860	Pobre	$20	$6
	Acero inoxidable	550	195	8000	Bueno a excelente	$50	$13
	Aluminio	310	70	2700	Bueno	$15	$12
	Titanio	1000	110	4430	Excelente	$500	$244
	Laton naval	430	100	8440	Bueno a excelente	$75	$19
	Bronce	450	115	8860	Bueno a excelente	$125	$30
PLÁSTICOS	PVC	46	1.9	1360	Excelente	$6	$10
	ABS	40	2.2	1050	Excelente	$17	$35
	Policarbonato	67	2.4	1200	Excelente	$26	$47
	Acetal	60	3.1	1420	Excelente	$15	$22
	Acrílico	80	3.3	1200	Excelente	$14	$25

Fuente: Tabla modificada de Moore et al. (2010) con valores referenciales

2.4. Proyectos de bajo costo existente para mediciones oceanográficas

2.4.1. OpenCTD

OpenCTD es un proyecto de código abierto desarrollado por el grupo de Oceanography For Everyone (Thaler et al., 2020), el cual esta compuesto por un sensores de presión, temperatura y conductividad controlados por la placa de desarrollo Adafruit Feather M0 Adalogger, tiene incorporado un lector de tarjetas microSD. El contenedor del circuito electrónico esta hecho con PVC.

Los sensores utilizados en el proyecto son:

- Sensor de presión MS5803
- Dos sensores de temperatura DS18B20
- Sensor de conductividad Atlas Scientific



Figura 2.8: OpenCTD desarrollado por el grupo de Oceanography For Everyone

Fuente: Manual de construcción y Operación del OpenCTD Thaler et al. (2020)

2.4.2. Open Wave Height Logger (OWHL)

Open Wave Height Logger es un medidor de altura de oleaje de bajo costo (Lyman et al., 2020), el cual se utiliza un microcontrolador ATMEGA328p puesto en una placa de desarrollo personalizada para que el circuito entre en un tubo de PVC de diámetro interior 40mm.

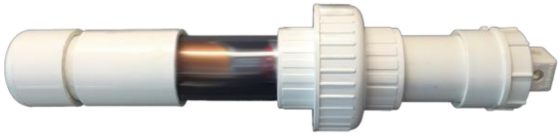


Figura 2.9: OWHL desarrollado por Luke Miller

Fuente: Sitio web http://owhl.org

2.4.3. Low Cost CTD

Low Cost CTD, es un proyecto desarrollado por Jonas Auråen (Auråen, 2019), donde su diseño esta basado en el proyecto OpenCTD, incorporando además un sensor de turbidez.

Los sensores utilizados en el proyecto son:

- Sensor de presión MS5803-14BA
- 4 Termistores de la marca Adafruit
- Sensor de conductividad Atlas Scientific
- Sensor de turbidez DFRobot



Figura 2.10: Low Cost CTD desarrollado por Jonas Auråen

Fuente: Obtenida de Auråen (2019)

2.4.4. Sonda Multiparamétrica

La sonda Multiparamétrica (Méndez-Barroso et al., 2020) desarrollada por el grupo mexicano LANRESC (Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera) .

Los sensores utilizados en el proyecto son:

- Sensor de pH Atlas Scientific
- Sensor de Conductividad Atlas scientific
- Sensor de oxigeno disuelto Atlas scientific
- Sensor de temperatura DS18B20
- Sensor de presión MS5837

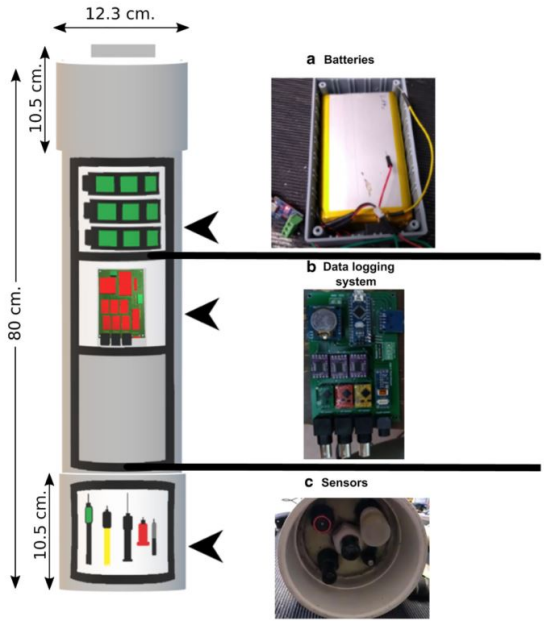


Figura 2.11: Esquema de la Sonda Multiparamétrica desarrollada por LANRESC

Fuente: Obtenida del Méndez-Barroso et al. (2020)

Capítulo 3

Metodología

En la presente sección se describe la metodología aplicada para alcanzar los objetivos descritos anteriormente.

3.1. Implementación con Arduino

3.1.1. Placa Microcontroladora

En primer lugar se debe elegir el microcontrolador que da funcionamiento a la unidad principal del instrumento, siendo posible los siguientes caminos:

1. Seleccionar una placa comercial ya desarrollada, que contenga un microcontrolador ya en funcionamiento.
2. Seleccionar el microcontrolador y preparar una placa personalizada para su implementación.

En el caso del OpenCTD es utilizada una placa Adalogger Feather M0 (Figura 3.1) desarrollada por Adafruit idéntica a la utilizada por los desarrolladores originales del instrumento, con la ventaja de contar con una ranura para tarjeta MicroSD incorporada.

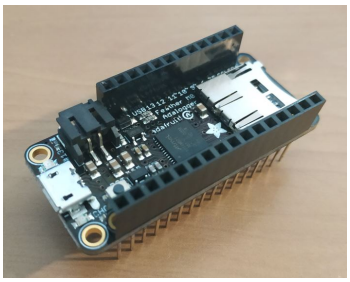


Figura 3.1: Adalogger Feather M0 de la marca Adafruit

Fuente: Elaboración propia

En el caso del OWHL, se utilizará una placa de desarrollo personalizada basada en un microcontrolador ATMEGA328P y soldando los componentes necesarios por separado (Figura 3.2), en sí se construye la placa para el proyecto desde cero.



Figura 3.2: Placas de desarrollo con sus componentes soldados

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Elección de los Sensores

Para cada proyecto se seleccionan los sensores a utilizar según los requerimientos de estos.

En el caso del OpenCTD se utilizan los siguientes:

- Sensor de presión: MS5803
- Sensor de temperatura: TSYS01 de la marca Bluerobotics
- Sensor de temperatura: DS18B20
- Sensor de conductividad: Sonda Atlas Scientific

Para el proyecto OWHL se utiliza el sensor de presión MS5803.

3.2. Lógica de funcionamiento

Para construir un instrumento de medición de parámetros es necesario conocer la lógica que explica su funcionamiento.

En primer lugar se debe contar con un elemento programable que pueda controlar y dirigir el funcionamiento de los módulos y sensores utilizados. Los sensores son los que medirán los parámetros de interés, asignándole un valor numérico, esa información debe quedar registrada en una tarjeta de memoria para ser leída posteriormente. Además para poder trabajar con una serie de tiempo es necesario incorporar un reloj que registre el momento en que se obtuvo la medición. El funcionamiento en conjunto de los sensores, reloj y datos guardados es controlado por el microcontrolador, además en él se programa la tasa de muestreo del instrumento, siendo está limitada por la capacidad de reacción de los sensores. El último requisito importante para el funcionamiento, es tener la fuente de poder adecuada que permita el funcionamiento autónomo del instrumento.

En la Figura 3.3, se presenta un esquema resumen de los elementos necesarios para un Datalogger, donde el microcontrolador se encarga de coordinar las funciones de los demás componentes.

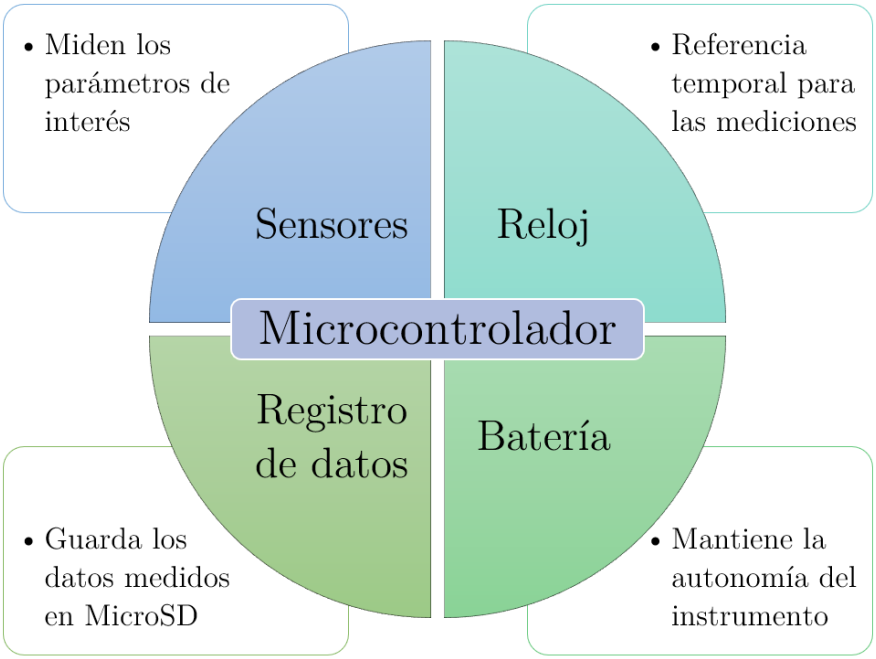


Figura 3.3: Esquema de elementos necesarios para un Datalogger

Fuente: Elaboración propia

3.3. Requisitos de diseño

Se debe definir el ambiente donde estará en funcionamiento el instrumento de medición. En este caso se requiere tomar mediciones en estuarios chilenos, donde existen ingresos de agua salina asociados a la marea, por lo que se definen los siguientes requisitos:

- Profundidad de funcionamiento $\mathrm{H_{max}} = 30[\mathrm{m}]$ (Aguas someras)
- Sensores con una resolución adecuada para registrar la variación del parámetro de interés
- Tasa de muestreo $1[\mathrm{Hz}]$ o mayor
- Batería para autonomía mínima de 24hrs

- Capacidad de almacenamiento de datos para una campaña correspondiente a una duración de 14 días

3.3.1. Requerimientos de uso

- Practicidad: Fácil de utilizar.
- Seguridad: Debe ser seguro tanto para el usuario, como para el instrumento.
- Mantenimiento: Capacidad de mantenimiento, verificación del contenedor y sensores. Recalibrable en caso de ser necesario.
- Estabilidad estructural: Ser lo más compacto posible para evitar fallas por la presión del agua.
- Transporte: Lo suficientemente pequeño para ser transportado por un solo usuario.

3.3.2. Requerimientos funcionales

- Lecturas rápida: considerar una tasa de muestreo mínima de $1[\mathrm{Hz}]$ para captar las variaciones de la columna de agua.
- Resistencia: El equipo debe soportar la presión ejercida por una columna de agua de por lo menos $30[\mathrm{m}]$ (equivalente a $4[\mathrm{Atm}]$ aproximadamente), para ser instalado en profundidad y evitar la interacción de terceros en superficie.
- Autonomía: Los equipos deben tener una autonomía mínima de $24[\mathrm{hrs}]$

3.3.3. Requerimientos estructurales

- Contenedor: Anticorrosivo, resistente a compresión, hermético y capacidad de resistir impactos que puedan surgir en el descenso.
- Uniones: Se debe mantener la hermeticidad del instrumento en funcionamiento y la capacidad de abrir para tener acceso a la tarjeta de memoria y batería.
- Sensores: Cada sensor debe tener la resistencia suficiente para tolerar presiones y temperaturas estando en funcionamiento.

- Adhesivos: Adhesivos resistentes a la composición química del agua marina y la presión que esta ejerce.

3.3.4. Requerimientos Técnico-Productivos

- Materiales: Se requieren materiales económicos para poder reproducir el instrumentos.
- Modo de producción: Construcción manual, por medio de subdivisión de tareas, para realizar un ensamblaje final.
- Costo: Mantener un costo bajo para la reproducción del instrumento.

3.3.5. Contenedor

Dados los requisitos de diseño mencionados, se opta por utilizar un contenedor de PVC hidráulico de categoría PN10 por ser un material con buena resistencia a la corrosión, de bajo costo, localmente accesible, requiere pocas herramientas para su trabajo y permite la reproducción de la instrumentación.

La empresa VINILIT S.A. es una de las principales fabricantes en Chile de este tipo de material. En su sitio web[1] entregan todas las especificaciones técnicas del material a usar.

3.4. Armado del circuito electrónico

3.4.1. OpenCTD

Como el OpenCTD es un instrumento para medir Conductividad, Temperatura y Presión, se debe aplicar un esquema como el mostrado en la Figura 3.4, donde los sensores son conectados a la placa de desarrollo.

[1] https://www.vinilit.cl/uploads/documents/carta/5a5770826942c.pdf

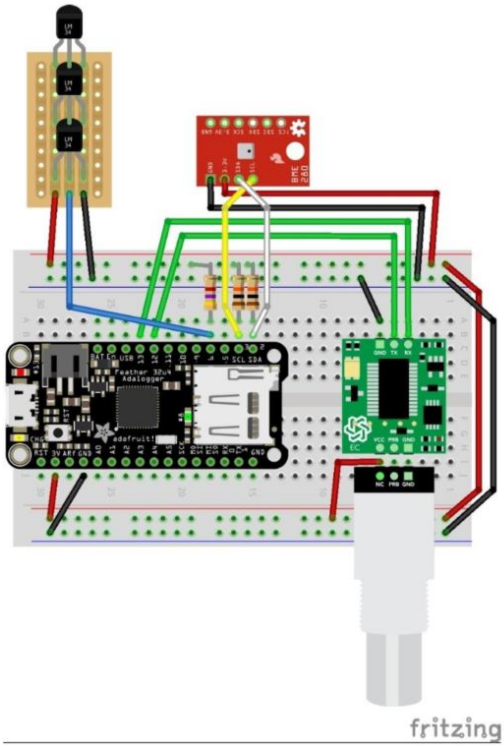


Figura 3.4: Esquema de conexiones OpenCTD en protoboard

Fuente: Manual de construccion y operacion OpenCTD, (Thaler et al., 2020)

3.4.2. Open Wave Height Logger

El instrumento Open Wave Height Logger (OWHL) esta compuesto por tres placas PCB diseñadas para el proyecto. La placa CPU (Figura 3.5a) contiene el microcontrolador ATMEGA328p donde se carga el código del OWHL. La placa Power (Figura 3.5b) contiene el lector de MicroSD y el conector para la batería. La placa MS5803 (Figura 3.5c) contiene el sensor de presión MS5803. Todas las placas tienen conectores hembra y macho que permiten la conexión de las placas entre ellas.

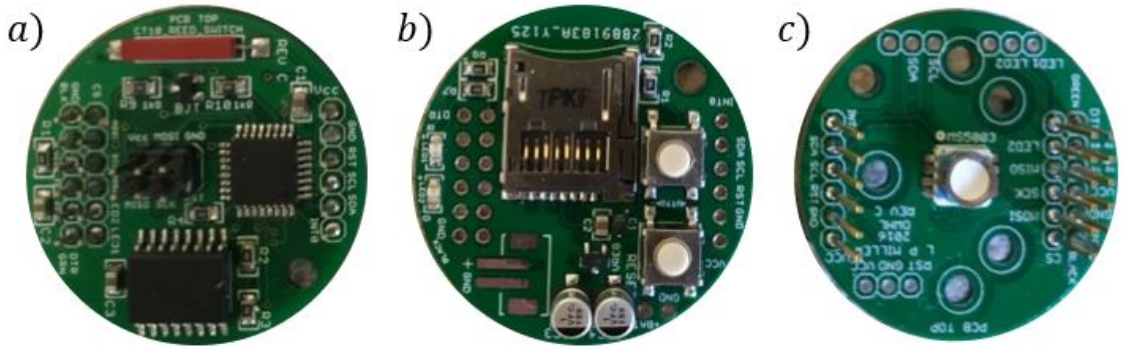


Figura 3.5: Placas PCB OWHL, a) Placa CPU, b) Placa Power, c) Placa MS5803

Fuente: Elaboración propia

3.5. Elección de baterías

Para elegir el sistema de baterías se debe tener lo siguiente en consideración:

- Voltaje de funcionamiento de los sensores y placa de desarrollo
- Consumo del instrumento
- Tiempo deseado de funcionamiento del instrumento

3.5.1. Voltajes de funcionamiento

La placa de desarrollo Feather M0 Adalogger de la marca Adafruit, utilizada en el OpenCTD, puede ser alimentada con $5{,}0[\mathrm{V}]$ desde el conector USB y en el caso de usar baterías, estas deben ser de Polímero de Litio (Lipo/Lipoly) o Ion Litio (LiIon) de voltajes $4{,}2/3{,}7[\mathrm{V}]$. El voltaje de salida desde la placa a los sensores es de $3{,}3[\mathrm{V}]$.

En el caso de la placa personalizada para el OWHL, necesita un voltaje $3{,}3[\mathrm{V}]$ para funcionar, sin embargo cuenta con un regulador de voltaje que permite conectar baterías hasta $6{,}0[\mathrm{V}]$ como máximo.

