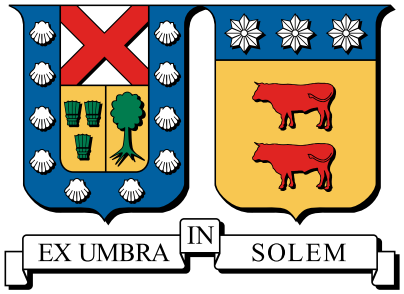
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAISO- CHILE



"DISEÑO Y FABRICACIÓN DE TENSÓMETRO DE CUERDAS EN BASE A ARDUINO Y CELDA DE CARGA DE STRAIN GAUGE PARA SONDEO DE OLEAJE EN BORDE COSTERO"

CRISTIÁN ALEJANDRO GONZÁLEZ RIVAS

Memoria de Título para optar al título de
Ingeniero Mecánico Industrial

Profesor Guia: Dipl. Ing. Udo Rheinschmidt

Profesor Correferente: Ph. D. Alejandro Pacheco Sanjuan

Marzo - 2021

Agradecimientos

Escribir agradecimientos resulta ser un emotivo ejercicio que fluidiza el recuerdo hasta las lágrimas. Echa a rodar la memoria del corazón. Un recuento de aprendizaje y crecimiento. Un reconocimiento, de las influencias, de las turbulencias, los saltos y los vuelos, las caídas y desconsuelos.
Gracias mamá y papá, que marcaron con su sangre mi dualidad.
Gracias hermano, por enseñarme - desde el juego - que nada es obvio.
Gracias amigues.
«la familia que uno elige»
Por mutar y amar conmigo.
Gracias al aire, a la música y al movimiento.
Gracias bicicleta, gracias trompeta.
Gracias Profesores
Gracias Decisiones.

El grueso de este trabajo de título fue escrito entre 2019 y 2020.
Dos años en los que un sin fin de pilares fueron destruidos.
Gracias fuego
Gracias pandemia.

agradecimientos especiales a valevicha, flaki, chino, ceci, seba cueti, pabli, pato, jose, jo, mar, crespo, camipapita, paulo, javi, javi, estevi, pinito, lilo, nicos, jotasusan, amayramarina, laprimamónica, latíarosa, gracias inéslabuela, lili, negra. Gracias a don Pedro, iván y camilo del taller de metalmecánica y al equipo del taller de tecnologia mecánica. Gracias nacha, vicho, pedri, les del colegio, mauri, veni, benja, fede, caro, gabi, uh gracias pame. Gracias a la gente del caamec 2015, de la vocalia de género, del club de música, de la San Pedro. Gracias también a quienes hubo que dejar ir por distintos motivos, matt, sebai, cande, anto, claudio.

Resumen

En el contexto del proyecto investigativo *Wasserdrachen* para el aprovechamiento de la energía undimotriz y la búsqueda de alternativas sustentables para bombeo de agua marina, se estudia la posibilidad de generar tecnologías de bajo costo y fácil programación para el sondeo del oleaje y su energía. Esto, a través de un nuevo enfoque que define al usuario como un observador *estático-terrestre*, interesado en entender cómo afecta el medio *dinámico-acuático* en el que está inmerso un dispositivo.

En base a esto se diseña y construye un sistema de medición de tensión instantánea de cuerdas para aplicaciones en ambiente marino. Se logra un sistema completamente autónomo energéticamente y compatible con el diseño propuesto en etapas previas del proyecto. Se propone un protocolo de calibración y se generan planos constructivos. Además, se define un rango de trabajo de $0 - 300[kg]$, y se grafican los resultados de las pruebas finales con una frecuencia de muestreo de $8,9$ datos por segundo.

El dispositivo se construye en base a una metodología de diseño que contempla seis etapas relacionadas entre si de forma iterativa. Estas etapas son: Reconocimiento de la Necesidad, Definición del Problema, Síntesis, Análisis y Optimización, Evaluación y Presentación.

La propuesta se potencia al enmarcarse como parte del proyecto "*Centro Educativo Regional de Tecnologías Sustentables y Medio Ambiente*" (CERTES). Desarrollos en esta dirección pueden tener aplicaciones en la generación de técnicas alternativas de sondeo de la energía del oleaje en la llamada "*surfzone*" del borde costero.

Abstract

In the context of the *Wasserdrachen* research project for the use of wave energy and the development of sustainable alternatives for seawater pumping, the possibility of generating low-cost technologies and easy programming for the probing of wave energy is studied. This, through a new approach that defines the user as a *static-terrestrial* observer, interested in understanding how affects the *dynamic-aquatic* environment in which a device is immersed.

Based on this, an instantaneous rope tension measurement system is designed and built for applications in a marine environment. Is achieved a completely autonomous energy system that is also compatible with the design proposed in previous stages of the project. A calibration protocol is proposed and construction plans are generated. In addition, a working range of $0 - 300[kg]$ is defined, and the results of the final tests are plotted with a mean sampling frequency of $8{,}9$ data per second.

The device is built based on a design methodology that includes six stages that are iteratively related to each other. These stages are: Recognition of the Need; Definition of the Problem; Synthesis; Analysis and Optimization; Evaluation; and Presentation.

The proposal is enhanced by being framed as part of the "*Regional Educational Center for Sustainable Technologies and Environment*" (CERTES) project. Developments in this direction may have applications in the generation of alternative techniques for sounding wave energy in the so-called surf-zone of the coastal edge.

Índice general

Agradecimientos **3**

Resumen **5**

Abstract **7**

1. Introducción **18**
1.1. Objetivos 21
1.1.1. Objetivos Generales 21
1.1.2. Objetivos Específicos 21

2. Marco Teórico **23**
2.1. Transductores de Fuerza o Celdas de Carga 23
2.1.1. Tipos y Características 24
2.1.2. Aplicaciones 25
2.1.3. Normativa y Generalidades 26
2.1.4. Principio de Funcionamiento para Celdas de Strain Gage 28
2.1.5. Tratamiento de Señal y Adquisición de Datos 34
2.2. Los Microcontroladores 36
2.2.1. Generalidades 36
2.2.2. Arduino 39
2.3. Teoría de Oleaje 43
2.3.1. Generalidades 43
2.3.2. Enfoques en la observación y descripción de un fluido 45
2.3.3. Historia sobre Descripción y Análisis del Oleaje 46

3. Levantamiento de Información **53**
3.1. Lugar de Emplazamiento 53
3.2. Estado del Proyecto 55

3.3. Estado del arte en tecnologías de medición 60
3.3.1. Instrumentos asociados a medición de oleaje 60
3.3.2. Instrumentos asociados a medición de tensión 66
3.3.3. Instrumentos asociados a medición con strain gages 70

4. Metodología **73**
4.1. Reconocimiento de la Necesidad 73
4.2. Definición del Problema 75
4.2.1. Dimensionamiento 77
4.2.2. Requerimientos de Diseño 84
4.3. Síntesis, Análisis y Optimización 85
4.3.1. Análisis de Geometría General y Fuerzas Involucradas 86
4.3.2. Estructura General 89
4.3.3. Diseño de Ejes 91
4.3.4. Selección de la Cuerda 95
4.3.5. Diseño y Manufactura de Poleas 97
4.3.6. Soporte-Horquilla Polea Central y Guías 99
4.3.7. Transductor de Fuerza 103
4.4. Evaluación 106
4.4.1. Factor de Calibración 106
4.4.2. Pruebas en Terreno 108

5. Prototipo Final **111**
5.1. Elementos Estructurales y de Protección 112
5.1.1. Base del Dispositivo: 300.200.000 112
5.1.2. Cuerpo del Tensómetro: 100.000.000 113
5.1.3. Poleas 114
5.1.4. Cápsula del Transductor 115
5.1.5. Guías 116
5.1.6. Caja Electrónica 117
5.2. Sistema Electrónico 118
5.2.1. Subsistema de Energización 120
5.2.2. Subsistema de Sensores 122
5.2.3. Subsistema de Control y Almacenamiento Información 122

6. Conclusiones **125**

A. Términos y definiciones relativos a Celdas de Carga **127**
A.1. Términos relativos a precisión 128
A.2. Términos relativos a carga 131
A.3. Términos relativos a señal 133

B. Planos Constructivos del Tensómetro **134**

C. Ficha Técnica Rodamientos **156**

D. Ficha Técnica Technyl **159**

Bibliografía **161**

Índice de figuras

1.1. Esquematización del principio de bombeo con *comeolas* y válvula antirretorno (Cabrera Fernández, 2017). 19
1.2. Montaje del *comeolas* 20

2.1. Dibujos esquemático de Celdas de Carga Neumática e Hidráulica 24
2.2. Ejemplos de Celda de Carga en base a Strain Gauge extraídos del catálogo de *flintec*. 25
2.3. Esquematización de la deformación de un cuerpo debido a una fuerza aplicada 28
2.4. Estructura de una Galga Extensiométrica o Strain Gage de placa metálica 30
2.5. Puente de Wheatstone 31
2.6. Sistema de un Cuarto de Puente 32
2.7. Uso de Galga Pasiva para eliminar los efectos de la Temperatura 33
2.8. Sistema de Medio Puente con ambas galgas activas 33
2.9. Sistema de Puente Completo 34
2.10. Circuito ejemplo de anulación para desbalanceo de puente de whitson. . . 36
2.11. Microcontrolador AVR atmega128. *Atmel Corp.* 36
2.12. Arduino Portenta H7 y Raspberry Pi 3 37
2.13. Representación gráfica de la lectura y escritura en un pin digital. (Barragán, 2004) 37
2.14. Esquematización de la lectura y escritura por medio de un puerto (Barragán, 2004) 38
2.15. Diagrama del proceso de programación de un microcontrolador (Barragán, 2004) 39
2.16. Cuatro ejemplos de las placas más populares de Arduino. 42
2.17. Generación de oleaje por viento (Beyá et al., 2016) 43
2.18. Ilustración esquemática de la *swash zone* y *surf zone* (Bakhtyar et al., 2009a) 44

2.19. Definición Gráfica de las características principales de una ola. Nomenclatura en tabla 2.2 46
2.20. Dos representaciones gráficas de la relación entre un modelo de oleaje direccional (bidimensional) y un modelo frecuencial escalar (unidimensional) 50

3.1. Ubicación Canal Natural de Olas de Punta Curaumilla. Latitud 33.093875 °S Longitud: 71.721891 °O 53
3.2. Canal natural de olas utilizado como centro de pruebas en Punta Curaumilla. Arriba a la derecha se observa la caseta de resguardo de la bomba centrífuga de Marine Farms S.A. 54
3.3. Comparación esquemática de los conceptos de bombeo propuestos por (Cabrera Fernández, 2017). 55
3.4. Ensayos en canal de olas para ambos prototipos de comeolas. (Cabrera Fernández, 2017). 56
3.5. Comparación de Conceptos Fijo y Flotante (Englisch, 2018). 57
3.6. Vista en corte del modelo CAD del Wasserdrachen 57
3.7. Lugar de emplazamiento y esquemática del sistema de anclaje del *Wasserdrachen* (Englisch, 2018). 58
3.8. Ensamble completo del *Wasserdrachen* antes y después de su montaje (Englisch, 2018). 58
3.9. Vista general del *Wasserdrachen* y sus puntos de anclaje 59
3.10. Boya TRIAXYS separada por componentes. 61
3.11. Movimientos que afectan a la boya. 61
3.12. Distintos modelos de ADCP y esquematización de montaje. 62
3.13. Acoustic Doppler Current Profiler modelo WHSW600 de Teledyne RD Instruments. 63
3.14. GPS-drifters utilizados en Larson et al. (2004) 64
3.15. Fotografía del arreglo de medición montado por Larson et al. (2004) . . . 65
3.16. Ejemplo del proceso de detección de rompimiento del oleaje utilizado en Stringari et al. (2019) 65
3.17. Tensómetro para cuerdas de *CableSafe* 66
3.18. Ejemplos de distintos modelos de tensómetros de «*Tension Measurment, inc*» 68
3.19. Ejemplos de tensómetros manuales y sus características básicas. 69
3.20. Strain Idicator and Recorder. Modelo P3 70