Además se deben considerar los voltajes de funcionamiento de cada sensor, como los siguientes:

- MS5803 → $V_{min} = 1{,}8[V]$ - $V_{max} = 3{,}6[V]$
- DS18B20 → $V_{min} = 3{,}0[V]$ - $V_{max} = 5{,}5[V]$
- TSYS01 → $V_{min} = 3{,}2[V]$ - $V_{max} = 3{,}4[V]$
- Conductividad (Atlas Scientific) → $V_{min} = 3{,}3[V]$ - $V_{max} = 5{,}0[V]$

3.5.2. Consumo de los instrumentos

Para estimar la duración de la batería de los instrumentos, se debe conocer cuánto es el consumo de energía de este, para ello se debe medir la corriente que pasa por circuito electrónico. Para ello se utilizó la función Osciloscopio de un instrumento Analog Discovery 2 de la marca Digilent (Figura 3.6).

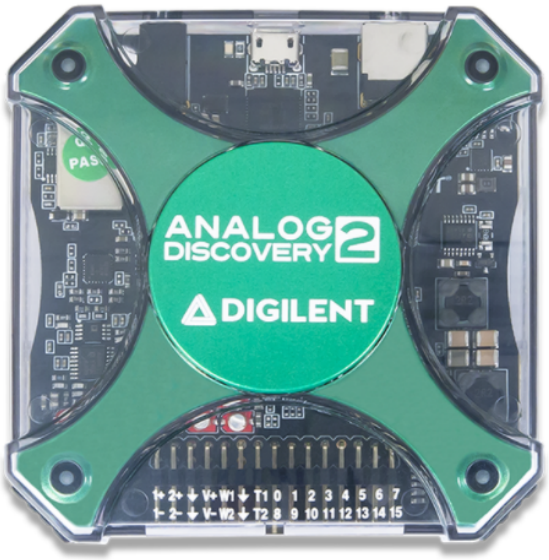


Figura 3.6: Analog Discovery 2

Sin embargo el Analog Discovery 2, no permite medir directamente la corriente que pasa por el circuito. Como solución al problema, se puede medir el voltaje que pasa por una resistencia de baja magnitud (Resistencia Shunt) y haciendo uso de la Ley de Ohm (Ec.3.1), se puede despejar el valor de la corriente.

$$I = \frac{V}{R_{Shunt}} \tag{3.1}$$

Donde:

I = Corriente [A]
V = Voltaje [V]
R = Resistencia [Ω]

El esquema para medir el voltaje de la resistencia se muestra en la Figura 3.7. Como la magnitud de la resistencia Shunt es baja $(1[\Omega])$, la caída de voltaje también será pequeña, por lo que la corriente que pasa por la resistencia es aproximadamente la misma que pasara por el circuito del instrumento.

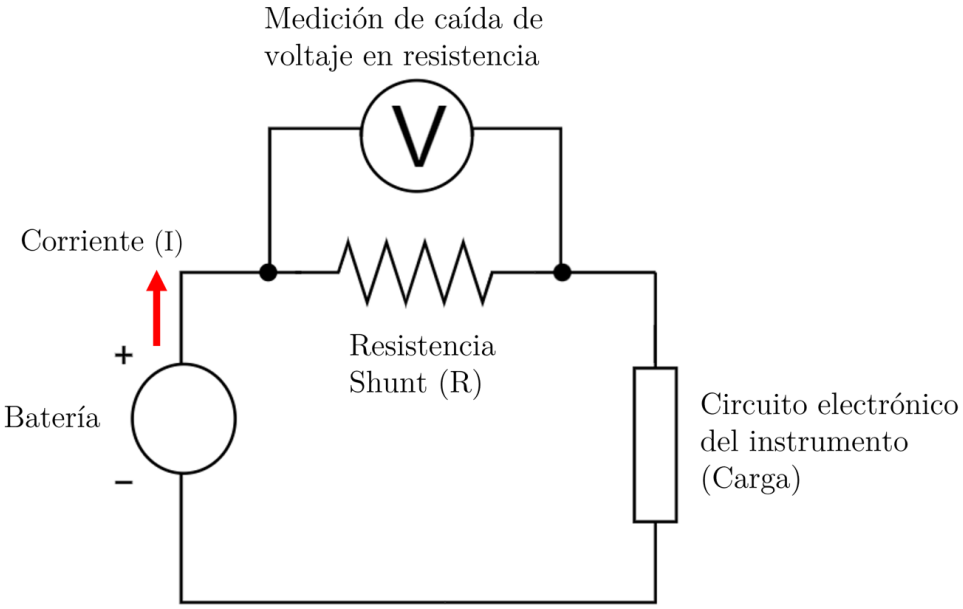


Figura 3.7: Consumo de corriente del OpenCTD en 1 segundo

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.8, se muestra como varía la corriente que pasa por el OpenCTD en $1[\mathrm{s}]$ de medición, por lo que integrando la corriente en el tiempo, se puede obtener que consume $34{,}22[\mathrm{mA}]$ por segundo.

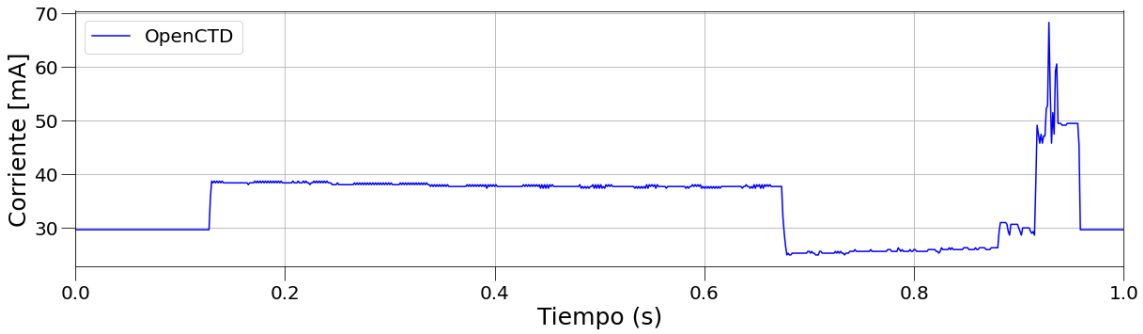


Figura 3.8: Consumo de corriente del OpenCTD en 1 segundo

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.9 se presenta la variación de la corriente que pasa por el OWHL en $1[\mathrm{s}]$. Se pueden apreciar 4 pulsos de corriente, esto se debe a que el OWHL mide a una frecuencia de $4[\mathrm{Hz}]$ y esos son los momentos que en que guarda la información en la tarjeta MicroSD. Integrando la corriente en el tiempo se obtiene que el consumo del OWHL es de $1{,}84[\mathrm{mA}]$ por segundo.

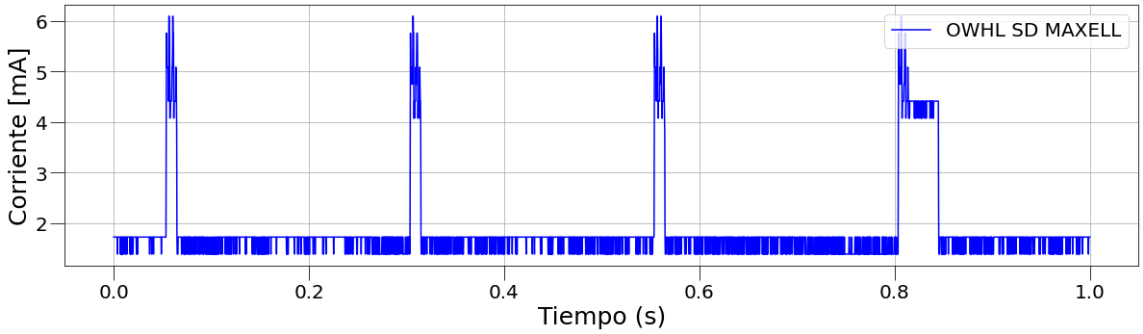


Figura 3.9: Consumo de corriente del OWHL en 1 segundo

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Tiempo de funcionamiento

El tiempo de funcionamiento se determina a partir de la capacidad de la batería y el consumo del instrumento utilizado, por lo que aplicando la ecuación (3.2).

$$T_{Bateria} = \frac{C_{Bateria}}{I_{Instrumento}} \tag{3.2}$$

Donde:

$T_{Bateria}$ = Tiempo de funcionamiento de la batería en horas $[\mathrm{h}]$
$C_{Bateria}$ = Capacidad de la batería en $[\mathrm{mAh}]$
$I_{Instrumento}$ = Corriente de consumo del instrumento en $[\mathrm{mA}]$

Para que los instrumentos funcionen durante 24[Hrs] se requiere que las baterías tengan la siguiente capacidad:

- OpenCTD $\rightarrow C_{Bateria} = 821{,}28[mAh]$
- OWHL $\rightarrow C_{Bateria} = 44{,}16[mAh]$

Por lo que conociendo la capacidad de la batería, se puede determinar el tiempo de funcionamiento de los instrumentos de manera aproximada. A modo de ejemplo, una batería de Ion Litio de $4000[\mathrm{mAh}]$ y voltaje de $3{,}7[\mathrm{V}]$ podrá alimentar el OpenCTD por 4 días en funcionamiento continuo aproximadamente.

3.6. Construcción de instrumento

Luego de las pruebas de funcionamiento de los componentes electrónicos, se debe incorporar dentro de un contenedor adecuado.

3.6.1. Elección de adhesivos

Para unir las diferentes partes del instrumento se considera la aplicación adhesivos según las partes que estén trabajando.

Para pegar las piezas de PVC y armar el contenedor de elementos electrónicos, se utiliza ”Adhesivo PVC Profesional EXTRA HUMEDAD” (Figura 3.10), recomendado para usos en piscinas según ficha técnica del producto. Al ser un contenedor para funcionar en ambientes húmedos, es adecuado.



Figura 3.10: Adhesivo PVC Oatey

Fuente: Imagen de referencia obtenida de https://www.sodimac.cl

El sensor de presión MS5803 es impermeable y viene inserto en una circuito que simplifica su operación, sin embargo las líneas conductoras deben ser protegidas del agua salina ya que existe una alta probabilidad de realizar un corto circuito y descomponer el sensor, por lo que el módulo se debe encapsular en un adhesivo epóxico de dos componentes, en este caso se utilizó el adhesivo Gorilla Epoxi (Figura 3.11).

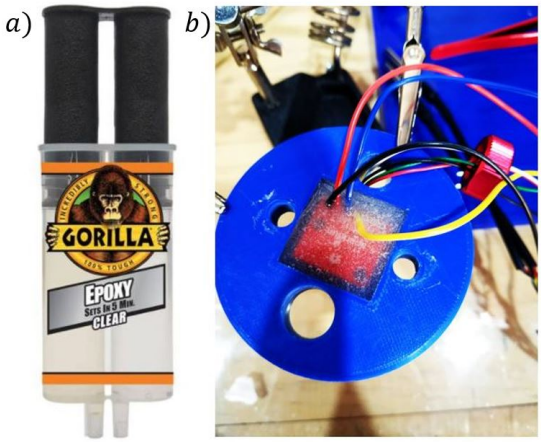


Figura 3.11: Adhesivo epoxi Gorilla

Fuente: a) Imagen del sitio web https://gorillaglue.cl/producto/gorilla-epoxy/, b) Elaboración propia

Para realizar sellos herméticos en las placas de impresión 3D, por donde pasan

los sensores en el OpenCTD, se utilizó una capa de adhesivo estructural E20HP (Figura 3.12a) que otorga una fuerte adhesión entre la placa de impresión 3D y las paredes interiores del tubo de PVC, sin embargo al momento de preparar la mezcla es susceptible a la temperatura, por lo que a temperaturas bajas pierde viscosidad y no llena completamente los espacios entre cables. Como solución a lo anterior, se incorpora una capa de Resina Epóxica de baja viscosidad (Figura 3.12c), que genera un sello hermético para los espacios existente.

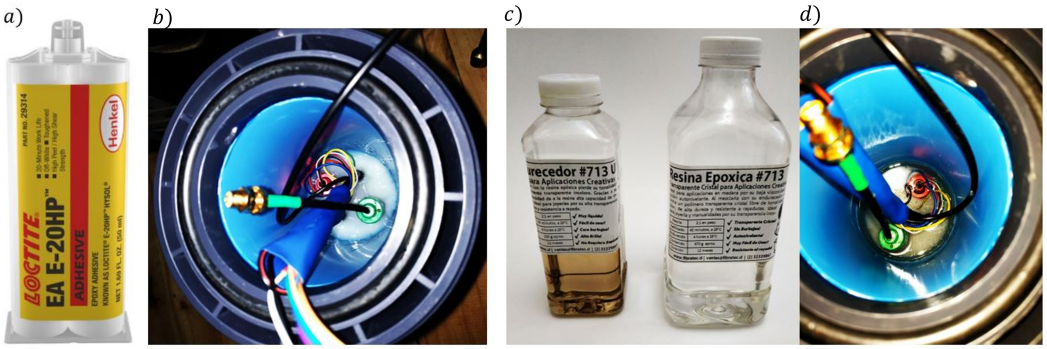


Figura 3.12: Adhesivo epóxico Loctite E20HP y Resina epóxica de baja viscosidad

Fuente: a) Imagen del sitio https://www.henkel-adhesives.com , Imagenes b), c) y d) son elaboración propia

3.6.2. Adaptación de piezas 3D

En los antecedentes del proyecto OpenCTD están diseñadas las tapas con orificios para que pasen los sensores que estarán en contacto con el agua, pero están diseñados para ser puestos al interior de tubos de PVC de 2” de diámetro y no incluyen la perforación para el Sensor de temperatura TSYS01. Se realiza la adaptación de la pieza modelo en el Software SolidWorks.

3.6.2.1. Modelación de piezas en Software

En primer lugar se toman los archivos de impresión 3D que son en formato STL y se procede a convertir en elementos sólidos en el programa SolidWorks.

Una vez realizado el modelo base, se ajusta la geometría para permitir la implementación del sensor TSYS01 y agrandar el diámetro de la tapa. Realizado se guarda como un archivo STL nuevamente, dando como resultado la tapa modificada, como se presenta en la Figura 3.13.

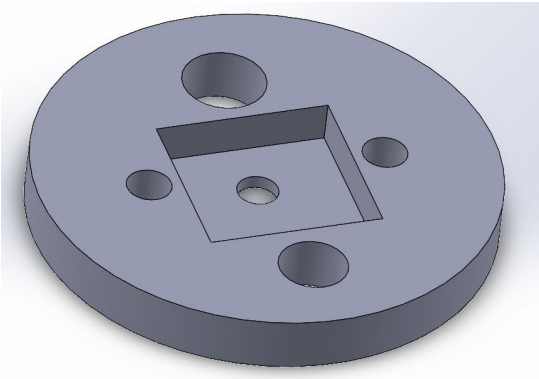


Figura 3.13: Tapa de OpenCTD modificada en diámetro y perforación para el sensor TSYS01 en SolidWorks

Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Pruebas de Hermeticidad

Una vez asegurada el contenedor esta completamente sellado, se realizan pruebas de hermeticidad para detectar posibles filtraciones.

La prueba consiste en sumergir el contenedor sin los componentes electrónicos y lleno de papel absorbente para detectar la presencia de humedad. La primera prueba se realiza con el contenedor sumergido en agua durante 12 horas, al finalizar el periodo se abre el contenedor y se verifica si el papel absorbente presenta rastros de humedad. Si la prueba es exitosa, se continúa con una prueba de 24 horas y se repite el procedimiento anterior. Cuando el equipo responde de manera correcta durante 72 horas, se considera que el contenedor es hermético.

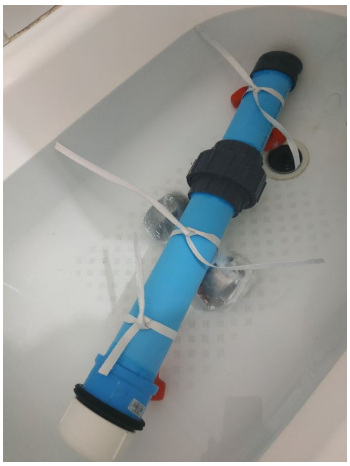


Figura 3.14: Prueba de hermeticidad en contenedor prototipo de OpenCTD

Fuente: Elaboración propia

3.6.4. Ensamblaje

Con el contenedor hermético y el circuito electrónico funcionando, se procede a ensamblar ambos, teniendo cuidado en que no exista humedad dentro del contenedor y que no existan partes metálicas expuestas que puedan entrar en contacto al momento de cerrar el instrumento.

3.7. Validación de instrumentación

3.7.1. Prueba de laboratorio

Se requiere realizar calibraciones de los sensores comparando su respuesta frente a valores conocidos, estos serán descritos en la sección de calibración.

3.7.2. Prueba de comparación con instrumento comercial

3.7.2.1. Levelogger 5 LTC

Se dispone de un instrumento Levelogger 5 LTC de la marca Solinst (Figura 3.15), que dispone un sensor de presión, temperatura y conductividad, con el cual se realizan pruebas comparativas para validar el desempeño de los instrumentos.



Figura 3.15: Levelogger LTC de la marca Solinst

Fuente: Imagen del sitio web https://www.solinst.com

Especificación	**Sensor de Presión**
Rango	20m
Precisión	± 0.01m
Resolución	0.001m

Especificación	**Sensor de Temperatura**
Precisión	± 0.05ºC
Resolución	0.003ºC

Especificación	**Sensor de conductividad**
Rango completo	0 to 100,000 µS/cm
Rango calibrado	50 to 80,000 µS/cm
Precisión	±1 %: 5,000 µS/cm - 80,000 µS/cm
Resolucion	± 0.1 µS/cm
Puntos de calibración para usuario	1413, 5000, 12,880, 80,000 µS

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas generales del Levelogger LTC

Fuente: Sitio web https://www.solinst.com

3.7.2.2. HOBO U20L

El instrumento HOBO U20L es un medidor de presión, que además cuenta con un sensor de temperatura (Figura 3.16).