3.21. Ejemplo de configuración de sistema SCXI para Strain Gauges. Fuente: (National Instruments Corporation, 1995) 71

4.1. Esquematización de las fases del proceso de diseño y sus iteraciones. (Budynas y Nisbett) 74
4.2. Esquematización de los estados ON/OFF del sistema de bombeo (Englisch, 2018). 74
4.3. Inputs y Outputs del sistema visto como una caja negra. 76
4.4. Vista superior del arreglo de medición con dinamómetro de resorte anclado a la roca y a la linga que, a su vez, afirma el *comeolas* a la roca. . 77
4.5. Diagrama de Cuerpo libre. El origen equivale al punto en que el dinamómetro se engancha a la linga. Luego $\mathrm{T_D}$ es el vector de la tensión en la dirección del Dinamómetro, $\mathrm{T_W}$ en la dirección del *comeolas*, y $\mathrm{T_R}$ en la dirección de la roca. 78
4.6. Fotograma de referencia del video que captura la oscilación del dinamómetro en conjunto con el oleaje. 78
4.7. Tensión del dinamómetro en el tiempo: Gráfico construido en base a grabación de video con cámara de teléfono. 79
4.8. Porcentaje de la hora con sombra durante cada mes. 81
4.9. Síntesis Conceptual. 85
4.10. Primeros bocetos de estudio sobre geometría del sistema. 86
4.11. Geometría general del sistema de poleas. P_1 conecta con el dispositivo acuático, P_2 con el huinche, y P_c con la celda de carga. 86
4.12. Primeros acercamientos a la estructura general del dispositivo 89
4.13. Primeros acercamientos a la disposición del huinche 89
4.14. Boceto de conceptos para construcción de estructura general 90
4.15. Corte de pletinas de acero en taller de metalmecánica UTFSM 90
4.16. Diagramas para viga biempotrada con carga central. Fuente: Elaboración propia a partir de Budynas y Nisbett 91
4.17. Gráficos de Fuerza Aplicada vs. Deformación generado para pruebas de tracción realizada a cable de $3[mm]$ utilizado por Phillip en su prototipo. . 95
4.18. Gráficos de Fuerza Aplicada vs. Deformación generado para pruebas de tracción realizada a cuerda de tres hebras de nylon torcido. $d_{cuerda} = 12[mm]$. 96

4.19. Estado cuerdas posterior a prueba de tracción. De izquierda a derecha: cuerda con nudo central, cuerda con unión por entramado, cuerda con unión por nudo en 8. 96
4.20. Primeros bocetos de poleas que incluyen rodamientos y separadores. . . . 97
4.21. Mecanizado de poleas en fresa y torno. Taller metalmecánica UTFSM . . 98
4.22. Concepto polea central 99
4.23. Construcción de cuadros de acero galvanizado para guías y primer concepto de soporte-interfaz. 100
4.24. Concepto de Guía 100
4.25. Criterios utilizados para la simulación de la horquilla con software de elementos finitos. 101
4.26. Factor de seguridad entregado por modelación con software de elementos finitos para la horquilla de la polea central. 102
4.27. Bocetos para distintos tipos de celda y su configuración 103
4.28. Concepto cápsula 105
4.29. Esquema de instalación para estudio del *Factor de Calibración* en maquina de ensayo a tracción. 107
4.30. Pruebas en Terreno: Tensómetro fijado a árbol con eslinga de amarre y cuerda anclada a camioneta en pendiente. 109
4.31. Gráficos de Tensión $[kg]$, Temperatura $[°]$ y Humedad $[\,\%]$ construidos con la data recolectada por el tensómetro. 110

5.1. Vista isométrica del modelo CAD del dispositivo con distintos grados de transparencia. 111
5.2. Base del Dispositivo 112
5.3. Bocetos para distintos tipos de celda celda y su configuración 113
5.4. Modelo 3d en vista isométrica del conjunto de la polea central. 114
5.5. Distintas vistas del conjunto central muestran cápsula del transductor. . . 115
5.6. Guías instaladas y en funcionamiento desde distintos ángulos. 116
5.7. Dos vistas del modelo CAD de la Caja Electrónica 117
5.8. Tapa inferior de la caja con circuito en su interior. 117
5.9. Tres vistas del circuito en su estado final. 118
5.10. Esquema de conexiones del circuito electrónico. 119
5.11. Imagen referencial del panel fotovoltaico policristalino. 120
5.12. Cargador de Batería TP4056 121
5.13. Imágen referencial Batería 121

5.14. Regulador de voltaje Step-Up LM2577 121
5.15. Sensor de Temperatura y Humedad DHT22 122
5.16. Celda de Carga YZC 516 C 122
5.17. Arduino UNO 123
5.18. Módulo HX711 123
5.19. Puerto Micro SD 123
5.20. Botón pulsador de 4 pines. 124
5.21. Led Blanco 124

6.1. Colección de imágenes del día de las pruebas finales 126

A.1. Ilustración de algunos de los términos más importantes para celdas de carga 127

Índice de cuadros

2.1. Resumen aspectos técnicos de placa Arduino UNO 42
2.2. Nomenclatura asociada a la descripción de una ola 47

3.1. Tabla de Ponderación de Alternativas Cabrera Fernández (2017) 56
3.2. Especificaciones Técnicas para Tensómetro *CableSafe* 67

4.1. Consumo Estimado Dispositivo de Medición en mA 80
4.2. Promedio mensual de la insolación diaria en unidades de $[kWh/m^2/dia]$ para un plano con inclinación igual a la latitud del sitio. 82
4.3. Requerimientos de Diseño 84
4.4. Fuerza Resultante para la Polea Central considerando $T = 300[kg]$ en función de la ecuación 4.3.10 88
4.5. Magnitud de la fuerza aplicada y largo de cada eje 92
4.6. Propiedades Mecánicas de Interés aceros inoxidables AISI 304 y 316 . . . 92
4.7. Dimensiones e interés para roscas M8x1.25 93
4.8. Esfuerzo cortante y deflexión máximos debido a carga central en condición de viga biempotrada, para ejes roscados M8x1,25 93
4.9. Esfuerzo cortante y deflexión máximos debido a carga central en condición de viga biempotrada, para ejes roscados M8x1,25 94
4.10. Propiedades mecánicas de pernos de acero según clase métrica (Budynas y Nisbett) 94
4.11. Cotización Celdas de Carga tipo S en *AliExpress* 104
4.12. Pruebas en Terreno: valores máximos y mínimos medidos para Tensión de la Cuerda, Temperatura y Humedad. 110