Figura 3.16: Medidor de Presión HOBO de la marca Onset

Fuente: Imagen del sitio web https://www.onsetcomp.com

Especificacion	**Sensor de Presión**
Rango de operación	0 a 145 kPa; aproximadamente 0 a 4m
Precisión	0.4 cm
	Error máximo: ±0.8 cm
Resolución	0.14 cm

Especificación	**Sensor de Temperatura**
Rango de operacion	-20° a 50℃
Precisión	±0.44℃ desde 0° a 50℃
Resolución	0.10℃ a 25℃
Tiempo de Respuesta (90 %)	10 minutos en agua

Tabla 3.2: Especificaciones técnicas de los sensores del instrumento HOBO U20L

Fuente: Sitio web https://www.onsetcomp.com

3.7.2.3. YSI: 600LS Water Level Sonde

El instrumento 600LS de la marca YSI, es una sonda compacta que permite medir los parámetros de nivel de agua, temperatura y conductividad (Figura 3.17).



Figura 3.17: YSI 600LS

Fuente: Imagen del sitio web https://www.ysi.com

Especificación	Conductividad	Salinidad	Temperatura	Nivel ventilado
Rango	0 a 100 mS/cm	0 a 70 ppt	-5 a 50℃	0 a 9.1m
Resolución	0.001 a 0.1 mS/cm	0.01 ppt	0.01℃	0.001m
Precisión	0.001mS/cm	+-0.15℃	+-0.003m	

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas instrumento YSI 600LS

Fuente: Sitio web https://www.ysi.com

3.7.2.4. RBRconcerto³

El intrumento RBRconcerto³ de la marca RBR, es una sonda compacta que permite medir los parámetros de nivel de agua, temperatura y conductividad. En la Figura 3.18 se presenta el instrumento utilizado.



Figura 3.18: RBRconcerto³

Fuente: Imagen del sitio web https://rbr-global.com

Especificación	**Conductividad**	**Temperatura**	**Presión**
Rango	0-85mS/cm	-5℃ to 35℃	100 dbar
Precisión Inicial	±0.003mS/cm	±0.002℃	±0.05 dbar
Estabilidad	0.010mS/cm/year	$<$0.00005℃	$<$0.001 dbar
Resolución	0.001mS/cm	~1s (estándar) ~0.1s (opcional)	$<$0.01s

Tabla 3.4: Especificaciones técnicas de instrumento RBRconcerto³

Fuente: Sitio web https://rbr-global.com

Capítulo 4

Validación de instrumentación

El propósito de la siguiente sección, es describir los procedimientos realizados para determinar el desempeño de los instrumentos y validar su funcionamiento. Se realizaron ensayos en condiciones controladas en un laboratorio y pruebas en terreno en las desembocaduras del Río Aconcagua y Río Maipo.

4.1. Calibración y ensayo en laboratorio

En la presente sección se describen los procedimientos para la calibración de los sensores de los instrumentos. Se debe hacer énfasis en que el funcionamiento de los sensores fue verificado previamente en el prototipo en Protoboard y que la siguiente etapa se realiza con los contenedores sellados.

4.1.1. Sensor de presión

El sensor de presión MS5803 puede ser configurado con resoluciones de $1/0{,}6/0{,}4/0{,}3/0{,}2[\mathrm{mbar}]$, sin embargo a mayor precisión, el tiempo de respuesta del sensor es mas lento, siendo este de $0{,}5/1{,}1/2{,}1/4{,}1/8{,}22[\mathrm{ms}]$. Para la calibración se utilizó el sensor con la resolución máxima.

El procedimiento de calibración realizado fue:

1. Graduar un estanque de agua con separaciones cada $0{,}5[\mathrm{cm}]$, hasta una altura de

$25[\mathrm{cm}]$ según Figura 4.1.

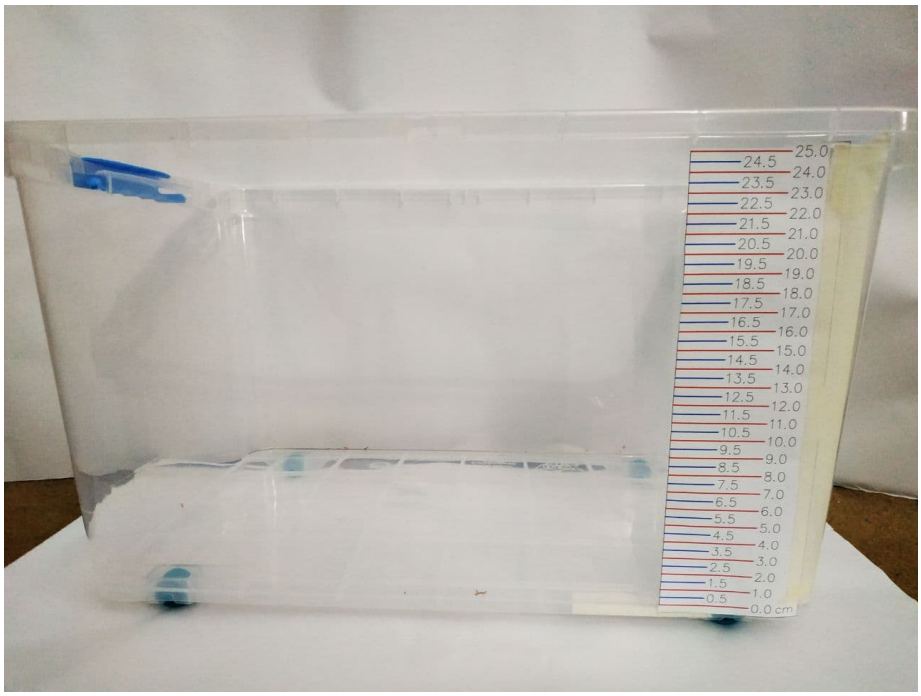


Figura 4.1: Estanque de pruebas

Fuente: Elaboración propia

2. Introducir el sensor en el estanque vacío y registrar medición por 5 minutos, que representará la presión atmosférica local.

3. Medir la diferencia de altura entre el sensor y el fondo del estanque.

4. Llenar el estanque con agua de la llave a temperatura ambiente hasta la marca de $10[\mathrm{cm}]$, esperar la estabilización del agua y registrar 5 minutos de mediciones.

5. Repetir el proceso llenando el estanque a las marcas de $10, 12, 15$ y $20[\mathrm{cm}]$.

6. Transformar los datos de presión a profundidad usando.

$$D = \frac{(P_{Sensor} - P_{Atm}) \cdot 100}{\rho \cdot g} \tag{4.1}$$

Donde:

D = Profundidad del sensor $[\mathrm{m}]$
P_{Sensor} = Presión medida por el sensor en $[\mathrm{mbar}]$
P_{Atm} = Presion atmosferica en $[\mathrm{mbar}]$
ρ = Densidad, se supone $1000[\mathrm{Kg/m3}]$
g = Aceleracion de gravedad $[\mathrm{m/s2}]$

7. Graficar la profundidad de referencia Vs Profundidad medida por el sensor, calcular error y correlación.

En la Figura 4.2 se muestran la regresión lineal entre los datos medidos por el sensor y la profundidad de referencia. Indicando una correlacion con un $\mathrm{R}^2 = 0{,}99$ y un $\mathrm{RMSE} = 0{,}18[\mathrm{cm}]$. En agua dulce ($\rho = 1000[\mathrm{kg/m^3}]$), una diferencia de $0{,}18[\mathrm{cm}]$ representa una diferencia de $0{,}18[\mathrm{mbar}]$ de presión.

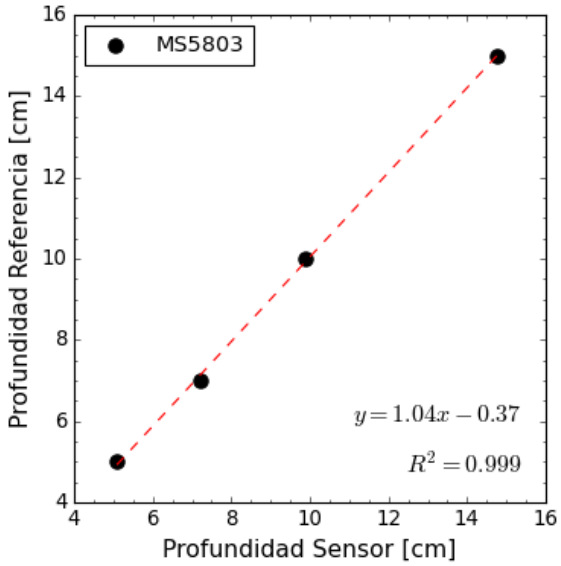


Figura 4.2: Respuesta del sensor a una profundidad de $5, 7, 10, 15[\mathrm{cm}]$

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.3 se presenta el gráfico de error en las mediciones según esquema del fabricante. Las mediciones realizadas, se encuentran en el rango de $1000 - 1020[\mathrm{mbar}]$, por lo que se espera un error menor a $10[\mathrm{mbar}]$ para temperaturas cercanas a $25[^{\circ}\mathrm{C}]$.

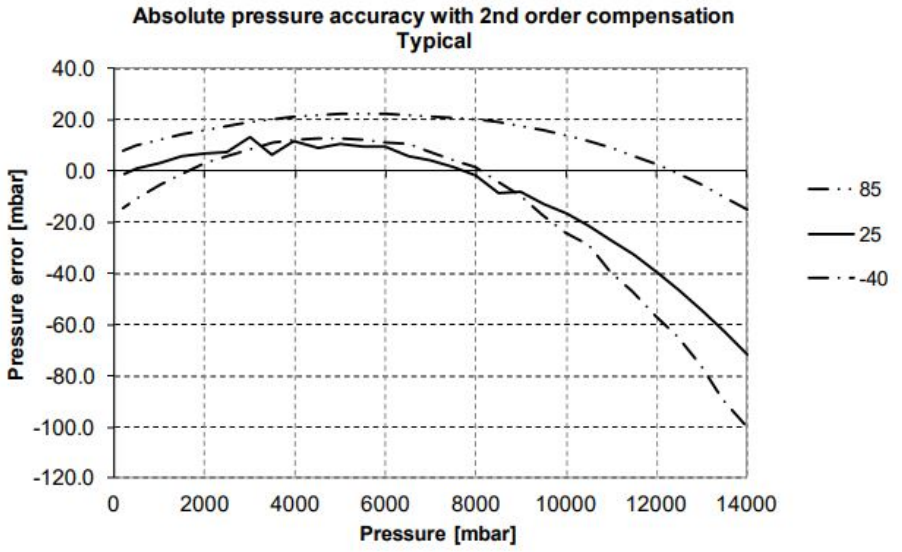


Figura 4.3: Error del sensor de presión para distintas temperaturas, el tipo de línea representa el error en agua a distinta temperatura.

Fuente: Sitio web https://www.te.com

4.1.2. Sensores de temperatura

El sensor de temperatura DS18B20 tiene un rango de operación de -55 a $125[^{\circ}\mathrm{C}]$ (Rango de precisión máxima -10 a $85[^{\circ}\mathrm{C}]$) y no está calibrado por fabrica. Mientras que el sensor de BlueRobotics que usa el TSYS01 tiene un rango de operación de -40 a $125[^{\circ}\mathrm{C}]$ (Rango de precisión máxima -5 a $50[^{\circ}\mathrm{C}]$ y un error de $\pm 0{,}1[^{\circ}\mathrm{C}]$).

Dado que la calibración de sensores de temperatura, dependerá de lo que mida el instrumento más preciso y entregue mayor confiabilidad, los resultados serán contrastados luego de todas las experiencias para definir los factores de calibración.

La experiencia en laboratorio para obtener los coeficientes de calibración de los sensores de temperatura se realiza con el siguiente procedimiento:

1. Llenar un estanque con agua y llevarlo a una temperatura de $40[^{\circ}\mathrm{C}]$, esto es para mantenerse alejado de los $60[^{\circ}\mathrm{C}]$, que es el punto de ablandamiento del PVC, material del que esta hecho el contenedor del instrumento.

2. Introducir los 3 sensores en de temperatura en midiendo en el agua.
3. Colocar 3 termómetros de alcohol cerca de los sensores.
4. Registrar la medición de los termómetros de alcohol en intervalos de 5 minutos.
5. Se repite el procedimiento hasta que la temperatura del agua del estanque se estabiliza con el ambiente.
6. Considerar como temperatura esperada el promedio de los 3 termómetros de alcohol como referencia.
7. Graficar la Temperatura de referencia Vs Temperatura de medida por el sensor, para cada sensor.
8. Determinar las constantes de calibración α y β, como los coeficientes de la regresión lineal.

$$T_{Referencia} = \alpha \cdot T_{Sensor} + \beta \tag{4.2}$$

Donde:

α = Pendiente de la regresión [-]
β = Intercepto de la regresión $[^{\circ}\mathrm{C}]$

9. Corregir la temperatura medida de cada sensor aplicando las constantes de calibración.

$$T_{Calibrada} = \alpha \cdot T_{Sensor} + \beta \tag{4.3}$$

En la Figura 4.4, se muestran los resultados obtenidos antes de la calibración, donde se aprecia un desfase horizontal de los sensores, respecto del valor de referencia. Al aplicar los coeficientes de calibración para cada sensor, se obtiene una respuesta más adecuada para los sensores de temperatura. entregando una correlación de $\mathrm{R}^2 = 0{,}99$ en todos los casos y un $\mathrm{RMSE} = 0{,}21[^{\circ}\mathrm{C}]$ para el sensor A, un $\mathrm{RMSE} = 0{,}59[^{\circ}\mathrm{C}]$ para el sensor B y un $\mathrm{RMSE} = 0{,}19[^{\circ}\mathrm{C}]$ para el sensor C. Con ello se puede concluir que efectivamente el sensor de BlueRobotics tiene mejor precisión que los sensores DS18B20, en este ensayo.

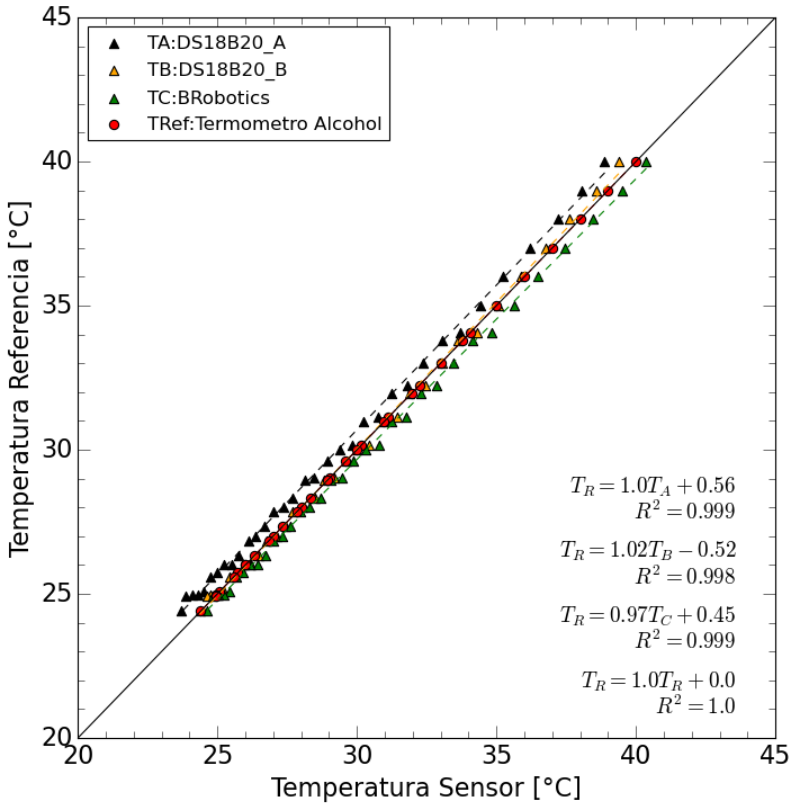


Figura 4.4: Gráfico con sensores sin calibrados

Sensor	α	β
T_A	1.00	0.56
T_B	1.02	-0.52
T_C	0.97	0.45
T_R	1.00	0.00

Tabla 4.1: Valores α y β para cada sensor

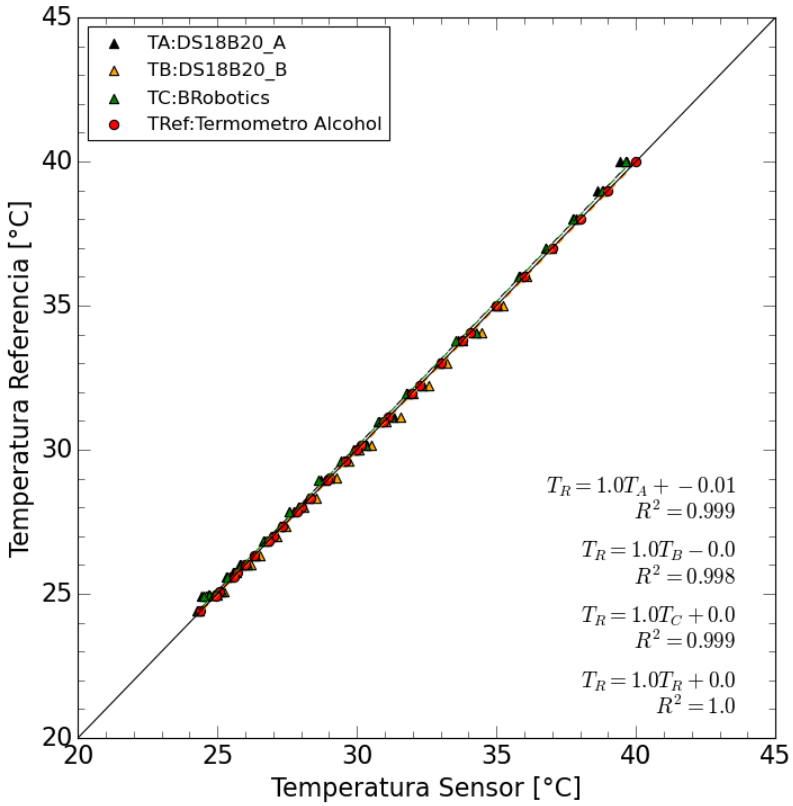


Figura 4.5: Gráfico con sensores calibrados

Sensor	α	β
T_A	1.00	-0.01
T_B	1.00	-0.00
T_C	1.00	0.00
T_R	1.00	0.00

Tabla 4.2: Valores α y β para cada sensor

4.1.3. Sensor de Conductividad

El sensor de conductividad de Atlas Scientific tiene un rango de operación de $5 - 200{,}000[\mu\mathrm{S/cm}]$, consiste en un sensor conductivo, que por medio de dos electrodos, superficie y distancia de separación conocidos entre ellos, calcula la conductividad.

Este sensor requiere una calibración antes de su uso, la cual es cargada directamente en la placa de desarrollo Arduino. Esta calibración requiere del uso de estándares de conductividad con valores conocidos. El procedimiento descrito por el fabricante es el siguiente:

1. Cargar el programa “Serial for EC Calibration m0” en el Adafruit Adalogger M0
2. Abrir el Monitor en Serie del Arduino IDE, configurar en 9600 Baudios y “Carriage Return”
3. Ingresar c,0 en la linea de comando, lo cual apagara el monitoreo
4. Ingresar, constante K de la sonda
5. Realizar una calibración en Seco
6. Realizar una calibración Baja
7. Realizar una calibración Alta
8. Volver a medir continuamente

En la Figura 4.6, se muestra luego de la calibración la respuesta obtenida del OpenCTD, en comparación con los instrumentos comerciales Solinst y RBR. En la Tabla 4.3 se presenta un resumen del RMSE y R^2 obtenidos para el ensayo con estándares de calibración. Donde se aprecia que el OpenCTD tiene el mayor RMSE, donde se ve afectado en mayor medida para el estándar más alto de calibración, sin embargo tiene una buena correlación. Dado que la calibración se realizó en un laboratorio casero, la realización de pruebas en un ambiente con mayor control podría mejorar la respuesta del sensor. Una diferencia de $5563{,}31[\mu\mathrm{S/cm}]$ puede representar una variación en salinidad entre $4{,}3 - 3{,}48[\mathrm{PSU}]$ para temperaturas entre $10 - 15[^{\circ}\mathrm{C}]$.

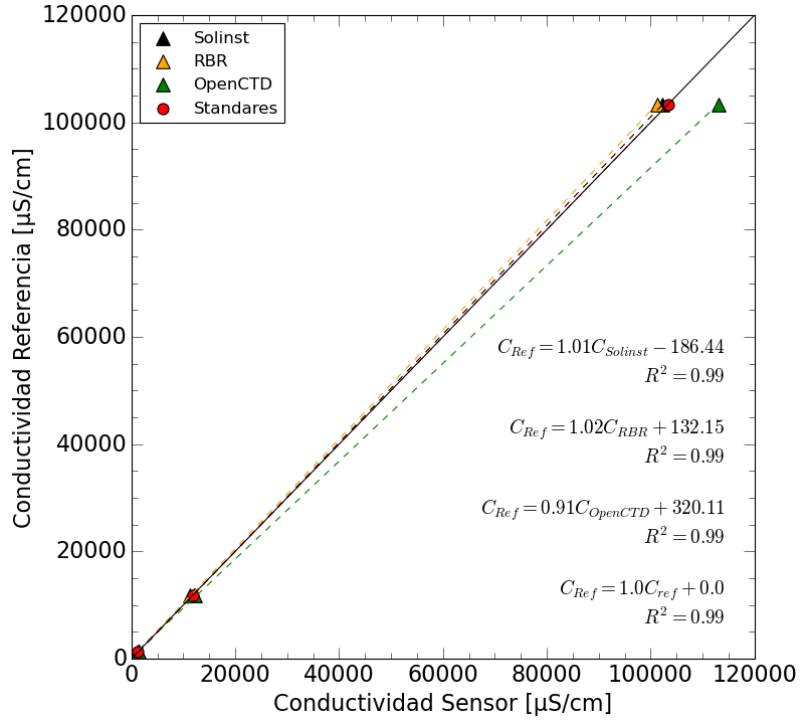


Figura 4.6: Gráfico con los instrumentos Solinst, RBR y OpenCTD para valores estandarizados

ID Sensor	Ensayo 1	
	$RMSE$	R^2
OpenCTD	5563.31	0.99
Solinst	623.52	0.99
RBR Concerto3	1270.68	0.99

Tabla 4.3: Comparacion de isntrumentos Solinst, RBR y OpenCTD, respecto de los estandares de conductividad

4.2. Campaña de Terreno: Desembocadura del Río Aconcagua

Fecha: 25 de junio 2021

En la campaña de terreno efectuada en el Río Aconcagua se probó el funcionamiento de los instrumentos OpenCTD y Open Wave Height Logger realizando mediciones en conjunto de un YSI CTD y un HOBO respectivamente.

Sin embargo los resultados obtenidos no fueron los deseados ya que existieron fallas en las conexiones de los sensores que impidieron el correcto funcionamiento de los instrumentos construidos.

El resultado que puede ser analizado corresponde a los sensores de temperatura del OpenCTD al compararlo con el YSI. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.7, donde están graficados los 3 sensores de temperatura del OpenCTD y el del YSI, en esta medición Temp A y Temp B representan al sensor DS18B20, mientras que la Temp C corresponde al sensor de Bluerobotics. Se aprecia la existencia de un desfase entre los sensores DS18B20 (A y B) con respecto al sensor de bluerobotics (C) ya que son mediciones sin calibrar. En la Figura 4.8 se presenta la regresión lineal de cada sensor y el YSI (usado como referencia de temperatura). Se aprecia que las mediciones tienen un desfase horizontal y también en pendiente, además de que para una misma temperatura de referencia existen diferentes temperatura de respuesta en el sensor DS18B20, lo cual no es deseado ya que incorpora incertidumbre en el resultado, en cambio el sensor de BlueRobotics, presenta un desfase horizontal pero una pendiente cercana a 1, por lo que su respuesta puede ser calibrada.

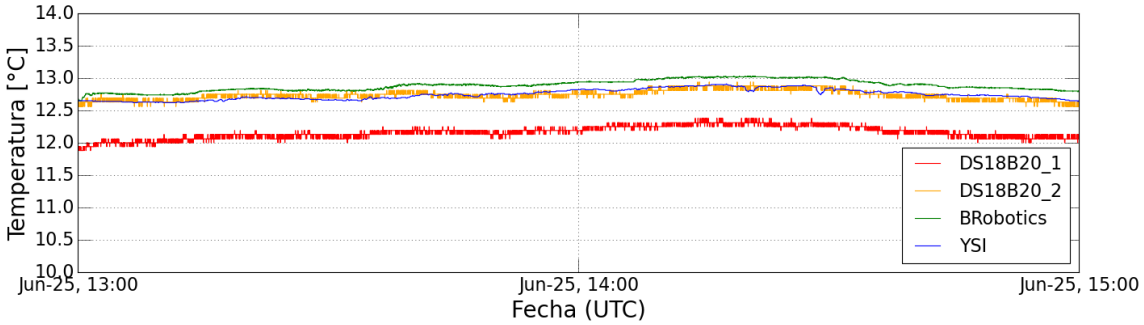


Figura 4.7: Comparación de temperatura OpenCTD sin calibrar y YSI CTD del año 2021

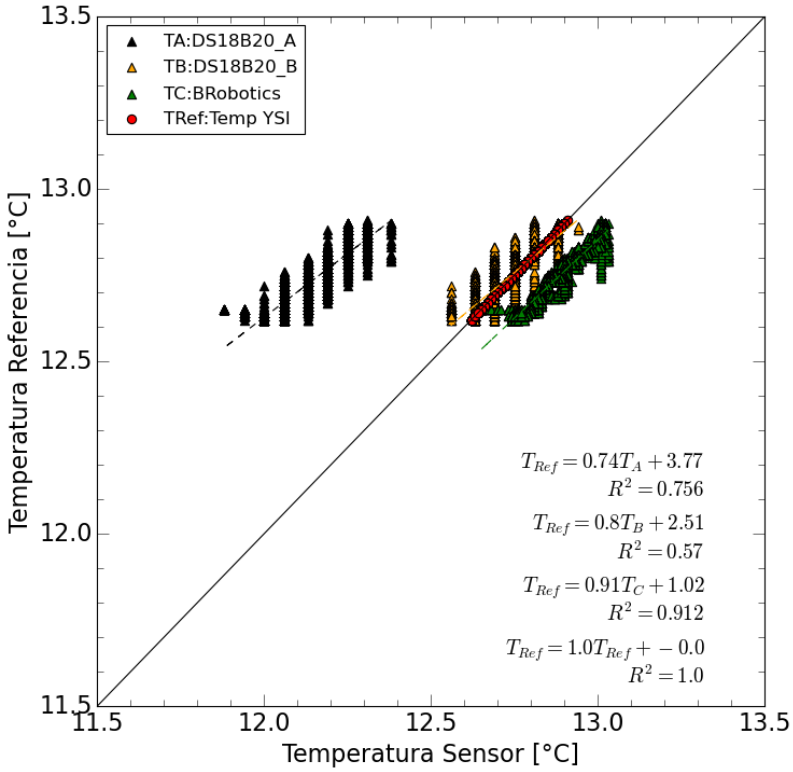


Figura 4.8: Gráfico con sensores sin calibrar

En la Figura 4.9 se presentan las regresiones lineales con los coeficientes de calibración aplicados a las medidas. La respuesta de los sensores no logra ajustarse directamente a lo que mide el YSI, sin embargo esto puede deberse a los problemas encontrados en las conexiones y que generaron que los sensores no funcionaran de manera correcta.

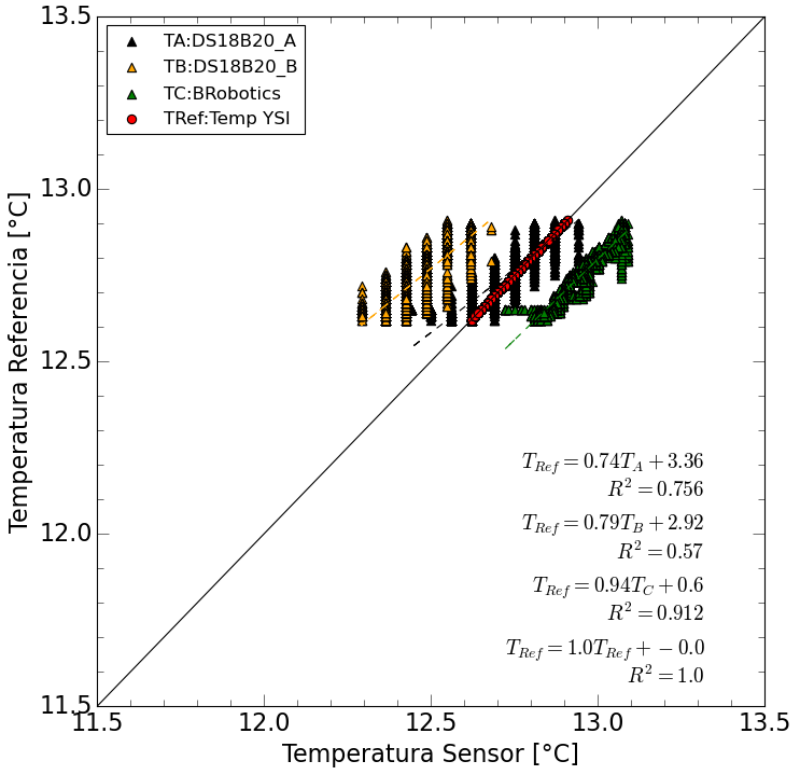


Figura 4.9: Gráfico con sensores con calibración

4.2.1. Aprendizajes

Se debe revisar las conexiones del cable coaxial que comunica el sensor de conductividad con la MCU, ya que la conexión incompleta fue la que provocó que el sensor no tuviera respuesta.

Los sensores de temperatura no respondieron de manera adecuada, generando inconsistencia al medir un valor de referencia.

Por el lado del OWHL los cables que permiten la conexión de una batería, tenían un espesor inferior al necesario, por lo que movimientos en el transporte fatigaron los cables provocando su desconexión.

4.3. Campaña de Terreno: Desembocadura del Río Maipo

Fecha: 03 de septiembre 2021 al 12 de septiembre 2021

En la campaña de la desembocadura del Río Maipo se realizaron pruebas con los instrumentos OpenCTD y dos OWHL, comparándolos con los instrumentos YSI CTD y dos HOBO respectivamente. En la Figura 4.10 se indican los puntos donde fueron instalados los instrumentos. En el punto A fueron instalados dos CTD de la marca YSI, uno en Superficie y otro en fondo. En el punto P se instalaron el OWHL N°2, un sensor de presión HOBO y el OpenCTD en superficie. En el punto M se instaló el OWHL N°3 junto a un HOBO.

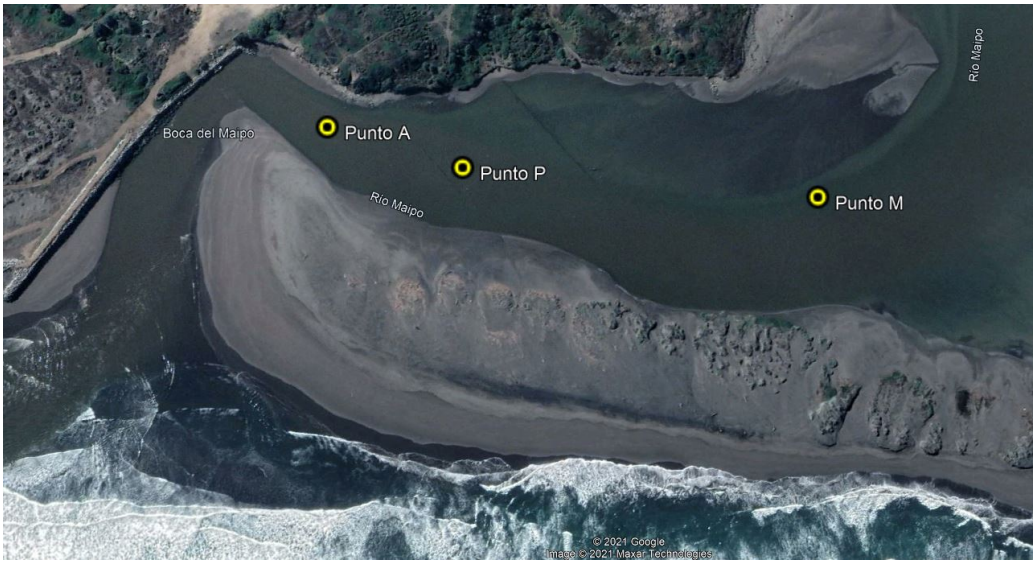


Figura 4.10: Puntos de Medición

En la Tabla 4.4 se encuentran las coordenadas en grados decimales de los Puntos A, P y M. Se debe notar que la distancia entre el A y P es de aproximadamente $110{,}0[\mathrm{m}]$ y entre el P y M son $320{,}00[\mathrm{m}]$.

ID	Latitud	Longitud
Estación A	-33.6150	-71.6274
Estación P	-33.6160	-71.6278
Estación M	-33.6186	-71.6281

Tabla 4.4: Coordenadas en grados decimales, los nombres de las estaciones señalan puntos característicos observados en terreno. donde A:Ancla, P:Palos y M:Medio

4.3.1. Sensores de Presión HOBO y OWHL en las estaciones P y M

En cada estación (P y M) se instaló un OWHL y un HOBO en la misma placa de anclaje (Figura 4.11), la cual va sumergida en el fondo para permanecer estática durante el periodo de medición, los instrumentos fueron anclados al peso por medio de amarras suficientes para inmovilizar los instrumentos. Además se incorpora una boya para identificar la ubicación de los instrumentos. Respecto de la tasa de muestreo, el OWHL fue programado para medir a una frecuencia de $4[\mathrm{Hz}]$ mientras que el HOBO mide a una frecuencia de $0{,}067[\mathrm{Hz}]$ (1 muestra cada 15 segundos).



Figura 4.11: Sensores de Presión OWHL 3 y HOBO en el punto M

En las Figuras 4.12 y 4.13 se presentan las mediciones obtenidas por ambos sensores de presión (OWHL y HOBO) ubicados en el punto P y M respectivamente. Donde se aprecia que la respuesta de ambos instrumentos concuerda con lo observado en la campaña de terreno.