5.1. Tabla de conexiones 119
5.2. Características técnicas panel fotovoltaico policristalino 120

Capítulo 1

Introducción

A poco más de 5 años del *acuerdo de París*, y a uno de la polémica COP 25, organizada por Chile con sede en Madrid, es de conocimiento global el contexto acelerado de cambio climático que sufre el planeta. Fenómeno producido en esencia por las prácticas que hemos desarrollado como humanidad en relación a nuestra forma de coexistir con la Tierra y sus habitantes. Hoy, estas prácticas se encuentran completamente normalizadas tras, a lo largo del último siglo, haber perfeccionado un modelo neoliberal con un sistema de producción capitalista. De modo que el desarrollo tecnológíco en miras de disminuir el uso de combustibles fósiles es un aporte en la construcción de nuevos paradigmas ecológicos para habitar el planeta de forma sustentable y sostenible.

A pesar de lo anterior, no es posible responsabilizar únicamente al neoliberalismo del deterioro ambiental. Pues la idea subyascente que sostiene nuestra sociedad es el *antropocentrismo*, que justifica el extractivismo, posicionando al ser humano por sobre la naturaleza, considerándola sólo de forma indirecta, como la periferia que nos rodea, no como lo central. Idea que es completamente contradictoria con la condicion *ecodependiente* de la humanidad.

De esta forma, la educación se convierte en una de las herramientas más relevantes para reestructurar la sociedad de forma permanente. Luego, tanto las políticas medioambientales futuras, como el desarrollo de tecnologías alternativas, deben estar fuertemente ligados a una motivación especial por educar tempranamente a las nuevas generaciones con respecto a un desarrollo no tan solo sustentable y sostenible, sino también ecológico.

Es dentro de esta lógica que se conforma como proyecto el *Centro Educativo Regional de Tecnologías Sustentables y Medio Ambiente* (CERTES), que engloba diversos proyectos relacionados al estudio de Energías Renovables no Convencionales (ERNC)

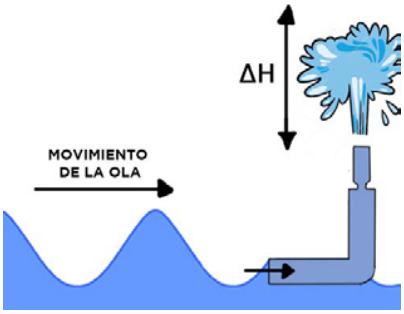


Figura 1.1: Esquematización del principio de bombeo con *comeolas* y válvula antirretorno (Cabrera Fernández, 2017).

en la zona de Punta Curaumilla, Valparaíso. Este proyecto pretende conformarse como un observatorio pedagógico virtual sobre tecnologías sustentables y energía renovable, integrando programas educativos tanto escolares como universitarios, así como distintas organizaciones de la región.

Específicamente dentro del marco de investigación del aprovechamiento de la energía undimotriz para bombeo de agua marina, nace el proyecto *Wasserdrachen*. El desarrollo de sistemas como este supondría una alternativa al uso de bombas centrífugas con motor de combustión, hoy plenamente preferidas por su alta eficiencia y capacidad de bombeo.

La necesidad de competir con esta tecnología se justifica principalmente por dos motivos. Por un lado, la creciente escasez de agua potable, que ha llevado a considerar la desalinización de agua de mar como una solución viable ligada al aprovechamiento de la energía solar. Y por otro, la tendencia al cultivo terrestre de recursos marinos por sobre la recolección de los mismos, como una alternativa a la sobreexplotación del borde costero.

El sistema *Wasserdrachen* consta de un *comeolas* tipo embudo que, bajo el principio de conservación de la masa, busca acelerar el flujo de agua hacia una válvula de retención. El oleaje se canaliza en una sola dirección y se eleva hasta una altura equivalente a la energía cinética y potencial de la ola (ver Figura 1.1). La simpleza de la propuesta conceptual, representa un atractivo indudable – estudiada por Eliecer Cabrera en su Memoria de Titulación «*Bombeo de Agua Mar con Energía Undimotriz*», cuyas conclusiones serán revisadas –. Pero el emplazamiento de tecnologías en ambientes marinos, siempre ha significado un desafío producto de la hostilidad del mismo. Es por esto que, de forma paralela a los estudios de Eliecer, comienza el desarrollo del primer prototipo del *Wasserdrachen*. Phillip Englisch en su Bachelortesis «*Design and Implementation of a Wavepowered Sea Water Pump on the Shoreline of Chile*», documenta esta primera experiencia de construcción y emplazamiento. Phillip, finalmente construye un sistema de huinches y cables que fijan la posición de la cámara de aceleración en el mar, tal y como se muestra en la figura 1.2.

A partir del comportamiento observado en el primer prototipo, se entiende que

posicionar el *comeolas* en el mar y canalizar la ola de forma efectiva no es una tarea trivial, pues la posición ideal del dispositivo es variable. El comportamiento cíclico, tanto de las olas como de las mareas, sugiere dos caminos de desarrollo.

Por una parte, está el trabajo en la materialidad del sistema en pos de aumentar el diámetro de entrada y con esto su capacidad. Sin descartar la posibilidad de investigar y desarrollar otras tecnologías de bombeo. Siempre persiguiendo un diseño robusto y eficiente que sea afectado lo menos posible por la variabilidad y hostilidad del medio marino.

Y por otra, el trabajo enfocado al emplazamiento de aparatos como este. Recogiendo la propuesta de Phillip que define implícitamente al operador o usuario como un observador *estático-terrestre*, interesado en entender cómo afecta el medio *dinámico-acuático* en el que está inmerso el dispositivo. Desarrollos en esta dirección pueden tener aplicaciones en la generación de técnicas alternativas de sondeo de la energía del oleaje en la llamada "*surfzone*"del borde costero. La importancia de esto radica precisamente en que esta es la zona más compleja de la hidrodinámica costera, y los fenómenos que aquí ocurren no son del todo comprendidos por científicos e ingenieros (Balaji et al., 2019).