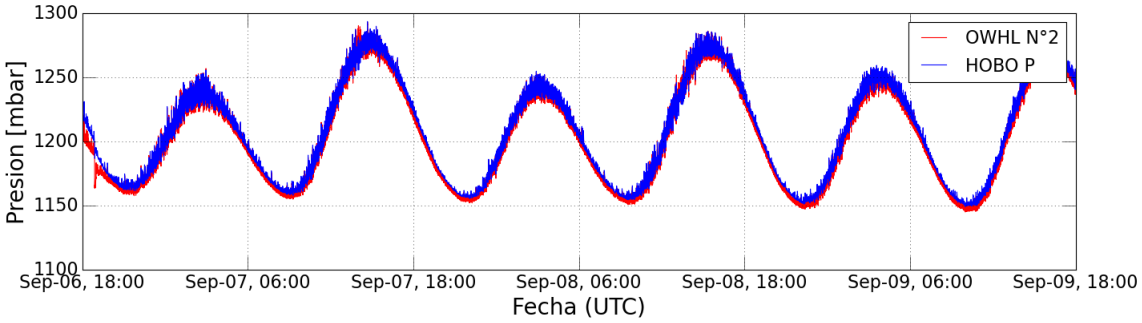


Figura 4.12: Sensores de Presión OWHL 2 y HOBO en el punto P, mediciones realizadas el año 2021

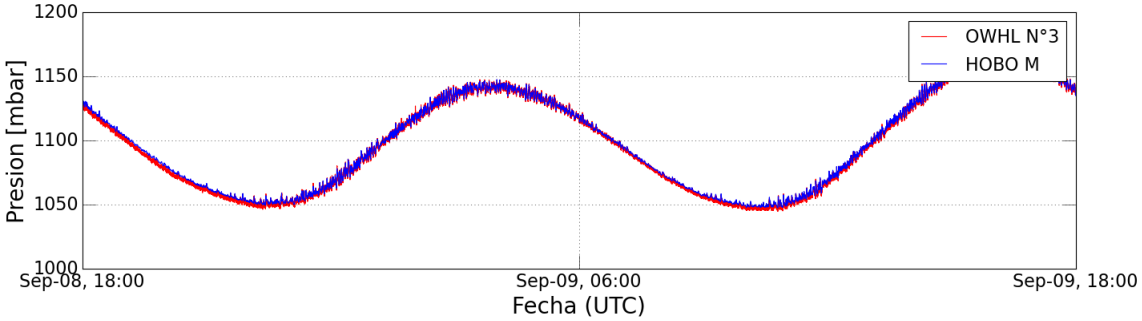


Figura 4.13: Sensores de Presion OWHL 3 y HOBO en el punto M, mediciones realizadas el año 2021

En la Figura 4.14 se muestra la regresión lineal entre las mediciones del OWHL 2 y el HOBO en el punto P. Dado que la frecuencia de muestreo del OWHL es de $4[\mathrm{Hz}]$ y la del HOBO es $0{,}067[\mathrm{Hz}]$, se toma una submuestra cada 15 segundos del OWHL para obtener la relación entre ambos instrumentos. Aplicando el coeficiente de correlación de Pearson, se obtiene un $\mathrm{R}^2 = 0{,}99$ indicando una alta relación lineal entre ambos instrumentos. Además calculando el error cuadrático medio (RMSE) se obtiene un valor de $\mathrm{RMSE} = 3{,}71[\mathrm{mbar}]$ que en agua de mar esquivalente a $3{,}7[\mathrm{cm}]$ aproximadamente.

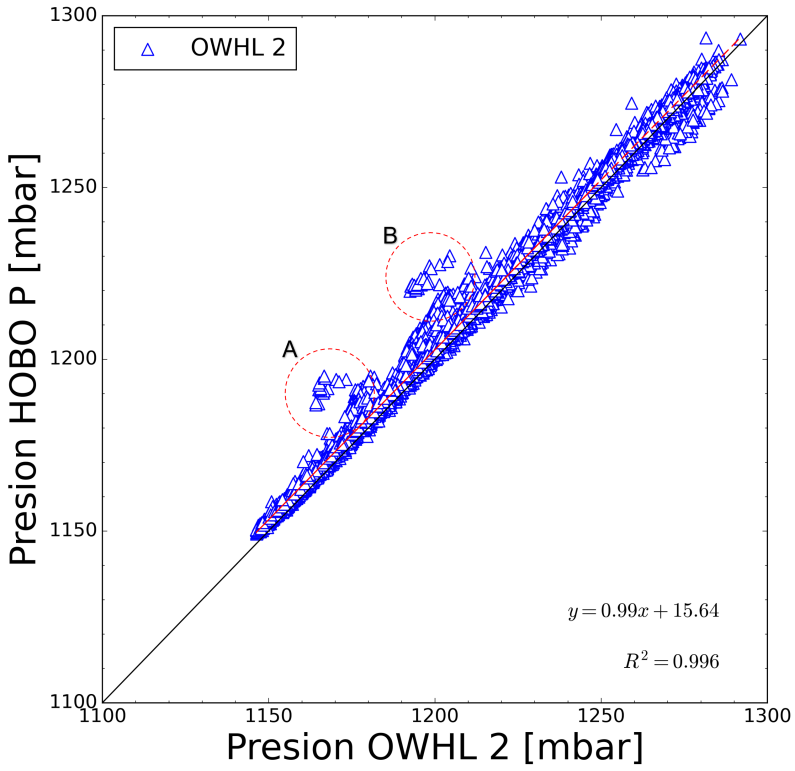


Figura 4.14: Correlación entre OWHL y HOBO en Punto P

Además en la Figura 4.14 se indican los círculos A y B, donde su variación respecto de la tendencia se debe a dos fenómenos:

1. Sincronización de reloj: Para sincronizar el reloj del OWHL, se debe realizar de manera manual, introduciendo una hora y cargando el software en el microcontrolador. Sin embargo en el proceso de carga ocurre un desfase, ya que este no es instantáneo. El programa se carga considerando este desfase pero aun así, la sincronización no es perfecta. Por lo que existe un desplazamiento lateral en los datos.

2. Peaks de Marea: El OWHL cuando se encuentra en los peaks de marea, tiene diferencias con el HOBO de aproximadamente $15\mathrm{cm}$, sin embargo esto puede deberse a que al momento de instalar los equipos, si bien se encuentran juntos, la altura a la que se encuentran los sensores, es diferente debido a la composición de cada instrumento y al estar anclados en el fondo donde no es una superficie perfectamente horizontal, aumenta la diferencia de la medición.

Se puede concluir que el OWHL tiene una respuesta comparable al de instrumento comercial como el HOBO.

4.3.2. Resultados OpenCTD en el punto P

En la Figura 4.15 se muestran las mediciones obtenidos por el OpenCTD en el punto P, que se situó aproximadamente $50[\mathrm{cm}]$ bajo la superficie del agua, además se incluyen las mediciones de presión del HOBO y OWHL que representan los cambios de la marea en el periodo de medición.

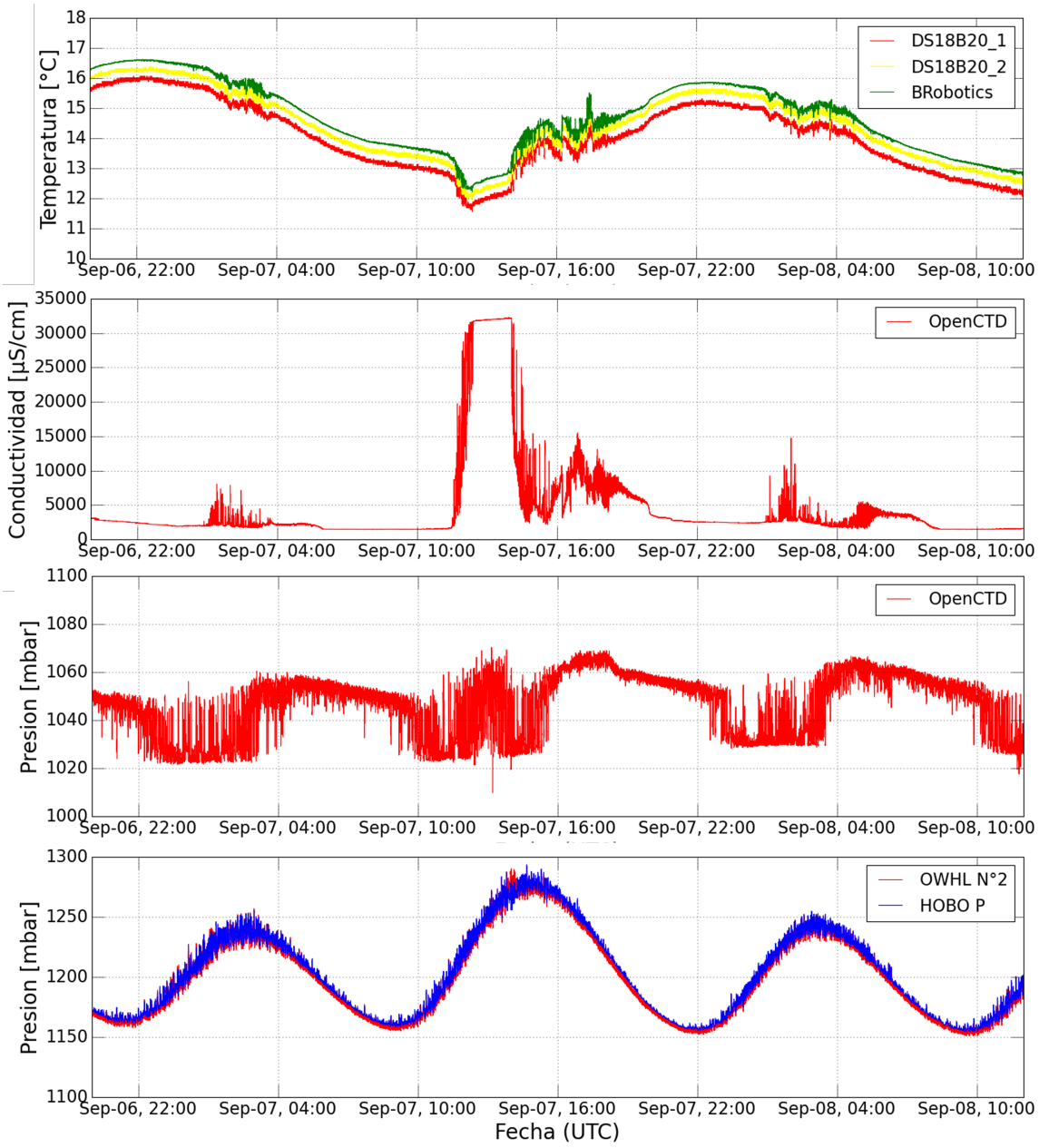


Figura 4.15: Comparación de series de tiempo entre el OpenCTD, incluyendo mediciones de presión OWHL y HOBO en Punto P

La Figura 4.15 muestra que cuando la marea sube (Cambios de nivel registrado por el OWHL), el ingreso de agua salada al estuario es medido por los sensores del OpenCTD como aumentos en el valor de la conductividad y inestabilidades en la temperatura debido

a la mezcla de agua salada con fresca, lo cual indica una buena respuesta del instrumento frente al fenómeno físico.

4.3.3. Resultados comparando el OpenCTD-YSI entre los Puntos P y A

En la estación A fueron instalados dos instrumentos YSI, uno en superficie y el otro en profundidad por medio de una cuerda guía y un ancla en el fondo. En las Figuras 4.16, 4.17, 4.18 se presenta la instalación de los instrumentos tanto en superficie como en profundidad en la cuerda guía unidos a ella por medio de amarras. Además en la Figura 4.19 se presenta un esquema con las profundidades de funcionamiento de los instrumentos en el punto A y P, los cuales se encuentran separados a una distancia de $113[\mathrm{m}]$ entre ellos.



Figura 4.16: Instalación de los YSI en superficie y profundidad en la cuerda guía para la estación A



Figura 4.17: Instalación del YSI en superficie



Figura 4.18: Instalación del YSI en profundidad junto al ancla

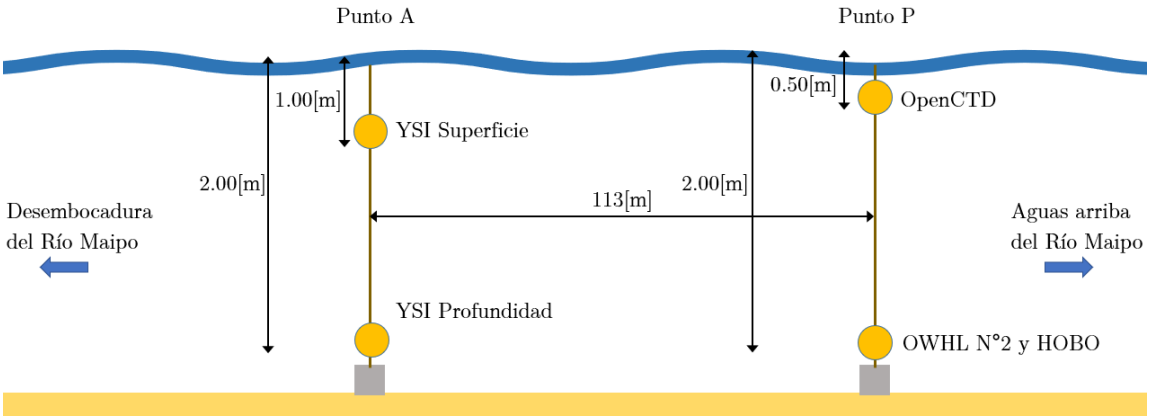


Figura 4.19: Esquema de profundidad de funcionamiento de los instrumentos en los puntos A y P

En la Figura 4.20 se comparan las mediciones obtenidas por el OpenCTD en el punto P, con las obtenidas por los YSI CTD (En superficie y profundidad) en el punto A. En primer lugar se puede identificar la profundidad de funcionamiento de cada instrumento. El OpenCTD inicialmente, funcionó a una profundidad de $0{,}50[\mathrm{m}]$, lo cual es superficial, el YSI en Superficie estaba a $1[\mathrm{m}]$ de profundidad y el YSI en Profundidad a $2[\mathrm{m}]$ aproximadamente. También se puede apreciar el cambio de la marea en el sensor en profundidad, ya que tiene menor efecto el oleaje, al estar más cercano al ancla.

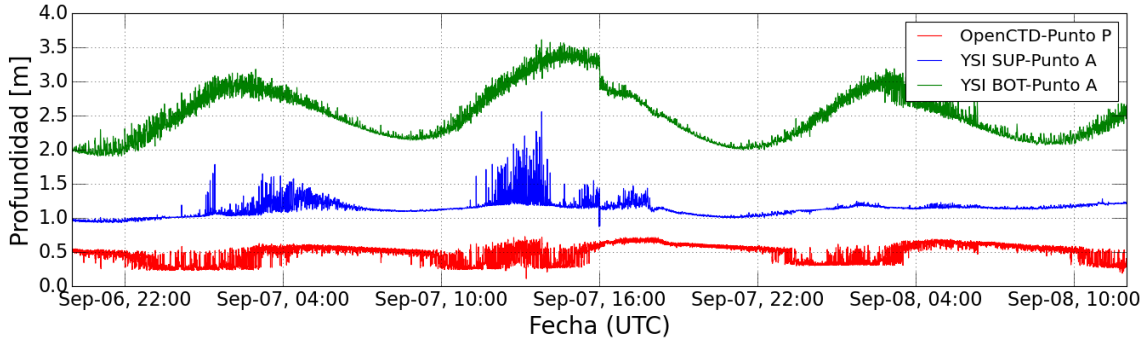


Figura 4.20: Comparación de series de tiempo de profundidad entre el OpenCTD y los YSI CTD

En la Figura 4.21, se muestran los resultados obtenidos por los sensores de conductividad de los 3 instrumentos y se puede apreciar que cuando la marea sube,

el ingreso de agua salada al estuario genera un cambio en la conductividad, el cual es captado por lo sensores del OpenCTD y el YSI. Sin embargo la respuesta obtenida no tiene la misma magnitud. Esto puede deberse a una combinación de los siguientes efectos:

- La diferencia de profundidad a la cual están instalados ambos instrumentos, ya que el OpenCTD se encuentra a $0{,}50[\mathrm{m}]$ de la superficie y el YSI a $1[\mathrm{m}]$ de profundidad aproximadamente.
- La distancia horizontal de los equipos es aproximadamente $113[\mathrm{m}]$, donde el ingreso de agua salada puede ser en parte detenido por el caudal del río.
- El funcionamiento del sensor de conductividad del OpenCTD no fue el correcto y no midió los valores reales. Esto se puede apreciar con la meseta plana el día 7 de septiembre entre las 10:00 y 16:00 hrs.

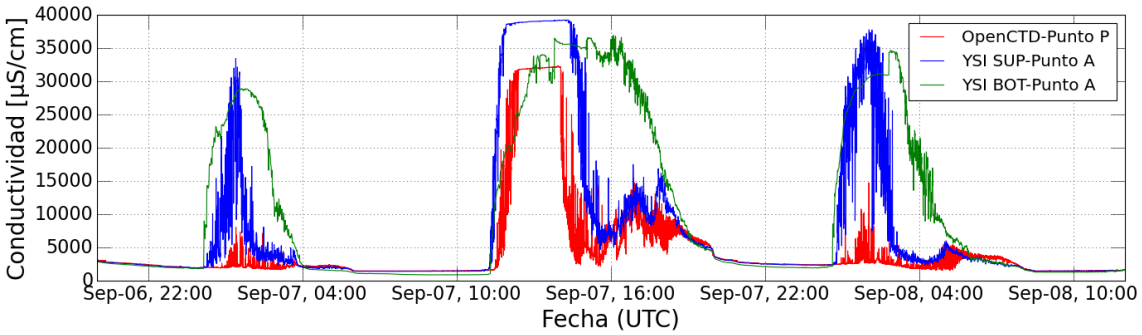


Figura 4.21: Comparación de series de tiempo de conductividad entre el OpenCTD y los YSI CTD

En el caso de los sensores de temperatura del OpenCTD, estos pueden ser contrastados con el YSI del punto A que también se encuentra en superficie (Figura 4.22), donde se puede se puede apreciar que el sensor de temperatura de Bluerobotics presenta mediciones similares en casi toda la serie de tiempo y que las variaciones son provocadas cuando sube la marea ya que el YSI se encontraba más cercano a la boca del estuario. Por otro lado los sensores DS18B20 registran las variaciones de temperatura de manera similar al sensor de Bluerobotics, pero con un desfase, esto se debe a que las mediciones no tienen aplicados los factores de calibración obtenidos en laboratorio, ya que son aplicados en post-procesamiento de los datos.

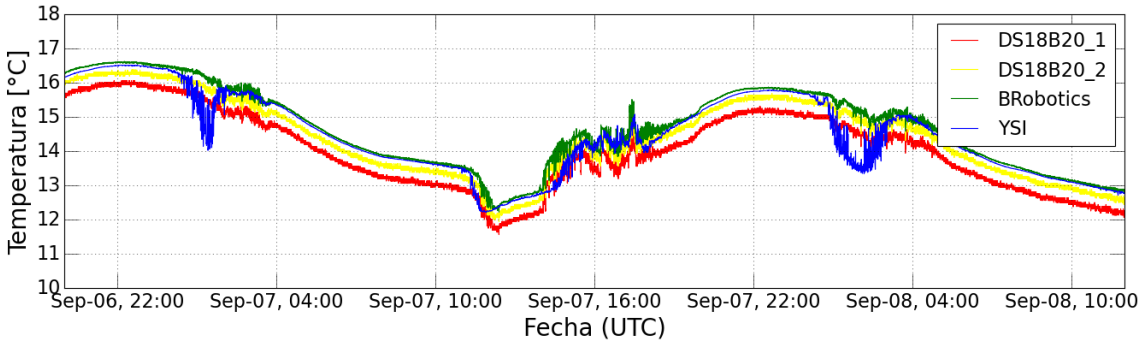


Figura 4.22: Comparación de series de tiempo de temperatura entre el OpenCTD del punto P y el YSI en superficie en el Punto A

En la Figura 4.23 Se gráfica la regresión lineal de los sensores utilizando como referencia la temperatura medida por el YSI. Se observa que los sensores de temperatura presentan un desfase horizontal, pero una pendiente similar a 1, por lo que su respuesta mejoró respecto de los problemas observados en Aconcagua, ya que no existieron los defectos de manufactura de ese momento.

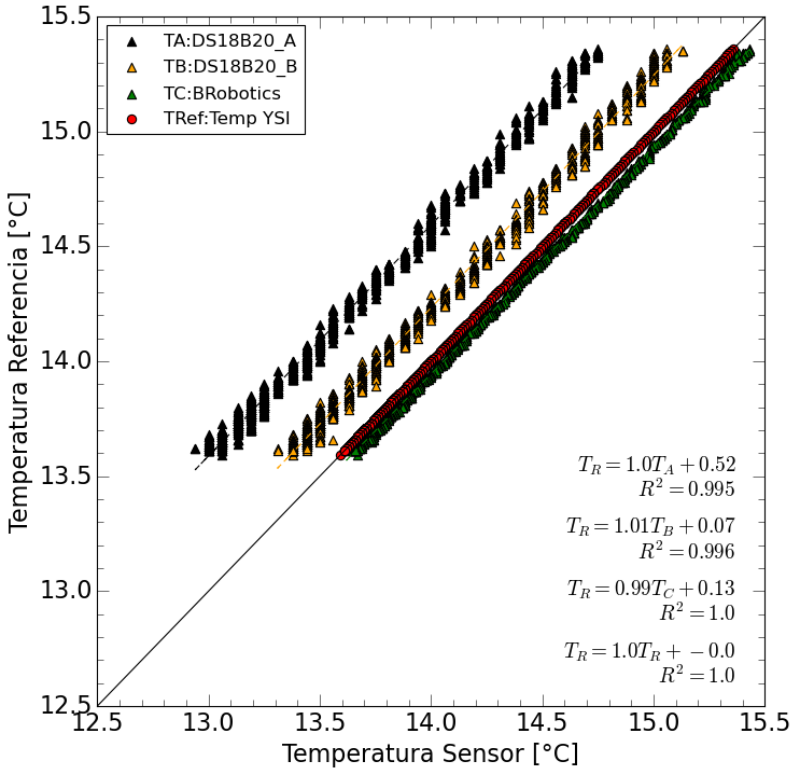


Figura 4.23: Temperaturas sin aplicar coeficientes de calibración

Al aplicar los coeficientes de calibración obtenidos del ensayo en laboratorio, el gráfico queda como el mostrado en la Figura 4.24 donde se observa la mejora de la respuesta del sensor A y el B, pero un desfase en el sensor C.

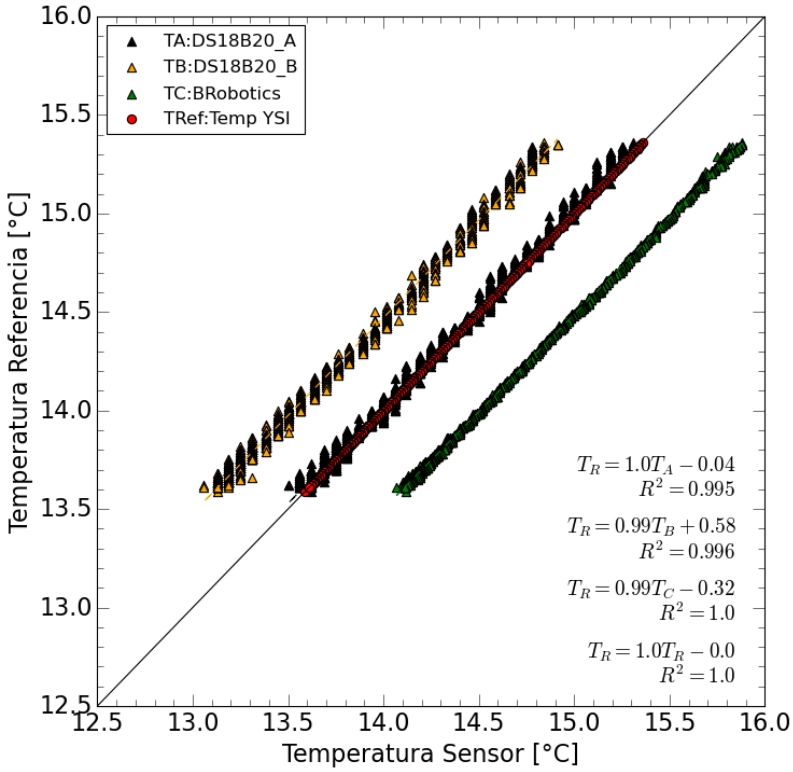


Figura 4.24: Temperaturas con coeficientes de calibración de laboratorio

Debido al desfase obtenido con los coeficientes de calibración de laboratorio, se propone utilizar los datos obtenidos de la muestra del Río Maipo como calibración. En la Figura 4.25 se presenta el gráfico corregido con los coeficientes de calibración del Río Maipo, donde se obtiene un $\mathrm{RMSE} = 0{,}08$ en el sensor A, un $\mathrm{RMSE} = 0{,}12$ en el sensor B y un un $\mathrm{RMSE} = 0{,}05$ en el sensor C. Indicando que el sensor de BlueRobotics se tiene una mejor respuesta que los sensores DS18B20.

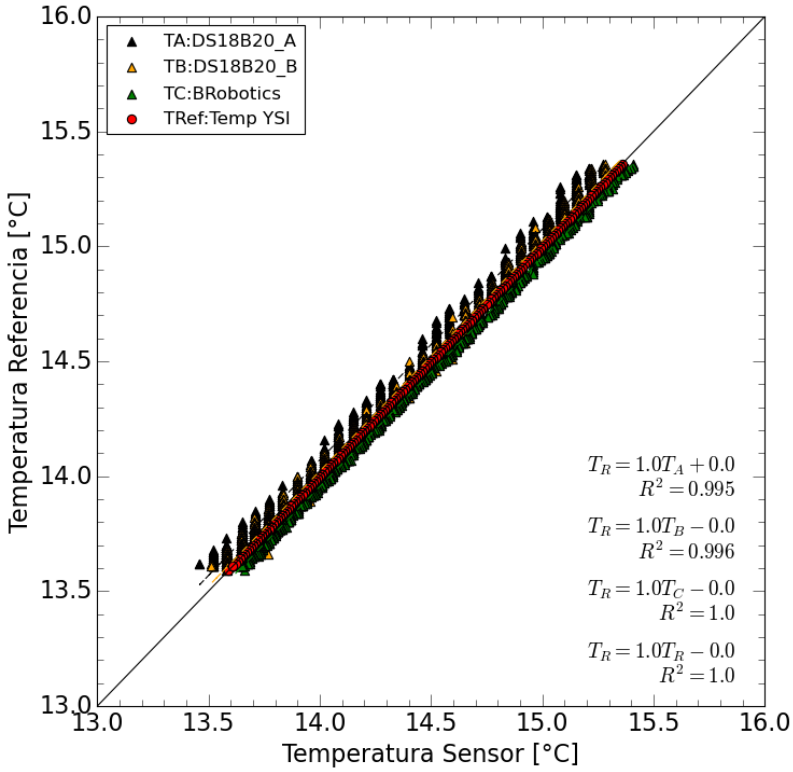


Figura 4.25: Temperaturas con coeficientes de calibración de laboratorio

Capítulo 5

Resultados

5.1. Análisis de Salinidad y Densidad en la campaña del Río Maipo

Para calcular la salinidad se aplicó la formula definida en TEOS-2010 (Mcdougall et al., 2010), que por medio de los valores de conductividad, temperatura y presión, se determina la salinidad práctica del agua. Dichos valores se representan en la Figura 5.1 para los instrumentos YSI que midieron en el punto A y también el OpenCTD que midió en el punto P. De la figura se puede apreciar los momentos donde ingresa agua salada al estuario (en periodos de marea alta), llegando a valores máximos de $33{,}5[\mathrm{PSU}]$ en superficie y en el fondo de $30[\mathrm{PSU}]$ medido por los YSI, mientras que el OpenCTD registró valores de salinidad en el orden de $27[\mathrm{PSU}]$ en superficie ($113[\mathrm{m}]$ aguas arriba de los instrumentos YSI). Por lo que puede ser un indicativo de una medición menor del sensor de conductividad Atlas Scientific respecto de los YSI.

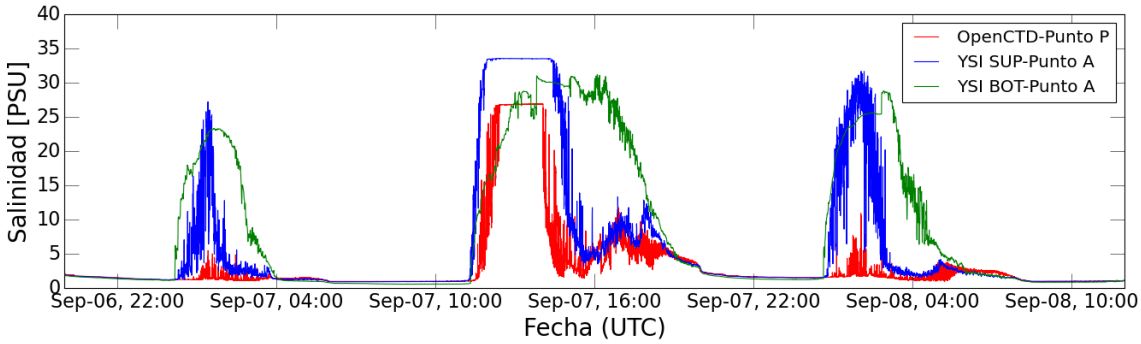


Figura 5.1: Comparación de series de tiempo de salinidad entre el OpenCTD del punto P y los YSI en superficie y profundidad en el Punto A

Sin embargo, no es común que la salinidad en superficie sea mayor que en el fondo del río como indican los YSI el día 07/09/2021 en la Figura 5.1. Por tal motivo, en la Figura 5.2 se comparan los valores de salinidad obtenidos en el punto A y P, con 4 perfiles realizados con un instrumento CastAway en el punto P ($113[\mathrm{m}]$ aguas arriba de los instrumentos YSI) el día 07/09/2021, para tener una referencia de lo que sucede a lo largo de la columna de agua. Se puede apreciar lo siguiente:

- Aumento de salinidad en profundidad, llegando hasta un valor $33[\mathrm{PSU}]$ a los $2[\mathrm{m}]$ de profundidad, que es menor al rango de $16 - 27[\mathrm{PSU}]$ que marca el YSI en profundidad a los $3[\mathrm{m}]$ de profundidad, lo que indica que posiblemente el sensor de dicho instrumento haya tenido problemas en la medición.
- El sensor YSI en superficie mide aproximadamente $33[\mathrm{PSU}]$ a una profundidad de $1{,}25[\mathrm{m}]$, mientras que el CastAway mide entre $25 - 33[\mathrm{PSU}]$ a esa profundidad, sin embargo esto se puede explicar ya que el YSI en superficie se encuentra mas cerca de la boca del estuario que el CastAway, por lo que se espera encontrar agua salada en capas mas superficiales.
- El OpenCTD mide $25[\mathrm{PSU}]$ aproximadamente a los $0{,}50[\mathrm{m}]$ de profundidad, mientras que el CastAway mide entre $7 - 12[\mathrm{PSU}]$ a esa profundidad, esta diferencia puede deberse a que en el sensor de conductividad del OpenCTD hayan existido residuos que se hayan atascado en los electrodos del sensor, generando variación en la medición.

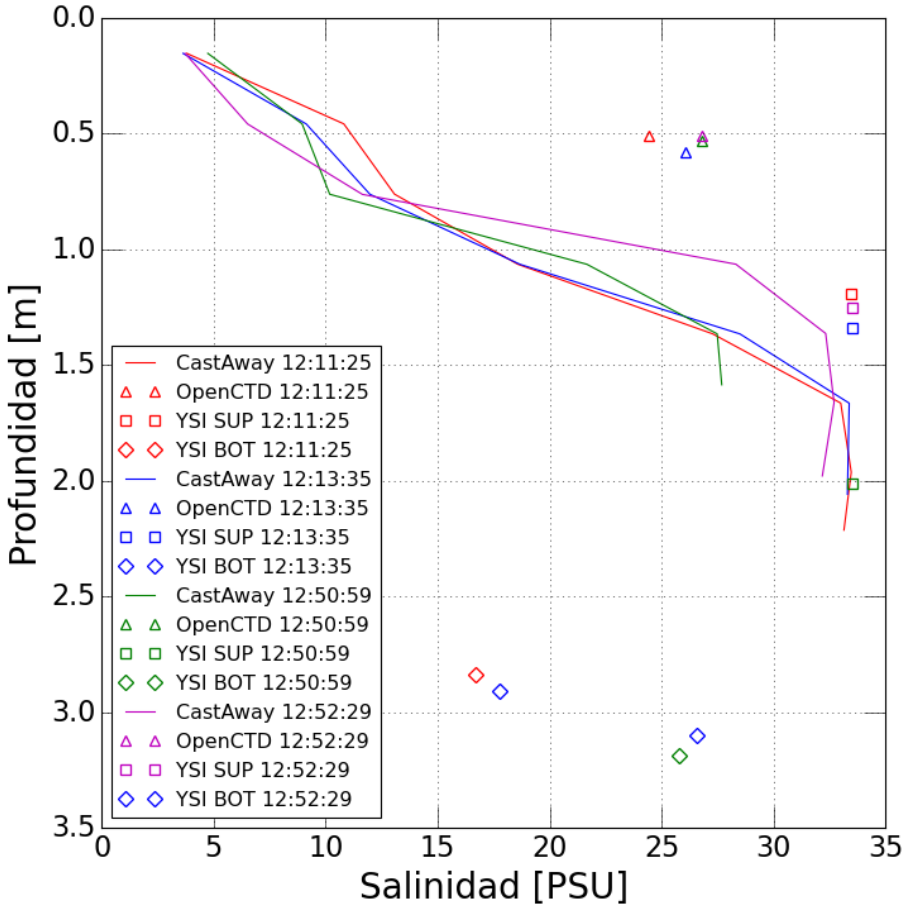


Figura 5.2: Comparación de perfiles del CastAway en punto P, con valores de salinidad obtenidos los YSI en el punto A y el OpenCTD en punto P para el día 07/09/2021, en las horas 12:11:25-12:13:35-12:50:59-12:52:29 en UTC

En el caso de la densidad, esta se puede determinar aplicando la fórmula de estado de UNESCO que permite calcular la densidad por medio de la temperatura y salinidad. En la Figura 5.3 se presentan los valores de densidad obtenidos durante la campaña, indicando la presencia de agua dulce con $\rho = 1000[\mathrm{kg/m^3}]$ en marea baja y que cuando ingresa el agua salada por la marea alta, la densidad aumenta a $\rho = 1025[\mathrm{kg/m^3}]$ en superficie y a $\rho = 1023[\mathrm{kg/m^3}]$ en profundidad medidos por los YSI, mientras que el OpenCTD registra una densidad de $\rho = 1020[\mathrm{kg/m^3}]$ en superficie debido a la influencia de agua dulce del río como se vio en los perfiles CastAway en la Figura 5.2. Por lo tanto se puede inferir que existe influencia del río en el punto P, pero al llegar al punto A mas cercano a la boca del estuario se tiene una densidad igual a la del océano ($\rho = 1025[\mathrm{kg/m^3}]$) indicando que

los sensores están midiendo solamente agua salada.