Además, si la magnitud del empuje que ejercen las olas sobre el dispositivo, se interpreta como un indicador de la energía disponible o aprovechable de la ola. Entonces, se puede contrastar esta información con la altura efectiva de bombeo, obteniendo un indicador de eficiencia.

La siguiente memoria, pretende dar los primeros pasos en el último camino mencionado. Y su principal objetivo es el desarrollo de un prototipo capás de medir la tensión instantánea de los cables que sostienen un dispositivo acuático anclado a tierra

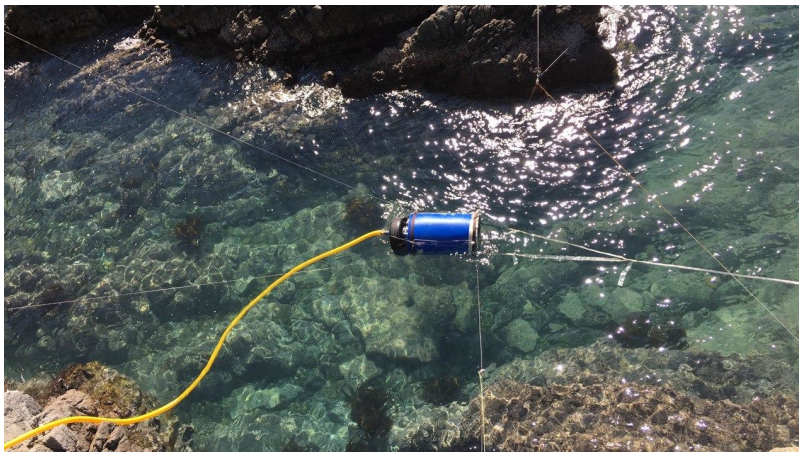


Figura 1.2: Montaje del *comeolas*

firme. Asumiendo así, el reto de la instrumentación mecatrónica en ambientes marinos.

Es importante mencionar que este proyecto no pretende ser una solución inmediata al problema de medición de oleaje desde el borde costero. Más bien busca acercar a la comunidad el uso de tecnologías basadas en software y hardware libre. Con esto se espera insentivar a distintos sectores para que se vuelvan partícipes de problemas como este, acercando la tecnología a las bases de la sociedad. Contribuyendo al objetivo general de implementar un observatorio pedagógico sobre tecnologías sustentables y energía renovable, propio del proyecto CERTES.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Generales

- Diseñar Tensómetro de cuerdas para ambiente marino, que recopile información a tiempo real y sea autónomo energéticamente.
- Construir Tensómetro con los recursos disponibles en la Universidad Técnica Federico Santa María
- Montar en el Canal de Pruebas de Punta Curaumilla

1.1.2. Objetivos Específicos

- Perseguir compatibilidad con sistema propuesto por Phillip Englisch.
- Plantear requerimientos de diseño en función de los objetivos macro del proyecto CERTES.
- Construir dispositivo en base a requerimientos de diseño planteados.
- Desarrollar tecnología de bajo costo y fácil programación en base a Arduino UNO.
- Caracterizar capacidad de medición del dispositivo, con parámetros como rango y resolución.
- Sentar bases teóricas para el desarrollo de dispositivos de medición de oleaje, de acuerdo con los objetivos macro del proyecto CERTES

Capítulo 2

Marco Teórico

El objetivo de este capítulo es sentar las bases de conocimiento para comprender cómo las tecnologías utilizadas en la construcción del sistema propuesto, pueden llegar a tener aplicaciones undimotrices. Para esto, se divide en tres partes.

La primera parte pretende ser un compendio de información sobre celdas de carga o transductores de fuerza. Enfocándose principalmente en las celdas de carga de strain gauge (*strain gauge based load cells*). Se muestran, los distintos tipos existentes y sus características; se exponen las normativas que las rigen internacionalmente, y se explica el principio de funcionamiento y el tratamiento de la información que entregan.

La segunda parte, presenta información general sobre microcontroladores, enfocándose en la placa *Arduino UNO* y su uso como datalogger, que es la configuración usada en este proyecto.

Por último la tercera parte entrega información relevante sobre teoría del oleaje, buscando complementar lo presentado por Eliecer Cabrera y Phillip Englisch en sus respectivos trabajos que se suman a la bibliografía sobre *Energía Undimotriz* para el proyecto *CERTES*.

2.1. Transductores de Fuerza o Celdas de Carga

Una *Celda de Carga*, también conocidas como *Transductor de Fuerza* o *Sensor de Presión*, es un dispositivo capaz de entregar una señal de salida proporcional a una fuerza aplicada sobre el mismo. Hoy en día, la mayoría de los dispositivos producidos para medición de fuerza o pesaje son celdas de carga en base a galgas extensiométricas o *strain-gage*.

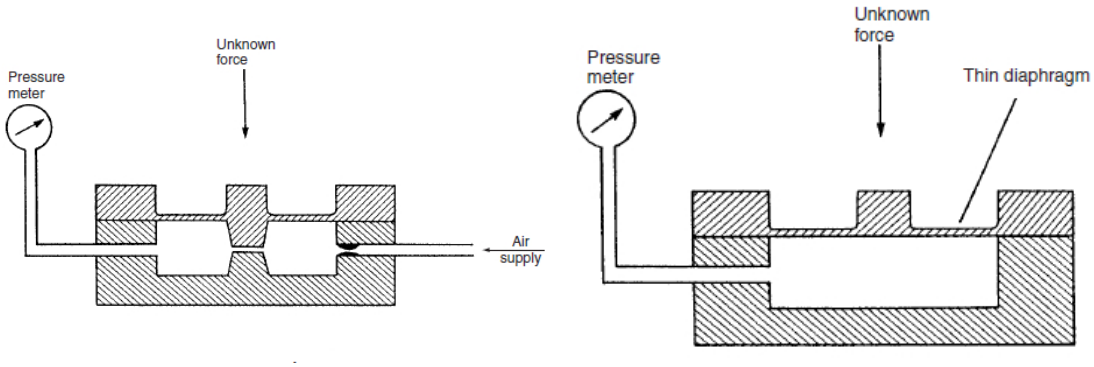
A continuación se revisan distintos aspectos técnicos pertinentes a los transductores

de fuerza, con el fin de servir como soporte para la correcta selección y posterior aplicación del instrumento en un contexto con requerimientos específicos. Se revisan normativas internacionales que rigen su clasificación en la industria, sus parámetros de rendimiento primordiales, algunos de los tipos y aplicaciones más comunes, y su principio de funcionamiento general.