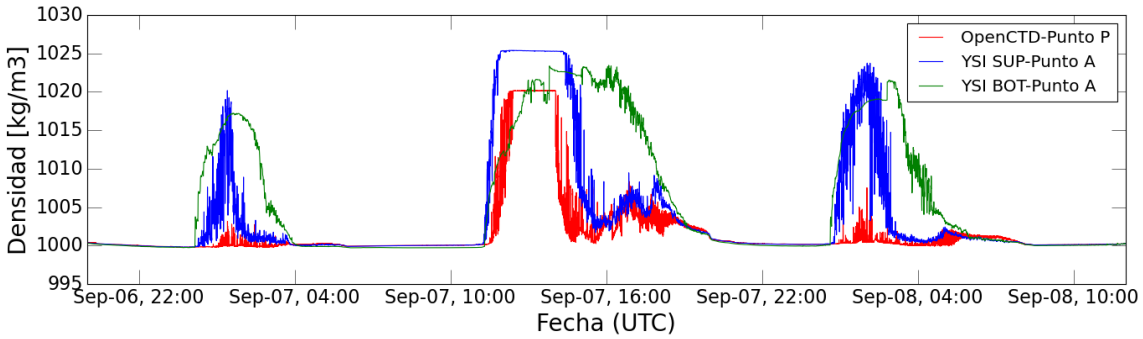


Figura 5.3: Comparación de series de tiempo de densidad entre el OpenCTD del punto P y el YSI en superficie y profundidad en el punto A

5.2. Sensores de Temperatura

En la Tabla 5.1 se presenta un resumen de los coeficientes de calibración obtenidos para cada ensayo realizado, incorporando el RMSE y R^2 asociado. Donde el Ensayo 1 corresponde a las mediciones obtenidas en laboratorio, el Ensayo 2 son las mediciones obtenidas en el Río Aconcagua y el Ensayo 3 las mediciones en el Río Maipo . Se aplico cada par de coeficientes, a las mediciones de los ensayos. Obteniendo que el coeficiente con menor error corresponde al obtenido en el Río Maipo.

ID Ensayo	ID Sensor	α	β	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
				$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2
Ensayo 1	TA: DS18B20 A	1.00	0.56	0.21	0.99	0.05	0.76	0.05	0.99
	TB: DS18B20 B	1.02	-0.52	0.59	0.99	0.28	0.57	0.47	0.99
	TC: BlueRobotics	0.97	0.45	0.19	0.99	0.20	0.91	0.08	0.99
Ensayo 2	TA: DS18B20 A	0.74	3.77	4.68	0.99	0.05	0.75	0.40	0.99
	TB: DS18B20 B	0.80	2.51	3.64	0.99	0.07	0.57	0.54	0.99
	TC: BlueRobotics	0.91	1.02	1.40	0.99	0.02	0.91	0.21	0.99
Ensayo 3	TA: DS18B20 A	1.00	0.52	0.24	0.99	0.08	0.75	0.08	0.99
	TB: DS18B20 B	1.01	0.07	0.40	0.99	0.19	0.57	0.04	0.99
	TC: BlueRobotics	0.99	0.13	0.24	0.99	0.14	0.91	0.05	0.99

Tabla 5.1: Resumen de coeficientes de calibración de los ensayos realizados, junto con el RMSE y R^2 con respecto a cada ensayo

5.3. Sensores de Conductividad

Dado que los resultados obtenidos en el Río Maipo, no fueron concluyentes respecto del funcionamiento del sensor de conductividad del OpenCTD, se realizó otro ensayo en laboratorio en conjunto con un instrumento Solinst y un RBR, para determinar el funcionamiento del OpenCTD. En el ensayo, se utilizó un estanque con agua y por intervalos de tiempo se fue ingresando una cantidad de agua, realizando una mezcla esperando y registrando la medición una vez el agua se estabilizara.

En la Tabla 5.2 se presenta un resumen del desempeño de los instrumentos OpenCTD, Solinst y RBR para los distintos ensayos. En el Ensayo 1 se consideraron soluciones con valores estandarizados (Realizado en el apartado de calibración). Mostrando que el OpenCTD tiene un mayor error que los instrumentos comerciales. Mientras que en el Ensayo 2, se utiliza como referencia los datos del RBR. Disminuye el error.

ID Sensor	Ensayo 1		Ensayo 2	
	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2
OpenCTD	5563.31	0.99	3124.98	0.99
RBR Concerto3	623.52	0.99	0	1
Solinst	1270.68	0.99	4289.6	0.99

Tabla 5.2: Resumen de los RMSE y R^2 obtenidos en cada ensayo

En la figura 5.4, se presenta las regresiones del Ensayo 2, donde se aprecia que el OpenCTD tiene un comportamiento similar al Solinst.

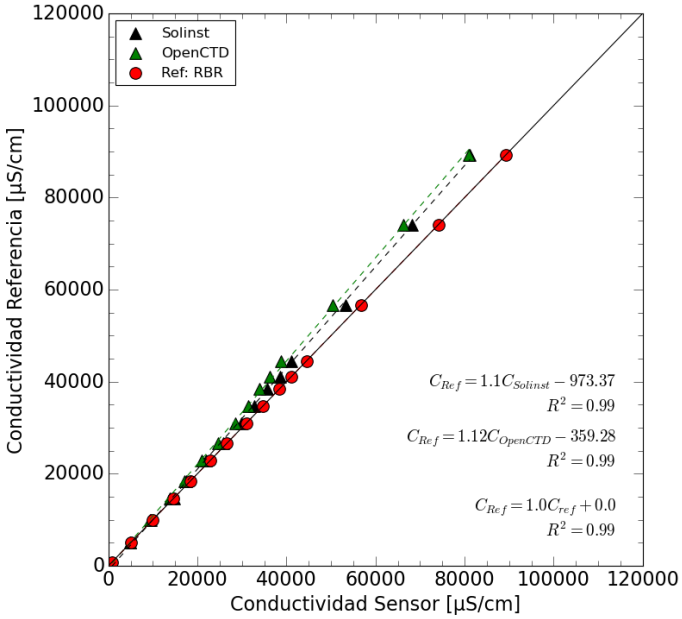


Figura 5.4: Regresiones lineales ensayo 2

5.4. Análisis de costos

La construcción del OpenCTD llega a un valor aproximado 332.000 pesos chilenos en materiales y sensores (416 dólares estadounidenses), lo cual es bastante menos costoso que un CTD de gama alta como el CastAway, donde su precio esta en el orden de los 6.000 Dolares Estadounidenses (4.750.000 pesos chilenos), por lo que el OpenCTD, si

bien, no logra mediciones idénticas a los modelos comerciales, logra obtener parámetros generales del comportamiento físico del estuario. Además al ser un proyecto “Open Source” aun esta abierto a la mejora de los interesados en desarrollar el proyecto y probar su funcionamiento con nuevos sensores disponibles.

El Open Wave Height Logger, en materiales terminó costando aproximadamente 49.000 pesos chilenos (62 dólares estadounidenses), además presentando una mejora en la cantidad de información medida con respecto al HOBO, ya que permite medir a una frecuencia de muestreo mayor. Un HOBO vale aproximadamente 330 dólares estadounidenses (262.000 pesos chilenos), por lo que hay una importante reducción de costo respecto del modelo comercial.

En el Anexo A.3 se presenta el detalle de los materiales utilizados en la construcción.

Capítulo 6

Discusión

Los sensores implementados en los instrumentos presentan una buena respuesta para medir los fenómenos físicos que suceden en el estuario. Sin embargo existen algunas situaciones que se deben tener en cuenta:

- Los sensores de temperatura DS18B20 registran las variaciones de manera adecuada, pero no el valor preciso, sin embargo es posible que implementando procedimiento de calibración previo a cada campaña de terreno, se pueda determinar los factores de corrección adecuados para dicha campaña.
- El sensor TSYS01 de la marca Bluerobotics, presenta mayor precisión y estabilidad en su respuesta, por lo que una calibración de verificación previa a la campaña de terreno es adecuada.
- La respuesta del sensor de conductividad de Atlas Scientific, para valores altos de conductividad tiende a medir menos que los instrumentos comerciales de mayor costo como el YSI, esto puede afectar los valores obtenidos en situaciones de marea alta donde el ingreso de agua salada es mayor y se debe tener en cuenta. Sin embargo el procedimiento de calibración de conductividad es bastante sensible a las condiciones de laboratorio, ya que las soluciones estandarizadas varían con la temperatura a la que se encuentren, por lo que se debe tener una medición confiable de la temperatura para determinar el valor correcto de conductividad del estándar y ello puede generar las diferencias en el desempeño del sensor de conductividad en su calibración.

- El sensor de presión MS5803 tiene una buena respuesta y su bajo tiempo de respuesta genera que se puedan tener una frecuencia de muestreo de $4[\mathrm{hz}]$, que es adecuado para medir los cambios de la marea.
- Con el fin de mejorar los resultados obtenidos por los sensores, se deben realizar mantenciones después de ser utilizados, en general, estas consideran la limpieza de los sensores, ya que al estar expuestos al agua salada, los minerales contenidos en ella se endurecen e interfieren en el correcto funcionamiento de los sensores, como seria el caso de los electrodos del sensor de conductividad y la transferencia térmica por conductividad en el sensor de temperatura. Además se debe considerar la verificaciones de las uniones adhesivas, para que no existan filtraciones. En el Anexo A.2 se presentan recomendaciones para el mantenimiento de la instrumentación.

Capítulo 7

Conclusión

El principal objetivo de la presente memoria consistía en construir y demostrar la funcionalidad de instrumentos de medición de bajo costo en las costas chilenas. Para este efecto se realizaron diversas pruebas de calibración y funcionamiento en laboratorio, además de incluir dos campañas de terreno para poder evaluar su desempeño frente a un fenómeno físico real y su respuesta comparándolos con instrumentos comerciales.

Luego de los ensayos realizados se pudo concluir que los instrumentos construidos sirven para realizar mediciones en estuarios chilenos. En particular el OpenCTD tiene buena respuesta para medir los cambios en los parámetros de temperatura, salinidad y presión, debido a los cambios de marea e ingresos de agua salada al estuario. Es útil como instrumento ”estático” más que como perfilador, esto se debe al límite para la frecuencia de muestreo para los sensores de conductividad y temperatura es de $1[\mathrm{Hz}]$. Respecto del OWHL, funciona de manera adecuada para medir los cambios de presión debido a la marea, entregando valores semejantes a los de un HOBO.

Como uno de los objetivos específicos de la memoria, se encuentra la adaptación de materiales para la construcción de los instrumentos considerando lo disponible en Chile. En particular en el mercado chileno se encuentran la mayoría de materiales para la construcción de contenedores y la fabricación de piezas 3D. Por el lado de los adhesivos utilizados, los utilizados en los proyectos originales no se encontraron en Chile, por lo que se debió analizar las características de los adhesivos disponibles, los cuales presentaron un buen desempeño, en especial la resina epóxica de baja viscosidad, que permite sellar las imperfecciones y presenta una buena adhesión en el PVC y el PLA (Material de la

impresión 3D). Respecto de las tapas realizadas para sujetar los sensores, la impresión 3D es una buena opción ya que permite diseñar la pieza adecuada, sin embargo se debe tener en cuenta que esta presenta porosidades, por lo que el agua pasa a través de ella y se debe tener en consideración sellarla con resina epóxica.

Respecto a la materialidad de los contenedores, se concluye que el PVC hidráulico, tiene una buena respuesta para el estudio en ambientes estuarinos, ya que posee una buena resistencia mecánica y buena resistencia a la corrosión, en comparación de materiales más resistentes como el acero, es más económico y fácil de adquirir en los comercios locales. Para poder abrir el contenedor se utilizó una unión americana de PVC, la cual cuenta con un sello hidráulico por medio de un ”o-ring” para evitar las filtraciones, sin embargo esta no entrega la confiabilidad necesaria, ya que en experiencias realizadas en laboratorio existieron filtraciones y se tuvo que tener especial cuidado en el grado de cierre de la unión, aunque esto no sucedió en experiencias en terreno debido a que se utilizaron adhesivos exteriores de tipo cinta, para evitar las filtraciones, es uno de los puntos que se puede mejorar respecto de la instrumentación desarrollada y se describe en el apartado de Recomendaciones en el Anexo A.1.

Por el lado de costos, la construcción del OpenCTD llega a un valor aproximado 332.000 pesos chilenos en materiales (416 dólares estadounidenses), lo cual es bastante menos costoso que un CTD de gama alta como el CastAway, donde su precio esta en el orden de los 6.000 dólares estadounidenses (4.750.000 pesos chilenos), por lo que el OpenCTD, si bien, no logra mediciones idénticas a los modelos comerciales, se asemeja bastante para obtener parámetros generales del comportamiento físico del estuario.

El Open Wave Height Logger, en materiales terminó costando aproximadamente 49.000 pesos chilenos (62 dolares estadounidenses), además presentando una mejora en la cantidad de información medida con respecto al HOBO, ya que permite medir a una frecuencia de muestreo mayor. Un HOBO vale aproximadamente 330 dólares estadounidenses (262.000 pesos chilenos), por lo que hay una importante reducción de costo respecto del modelo comercial.

Esta instrumentación al mantenerse en un costo bajo, permite que se pueda contar con mayor número de equipos en el estuario, teniendo mayor cantidad de puntos de control, lo que genera la posibilidad de un estudio de mayor extensión. En el Anexo A.3 se presenta el detalle de los materiales utilizados en la construcción.

Respecto del funcionamiento de los sensores aplicados se puede concluir que

el sensor de temperatura DS18B20 presenta un buen desempeño para medir las variaciones de temperatura, pero presentan desfases en comparación a la temperatura real. Por lo que se sugiere aplicar procedimientos de calibración previo a cada campaña de medición, la ventaja del sensor es su bajo costo en el mercado, por lo que pueden ser usados de manera masiva para tener una idea general de la temperatura de un estuario, pero para medir en lugares donde se requiera precisión estos no serían los adecuados. Para situaciones que se requiera aumentar la precisión y estabilidad de la respuesta, el sensor TSYS01 de la Marca Bluerobotics es adecuada, ya que responde de manera similar a los sensores incorporados en instrumentación comercial.

La conductividad medida por el sensor de Atlas Scientific, es dependiente de la calibración, puede tener una respuesta similar a un instrumento como Solinst, pero no como RBR (además utilizan una tecnología diferente), pero tiene potencial de mejora al realizar procedimientos de calibración en ambientes de mayor control.

El sensor de presión MS5803 tiene una buena respuesta de frente a los instrumentos comerciales, además tiene un tiempo de respuesta mayor, que permite tener una frecuencia de muestreo de $4[\mathrm{hz}]$, bastante adecuada para registrar los cambios de marea.

Se puede apreciar la importancia de la calibración de los sensores, ya que al ser de bajo costo, pueden presentar fluctuaciones dependiendo del fabricante que desarrolle el sensor. En el apartado de calibración se definieron los métodos aplicados en los sensores, sin embargo en el Anexo A.1.3 se presentan recomendaciones para la calibración de sensores, donde se indican mejoras para aplicar en los procedimientos de medición de temperatura y conductividad. No se incluyen mejoras para la medición del sensor de presión, ya que no se consideraron necesarias.

Se debe realizar mantención a los instrumentos, especial para limpiar los sensores que se exponen al agua salada, esta limpieza es importante ya que afecta al funcionamiento correcto de los sensores, como el de conductividad, que si presenta suciedad en el área donde están los electrodos, pueden medir erróneamente la conductividad. Se debe verificar las uniones herméticas de los elementos del contenedor en especial donde se ubican uniones realizadas con adhesivos. En el Anexo A.2 se presentan recomendaciones para el mantenimiento de la instrumentación.

Por último, las mediciones realizadas en terreno, en particular en el Río Maipo que fue la experiencia mas extensa realizada en un estuario donde se presentaron

gradientes fuertes de salinidad, los instrumentos desarrollados responden de manera correcta al fenómeno físico, presentando niveles de temperatura, salinidad y densidad coincidentes con los ingresos de agua salada con los cambios de la marea. Sin embargo el funcionamiento de los instrumentos puede ser mejorado al establecer procedimientos de calibración y mantención más rigurosos con condiciones de mayor control. Una importante desventaja que presentan esta relacionada con la frecuencia de muestreo de los sensores de temperatura y conductividad, ya que por la tecnología que emplean, no pueden ser utilizados con frecuencias de muestreo mayores a $1[\mathrm{Hz}]$ por el tiempo respuesta de los sensores a los cambios.