2.1.1. Tipos y Características

Las celdas de carga se pueden clasificar tanto por la forma en que generan su señal de salida, como por la forma en que detectan el peso. Las señales de salida pueden deberse a un arreglo neumático, hidráulico o de strain-gage. A su vez, el peso puede detectarse a partir de torsión, corte, tensión y otros. Para una mejor comprensión, se presenta una clasificación en base a las posibles señales de salida.

Celdas de Carga Neumáticas: Estas celdas miden el peso en términos de equilibrio de fuerza, es decir, el peso se expresa como un cambio en la presión del sistema. Se utilizan para aplicaciones donde la magnitud a medir es pequeña, pero se requiere un alto grado de precisión. Las ventajas clave de estos sistemas son su resistencia ante explosiones en conjunto con ser poco influenciados por cambios de temperatura en el medio.

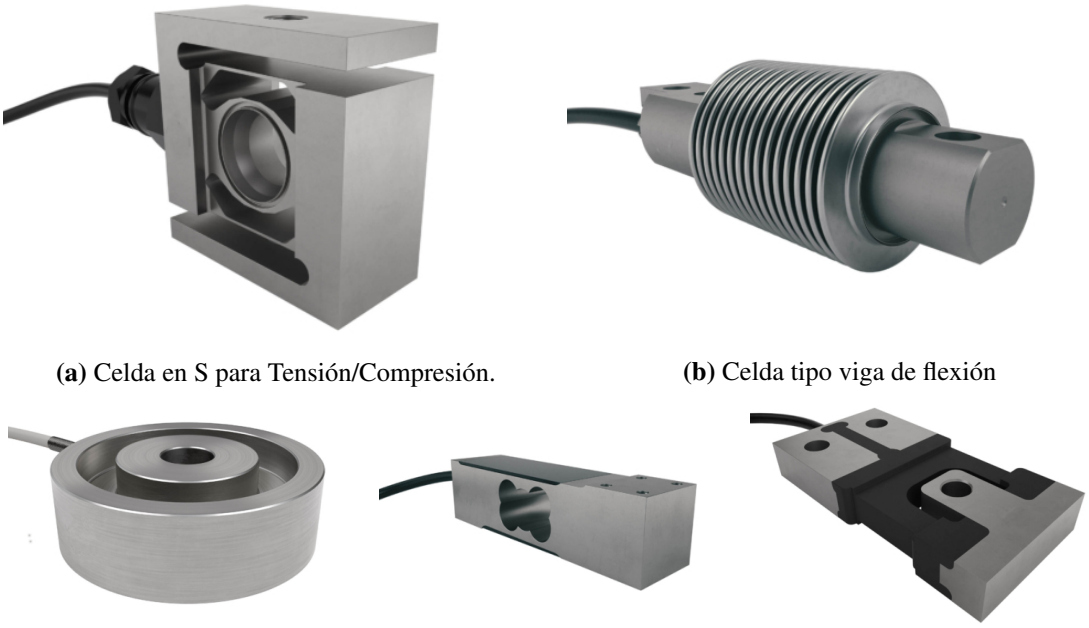


(a) Celda de Carga Neumática **(b)** Celda de Carga Hidráulica

Figura 2.1: Dibujos esquemático de Celdas de Carga Neumática e Hidráulica

Celdas de Carga Hidráulicas: Como el nombre lo dice, este tipo de celdas de carga, se utilizan para mediciones de agua, principalmente en tanques. Al igual que las celdas de carga neumáticas, las hidráulicas hacen un balance de fuerzas midiendo así el peso como un cambio de presión en el fluido, y la presión del fluido incrementa como resultado de un incremento en la fuerza. Estas celdas no utilizan componentes electricos, permitiéndoles funcionar bien en condiciones adversas.

Celdas de Carga de Strain-gage: Usualmente se monta un extremo del transductor a una estructura rígida mientras que el otro es anclado al cuerpo que recibe la fuerza. El cambio en la tensión que experimenta este material implica una fuerza en la celda la cual envía una señal electrónica que es tratada e interpretada posteriormente. Se profundiza más sobre el principio de funcionamiento de estas celdas en la sección 2.1.4. Se pueden ver ejemplos de este tipo de celdas en la figura 2.2



(a) Celda en S para Tensión/Compresión. **(b)** Celda tipo viga de flexión

(c) Celda de compresión **(d)** Celda de carga de punto único **(e)** Celda de carga planar

Figura 2.2: Ejemplos de Celda de Carga en base a Strain Gauge extraídos del catálogo de *flintec*.

2.1.2. Aplicaciones

Las celdas de carga tienen un impacto en nuestro cotidiano que suele pasar desapercibido. Pero son utilizadas para evitar el colapso de construcciones, de automóviles, aviones e incluso el mal funcionamiento de equipo médico. A continuación se muestran ejemplos de aplicaciones para celdas de carga según el sector o tipo de industria.

Industria Aeroespacial: Son utilizadas en tareas como el ensamblado de aeronaves, testeo de frenos, como insumo de control para piloto automático y testeo de neumáticos. Además son utilizadas en pruebas de medición del empuje en turbinas y alas, y también para ensayos estáticos y de fatiga.

Medicina: Son utilizadas en equipo de rehabilitación y entrenamiento, en sistemas de laser quirúrgico, monitoreo del nivel de fluidos para diálisis y cirugía, además de otras aplicaciones. La presición se vuelve un parámetro crítico de desempeño para los profesionales de la salud.

Industria Automotriz: Es utilizada en pruebas de asientos, de choques, de dirección, además del ensamblado de la suspensión el estanque de combustible, y otros. Las celdas de cargga utilizadas para este rubro, cuentan con características especiales como compensación de momentum, de temperatura y protección de para sobrecargas.

Testeo y Medición: Este rubro se encarga de entregar la información requerida por otros sectores industriales para asegurar el correcto funcionamiento y rango de trabajo de sus productos. Algunas aplicaciones generales de las celdas incluyen mediciones de fuerza, presión, tensión de canles y testeo de concreto.

Manufactura: En este rubro, las celdas son utilizadas para la medición de fijaciones con pernos y remaches, rellenado de paquetes, pruebas de fricción y otros.

2.1.3. Normativa y Generalidades

En la industria son requeridas celdas de carga con distintos niveles de precisión y que se adapten a una gran variedad de aplicaciones de pesaje industrial o de comercio. A estas últimas se les conoce como celdas *«Legal for Trade»* o *«LFT»*, es decir, aquellas celdas cuya función es determinar el peso de bienes y/o servicios. Es común que la caracterización de los instrumentos quede a cargo de los fabricantes, pues así pueden dar cuenta de las características de sus productos y definir sus parámetros de desempeño. Pero, con la intensión de generar una comunicación fluida dentro de la industria del pesaje, tanto los requisitos de desempeño, como los términos técnicos descriptivos para este tipo de aplicaciones están bien definidos en las normas correspondientes (revisar Apéndice A: "Términos y definiciones relativos a Celdas de Carga"). Las dos más importantes son el documento *«Specifications, Tolerances, and Other Technical Requirements for Weighing and Measuring Devices»* y la *«OIML R 60, Metrological Regulation for Load Cells»*

Specifications, Tolerances, and Other Technical Requirements for Weighing and Measuring Devices

Más conocido como *«Handbook 44»*, es el documento base para el control sobre básculas (y por ende celdas de carga) utilizado en Estados Unidos y otros países, principalmente en Centro y Sudamérica. Este documento propone 5 *Accuracy Classes* ordenadas de forma descendente según los requerimientos de exactitud de la aplicaciones de pesaje: I, II, III, III L y IIII. Usualmente las celdas de carga disponibles en el comercio caen en una categoría III o III L; las aplicaciones industriales y el retail generalmente son de clase III, mientras que las vásculas para vehículos, líneas de tren y tolvas, de clase III L. Además, las celdas de carga se clasifican según su máximo número de intervalos de verificación, indicado de forma abreviada en unidades de mil. Y también según su capacidad de adecuarse a tareas con una o múltiples celdas, lo que se indica con una S o M respectivamente. Esto último es importante pues las tolerancias para celdas múltiples son más holgadas. Por ejemplo, una celda III L 6 M, sería una celda adecuada para aplicaciones de clase III L, con un máximo de 6.000 divisiones y utilizando múltiples celdas.

OIML R60, Metrological Regulation for Load Cells

La "*Organisation Internationale de Metrologie Legale*"(OIML) es una organización reconocida internacionalmente, que publica múltiples recomendaciones para diversos equipos de pesaje. Estas recomendaciones han sido adoptadas parcial o totalmente por muchos países alrededor del mundo. El *OIML R60* clasifica las celdas en cuatro *Accuracy Classes*: A, B, C, y O, donde la clase C coincide con las aplicaciones de la clase III del *«Handbook 44»*, aunque también abarca las de la clase III L, pues no reconoce una separación entre estas. Además tampoco distingue entre celdas para uso simple y múltiple.

Como la aplicación de una celda de carga no es necesariamente conocida previamente, existe la necesidad de especificar el mínimo intervalo de verificación, referido como v_{min}. Este término se usa para definir el intervalo más pequeño en el que el rango de medición de una celda de carga puede ser dividido. Este valor es importante pues sirve para determinar el tamaño del incremento más pequeño que una báscula puede llegar a tener al usar cierta celda de carga.

La disponibilidad de una amplia gama de normativas utilizadas ha llevado a una presentación de los parámetros de desempeño en una forma mucho más simplificada, por ejemplo, diciendo que la celda de carga es de clase III, múltiple, con 5000 divisiones y $v_{min} = 0{,}5[lb]$. Desafortunadamente esto no dice mucho a quienes no están familiarizados

con el lenguaje, y vuelve difícil la tarea de comparar las especificaciones para celdas de carga no LFT.

2.1.4. Principio de Funcionamiento para Celdas de Strain Gage

Esfuerzo, Deformación y Ley de Hooke

Cuando una fuerza, ya sea de tensión o compresión, es aplicada a un cuerpo, este se deformará en proporción al esfuerzo asociado a esta acción. Se entiende por esfuerzo σ a la fuerza aplicada por unidad de área de la sección transversal del cuerpo en cuestión.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2.1.1}$$

Con él, la longitud inicial L del cuerpo varía en ΔL, así mismo la sección transversal del cuerpo se contraerá o expandirá, como se muestra en Figura 2.3.

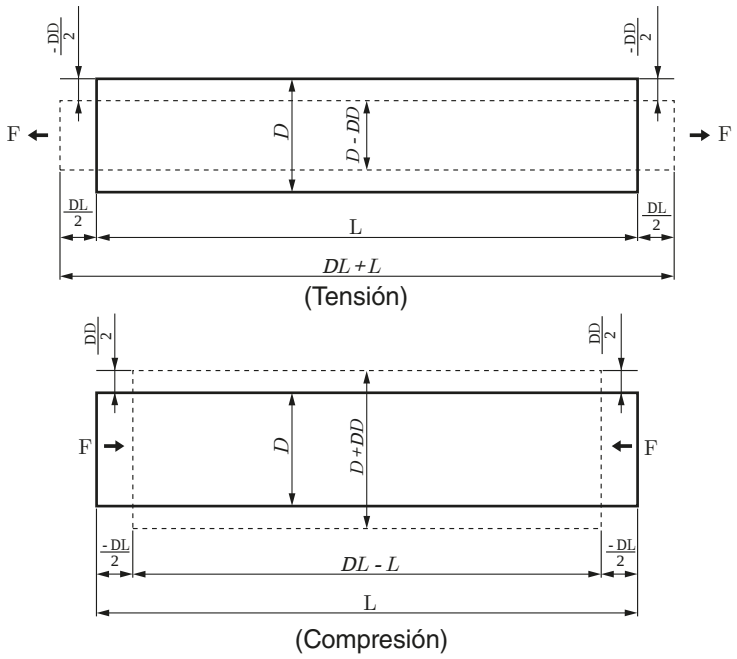


Figura 2.3: Esquematización de la deformación de un cuerpo debido a una fuerza aplicada