Apéndice A

Anexos

A.1. Recomendaciones

A.1.1. Cierre hermético del contenedor

Para acceder al contenedor de PVC del proyecto se utilizó una unión americana de PVC que contiene un sello hidráulico por medio de un “O-Ring” para evitar las filtraciones. Sin embargo en los experimentos realizados en laboratorio existieron filtraciones, por lo que este tipo de cierre no otorga la confiabilidad necesaria. Como solución para este problema se recomienda utilizar tapones de prueba que cuentan con una goma expansiva (Figura A.1), estos se deben utilizar en el extremo de la tubería y por medio de un perno con tuerca mariposa que al girar, comprime la goma verticalmente generando que esta se expanda en la dirección radial, esta expansión es la que genera un cierre hermético.



Figura A.1: Tapon de prueba con goma expansiva

Fuente: Imagen del Sitio web https://www.oatey.com

El problema que tienen los tapones de prueba mencionados, es que no se encuentran en comercios locales, por lo que deben ser importados desde el extranjero.

A.1.2. Cuidados con la humedad

Al interior de los instrumentos construidos se encuentran componentes electrónicos para su funcionamiento, baterías y una tarjeta MicroSD para respaldar la información medida. Para acceder a dichos componentes, el instrumento se debe abrir por medio de la Unión Americana, sin embargo se debe tener cuidado con la condensación que se pueda provocar al abrir y cerrar el instrumento. Esto se debe a que en ambientes cálidos, el aire caliente queda atrapado al interior del contenedor y al momento de sumergirse en el agua fría de ríos u océano, puede provocarse la condensación, generando humedad al interior del contenedor siendo este perjudicial para los componentes electrónicos en funcionamiento. Como medida para mitigar este problema, se pueden utilizar bolsas con gel de silica (Figura A.2) que permiten la absorción de la humedad utilizando poco espacio al interior del contenedor.



Figura A.2: Bolsas de Gel de Silica

Fuente: https://silicagel.cl

A.1.3. Recomendaciones para calibración de sensores

A.1.3.1. Sensor de Temperatura

El sensor de temperatura DS18B20 presentó un buen desempeño para medir variaciones de temperatura, pero esta generalmente se encuentra desfasada con respecto a la real. Se recomienda que se realice calibraciones durante cada campaña de terreno utilizando un instrumento comercial o un sensor de temperatura de mayor confianza, de la siguiente forma:

- Calibración previa a la instalación del instrumento, comparando con instrumento comercial, medir por lo menos 3 puntos de temperatura, con el fin de detectar si el sensor posee algún desfase con el instrumento comercial o también un cambio de pendiente.
- Al momento de la instalación tomar un punto inicial con el instrumento comercial para determinar el desfase.

El sensor de temperatura TSYS01, presenta un buen comportamiento desde fábrica, sin embargo se sugiere realizar verificaciones con instrumentos comerciales si es que se poseen, para corroborar la medición del sensor.

A.1.3.2. Sensor de Conductividad

Para calibrar el sensor de conductividad, se suelen usar estándares de conductividad, que son soluciones con un valor de conductividad específico. Sin embargo estas poseen algunas desventajas:

- Alto costo.
- Formato generalmente menor a 1 Litro de solución, por lo que la cantidad de solución no es suficiente para algunos instrumentos que tienen mayor volumen de contenedor.
- El valor de conductividad es sensible a la temperatura, por lo que se debe tener un control preciso de la temperatura de la solución.

A modo de recomendación si se dispone de un instrumento comercial que mida conductividad, utilizar un pequeño estanque de agua e ir vertiendo sal común en ella, registrar medición y comparar los valores obtenidos, con el fin de generar una calibración.

A.1.4. Selección de MicroSD

Los instrumentos utilizan una tarjeta MicroSD para respaldar la información obtenida de las mediciones, sin embargo, el tipo de tarjeta influye directamente en el consumo de corriente del instrumento, siendo un factor importante en la duración de baterías. En la Figura A.3 se presenta el consumo de corriente de un instrumento OWHL en 1 segundo usando una tarjeta MicroSD sin marca antigua en comparación con una tarjeta MicroSD de marca Maxell actual. Se puede notar los 4 peak de corriente, ya que el instrumento mide a $4[\mathrm{Hz}]$ de frecuencia y corresponde al momento en que la medición es guardada en la tarjeta de memoria, además se presenta un consumo base mayor en la tarjeta genérica en comparación con la Maxell, es por este motivo que se debe optar por tarjetas de buena calidad, con marcas conocidas ya que son más eficientes energéticamente. En este caso el instrumento tiene un consumo base de 15[mA] con tarjeta genérica, mientras que con la tarjeta Maxell tiene un consumo base de $2[\mathrm{mA}]$, esta diferencia indica que una tarjeta de buena calidad puede mejorar drásticamente la duración de la batería, siendo en este caso de 7.5 veces más que una genérica.

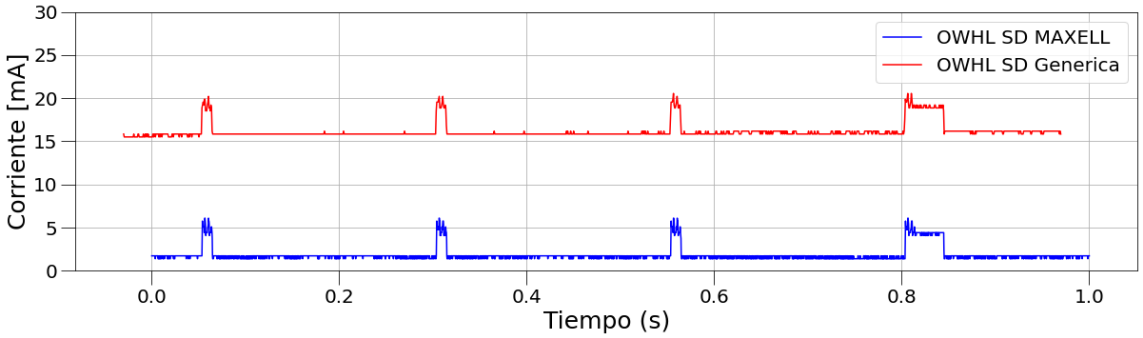


Figura A.3: Comparación de consumo de corriente para un OWHL con una tarjeta MicroSD genérica y una tarjeta MicroSD marca Maxell

Fuente: Elaboración propia

A.2. Mantenimiento

A.2.1. Sonda de conductividad

La sonda de conductividad por estar expuesta al agua salada para realizar las mediciones, puede generar acumulaciones de sales. Si esta acumulación es blanda, se sugiere limpiar el sensor con un cepillo de dureza media en conjunto con agua destilada. En el caso de que la acumulacion de mineral se endurezca, se recomienda utilizar una solución que combine y ácido clorhídrico en un $5\,\%$. La marca Atlas Scientific, vende el limpiador que es el adecuado para la sonda de conductividad que venden (Figura A.4).

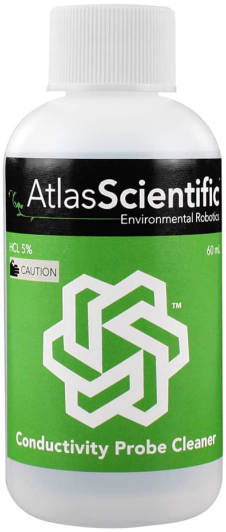


Figura A.4: Limpiador para sondas de conductividad Atlas Scientific

Fuente: Imagen del sitio web https://atlas-scientific.com

Se sugiere limpiar la sonda antes y después de cada campaña de medición, para mantener su vida útil.

A.2.2. Sensor de temperatura

Tanto el sensor DS18B20 como el TSYS01 cuenta con una protección metálica, en el caso del DS18B20 es de acero inoxidable, mientras que en el TSYS01 es de aluminio,

estas cumplen la función de proteger al componente electrónico que mide, de distintos golpes. Es importante mantener limpios los sensores, teniendo cuidado, de que los recubrimientos que protegen los componentes electrónicos estén libres de sales y no tengan aberturas, que puedan dañar el interior del sensor.

A.2.3. Sensor de presión

El sensor MS5803 cuenta con un recubrimiento de gel que protege los componentes electrónicos del sensor, es necesario verificar el estado de este recubrimiento y verificar que no se encuentre dañado, en caso de estar de encontrarse con residuos, limpiar el sensor bajo la llave de agua sin tocar directamente con otros elementos la membrana.

A.2.4. Adhesivos en uniones

Verificar los adhesivos en las uniones, ya que son los que se encuentran expuestos en mayor medida al agua salada u otros agentes. Identificar que la superficie del adhesivo se encuentre uniforme y no contenga perforaciones o grietas, que puedan infiltrar agua al interior del contenedor. Se puede incorporar una capa de adhesivo epóxico, para sellar en caso de ser necesario u otro de características similares.

A.3. Costos

Los costos de cada componente corresponden a valores cotizados durante el año 2020.

A.3.1. OpenCTD

Unidad de control principal

Item	Cantidad	Dólares	Peso Chileno
Adafruit Feather M0 Adalogger	1	19.95	15920
Adafruit Stacking Header	1	1.25	998
Adafruit DS3231 Precision RTC FeatherWing	1	13.95	11132
CR1632 3V Coin Cell Battery*	1	1.25	1000
MS5803-14BA Pressure Sensor Breakout	1	59.95	47840
DS18B20 Temperature Sensor in Stainless Steel Housing*	2	4.76	3800
Celsius Fast-Response, ±0.1℃ Temperature Sensor (I2C)	1	60.00	47880
Atlas Scientific Conductivity Circuit	1	61.99	49468
Atlas Scientific Conductivity Probe	1	111.99	89368
SanDisk MicroSD Memory Card*	1	6.27	5000
Lithium Ion Battery Pack 3.7V 6000 mAh*	1	43.86	35000
Adafruit Perma-Proto Small Mint Tin Size Breadboard PCB	1	4.50	3591
Right Angle Female PCB Header	1	4.95	3950
	TOTAL	394.67	314947

Contenedor

Item	Cantidad	Dólares	Peso Chileno
PVC PN-10 75mm (40cm)*	1	2.26	1800
Union Americana PVC Cementar 75mm*	1	10.73	8562
Tapa Gorro PVC-P CEM 75mm*	1	7.98	6370
	TOTAL	20.97	16732

Valor total de instrumentación

TOTAL EN PESO CHILENO	**331679**
TOTAL EN DÓLARES	**416**

A.3.2. Open Wave Height Logger

CPU PCB

Item	Cantidad	Dólares	Peso Chileno
Resistor, surface-mount, 1k ohm, 1/8watt, 5 % for SMD Piezo buzzer	2	0.20	160
Resistor, surface-mount 0805, 10k ohm, 1/8 watt 5 %	4	0.40	319
magnetic reed switch, surface mount	1	0.95	758
Transistor (BJT) - NPN, for piezo buzzer, SOT-23-3 package	1	1.18	942
3V piezo buzzer - SMD	1	1.18	942
6-pin ISP header (3x2 layout)	1	0.54	431
AVR ATMEGA328P-AU 32 PIN TQFP surface mount	1	2.43	1939
DS3231SN Real Time Clock 16SOIC-Wide	1	8.82	7038
CR1220 Battery holder, surface-mount	1	0.60	479
Capacitor, surface mount 0805 0.1uF 10V ceramic	4	1.44	1149
Female wire wrap headers (long-tail stacking headers for CPU + POWER discs) 10mm tail length	3	4.14	3304
	TOTAL	**21.88**	**17460**

POWER PCB

Item	Cantidad	Dólares	Peso Chileno
RED LED, surface mount 0805, 1.8V forward voltage	1	0.28	223
GREEN LED, surface mount 0805, 2.1V	1	0.28	223
Capacitor, surface mount 1uF 35V, electrolytic, Panasonic FC series, size code B	2	0.76	606
Capacitor, 22µF Tanatalum polarized 0805	1	0.48	383
Resistor, surface-mount, 510 ohm, 1/8watt, 5 %	2	0.20	160
Resistor, surface-mount, 100k ohm 1/8watt 5 % for SD card pull ups	2	0.20	160
JST PH series vertical 2-pin male header, SMD, 2mm spacing	1	0.50	399
MCP1700T-3002E/TT 3.0V Regulator Surface-mount SOT-23-3	1	0.39	311
pushbutton, surface-mount	2	1.54	1229
MicroSD card slot, reverse mount	1	3.16	2522
Female wire wrap headers (long-tail stacking headers for CPU + POWER discs) 10mm tail length	3	4.14	3304
JST PH series 2-pin female connector, 2mm spacing	1	0.10	80
JST PH series crimp-on terminal for female connector housing, 24-30 AWG	6	0.06	48
	TOTAL	**12.09**	**9648**

MS5803-PCB

Item	Cantidad	Dólares	Peso Chileno
Female header (short tail for MS5803 disc)	3	1.56	1245
MS5803-14BA pressure sensor	1	16.72	13343
Capacitor, surface mount 0805 0.1uF 10V ceramic	1	0.36	287
	TOTAL	**18.64**	**14875**

Contenedor

Item	Cantidad	Dólares	Peso Chileno
PVC PN-10 50mm (30cm)*	1	0.70	560
Union Americana PVC Cementar 50mm*	1	6.60	5270
Tapa Gorro PVC-P CEM 50mm*	1	1.57	1250
	TOTAL	**8.87**	**7080**

Valor total de la instrumentación

TOTAL EN DÓLARES	**61.48**
TOTAL EN PESO CHILENO	**49062**

A.4. Fotos de instrumentos construidos

A.4.1. OpenCTD



Figura A.5: OpenCTD

Fuente: Elaboración propia



Figura A.6: Sensores del OpenCTD

Fuente: Elaboración propia



Figura A.7: Partes e interior del OpenCTD

Fuente: Elaboración propia

A.4.2. Open Wave Height Logger



Figura A.8: OWHL

Fuente: Elaboración propia



Figura A.9: Partes del OWHL

Fuente: Elaboración propia



Figura A.10: Sensor de presión OWHL

Fuente: Elaboración propia



Figura A.11: Circuito interno OWHL

Fuente: Elaboración propia

Referencias

Apablaza, P. and Palma, S. (2006). Efecto de la zona de mínimo oxígeno sobre la migración vertical de zooplancton gelatinoso en la bahía de mejillones. *Investigaciones Marinas*, 34(2):81–95.

Artero, Ó. T. (2013). *Arduino. Curso práctico de formación*. RC libros.

Auråen, J. (2019). Low-cost ctd instrument-arduino based ctd for autonomous measurement platform. Master's thesis, Department of Physics, University of Oslo.

Farías, L., Fernández, C., Garreaud, R., Guzmán, L., Hormazábal, S., Morales, C., Narváez, D., Pantoja, S., Pérez, I., Soto Y, D., and Winckler, P. (2019). Propuesta de un sistema integrado de observación del océano chileno (SIOOC). santiago: Comité científico COP25. *Tecnología*.

Fischer, H. B., List, J. E., Koh, C. R., Imberger, J., and Brooks, N. H. (1979). *Mixing in inland and Coastal Waters*. Academic press.

Geyer, W. R. (1993). The importance of suppression of turbulence by stratification on the estuarine turbidity maximum. *Estuaries*, 16(1):113–125.

Harley, C. D. G., Hughes, A. R., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J. B., Thornber, C. S., Rodriguez, L. F., Tomanek, L., and Williams, S. L. (2006). The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology letters*, 9 2:228–41.

Lyman, T. P., Elsmore, K., Gaylord, B., Byrnes, J. E., and Miller, L. P. (2020). Open wave height logger: An open source pressure sensor data logger for wave measurement. *Limnology and Oceanography: Methods*, 18(7):335–345.

Mcdougall, T., Feistel, R., Millero, F., Jackett, D. R., Wright, D., King, B., Marion, G., Chen, C.-T. A., and Spitzer, P. (2010). *The International Thermodynamic Equation of Seawater 2010 (TEOS-10): Calculation and Use of Thermodynamic Properties*.

Méndez-Barroso, L., Rivas-Márquez, J., Sosa-Tinoco, I., and Robles-Morúa, A. (2020). Design and implementation of a low-cost multiparameter probe to evaluate the temporal variations of water quality conditions on an estuarine lagoon system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11):1–18.

Miranda, L. B., Andutta, F. P., Kjerfve, B., and de Castro Filho, B. M. (2017). *Fundamentals of Estuarine Physical Oceanography*, volume 8. Springer.

Moore, S. W., Bohm, H., Jensen, V., and Johnston, N. (2010). Underwater robotics: Science. *Design & Fabrication, Marine Advanced Technology Education Center (MATEC), Monterey, CA, USA*.

Perillo, G. M. (1995). Definitions and geomorphologic classifications of estuaries. In *Developments in sedimentology*, volume 53, pages 17–47. Elsevier.

Sari, U. and KIRINDI, T. (2019). Using arduino in physics teaching: Arduino-based physics experiment to study temperature dependence of electrical resistance. *Journal of Computer and Education Research*, 7:698–710.

Schubel, J. R. and Pritchard, D. W. (1972). The estuarine environment, part 2. *Journal of Geological Education*, 20(4):179–188.

Souza, A., Bolaños, R., Wolf, J., and Prandle, D. (2011). 2.16 - measurement technologies: Measure what, where, why, and how? In Wolanski, E. and McLusky, D., editors, *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, pages 361–394. Academic Press, Waltham.

Thaler, A., Sturdivant, S. K., Neches, R., and Black, I. (2020). Openctd: Construction and operation. https://doi.org/10.31230/osf.io/8evsq.

Winckler, P., Aguirre, C., Farias, L., Contreras, M., and Italo, M. (2020). Evidence of climate-driven changes on atmospheric, hydrological, and oceanographic variables along the chilean coastal zone. *Climatic Change*, 163:1–20.