De esta forma, la cantidad de deformación o la relación entre la elongación y el largo original de un cuerpo debido a una fuerza aplicada sobre este, se conoce como *deformación unitaria* ϵ (*strain* en inglés), y se define como la fracción de cambio en el largo de un cuerpo:

$$\epsilon = \frac{\Delta \mathrm{L}}{\mathrm{L}} \tag{2.1.2}$$

Además, teniendo en cuenta que un cuerpo que recibe una fuerza de tensión, se elongará en la dirección axial a la fuerza y se contraerá en la dirección transversal a la misma. Es posible relacionar las dos magnitudes de deformación mediante la *Razón de Poisson*, que se define como:

$$\nu = \left| \frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{longitudinal}} \right| \tag{2.1.3}$$

Considerando la **Ley de Hooke**, la deformación sufrida por un cuerpo elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada e inversamente proporcional a su sección. Los cuerpos en su mayoría presentan una zona elástica de comportamiento, en la que existe una relación lineal entre el esfuerzo σ y la deformación unitaria ϵ que estos experimenten debido a fuerzas externas. La pendiente de esta recta dependerá de cada material y se conoce como Modulo de Young (E):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \tag{2.1.4}$$

En otras palabras, al ser el módulo de young de los materiales una característica conocida y estudiada, es posible determinar la magnitud de las fuerzas de tensión o compresión que pudieran estar afectando a un cuerpo, midiendo la deformación que este sufre producto de las mismas. Uno de los métodos más utilizados hoy en día para esta tarea, es el uso de las Galgas Extensiométricas o Strain Gage.

La Galga Extensiométrica o Strain Gage

Si bien existen múltiples formas de determinar el esfuerzo al que está siendo sometido un cuerpo, lo más común es medir la deformación asociada por medio de una Celda de Carga en base a Strain Gages, un dispositivo cuya resistencia eléctrica varía proporcionalmente a su deformación, siendo lo suficientemente sensible como para detectar deformaciones del orden de las partes por millón y traducirlas a una señal eléctrica. Son utilizadas tanto en el estudio de materiales como en la industria. Y pueden adaptarse como sensor en transductores de fuerza, presión, aceleración, vibración, desplazamiento y torque, usados para distintos propósitos como la medición y el control de líneas de producción. Existen distintos tipos de galgas, pero la más utilizada es la galga metálica. Cuya estructura genérica está representada en Figura 2.4

La galga metálica consiste en un cableado muy fino o, más comunmente, un patrón de rejilla de líneas paralelas fotograbadas en una lámina de metal que previamente ha sido montada en una base plástica de resina flexible.

El patrón de rejilla maximiza la cantidad de metal sujeto a deformaciones en la

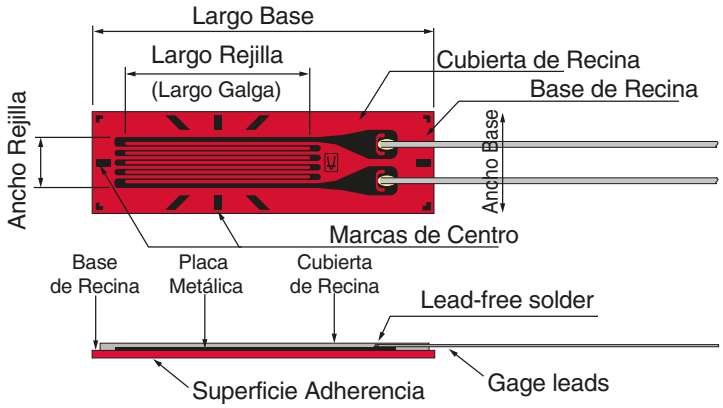


Figura 2.4: Estructura de una Galga Extensiométrica o Strain Gage de placa metálica

dirección paralela. Y, a su vez, el área transversal se mínimiza para reducir la influencia de esfuerzos cortantes y el efecto de Poisson, es decir la deformación transversal al eje de acción de una fuerza de tensión o compresión.

La delgada capa de recina que soporta el patrón de rejilla, se monta directamente al cuerpo que se desea medir, por lo que la deformación que este experimenta se transfiere directamente a la strain gage, que responde, como se mencionó antes, con un cambio lineal en resistencia eléctrica. Matemáticamente, esto se describe como

$$\frac{\Delta R}{R} = GF\epsilon \tag{2.1.5}$$

o bien:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \tag{2.1.6}$$

Donde GF es el **Factor de Galga** (*Gage Factor*), un parámetro fundamental pues expresa cuantitativamente la sensibilidad de cada galga, al definirse como la proporción entre la fracción de cambio en resistencia eléctrica y la fracción de cambio en longitud (esfuerzo unitario ϵ).

Las galgas de uso general usan aleaciones de cobre-niquel o cromo-niquel para los elementos resistivos, y el GF para estas aleaciones comunmente es de 2.

Idealmente se desea que la resistencia de la galga presente un cambio únicamente en respuesta a la deformación producto de fuerzas aplicadas. Pero en la práctica, la medición de deformación unitaria raramente implica cantidades mayores a un par de *milistrain* ($\epsilon 10^{-3}$). Lo que significa una medición sensible para cambios muy pequeños de resistencia, por lo que tanto el material de las galgas como el de los cuerpos sujetos a medición, responden inevitablemente a variaciones en la temperatura.

Por ejemplo, si un cuerpo sufre una deformación de $500[\mu m]$, que es medida con un strain gage de $GF = 2$, según Ecuación 2.1.5, esto representa un cambio en la resistencia electrica de un $0,1\,\%$. Considerando que las galgas se comercializan en valores de entre 30 y 3000 Ω, un cambio así representaría una variación de entre 0,03 y 3 Ω.

Esto se ha traducido en un interés especial por parte de los fabricantes en el estudio de los materiales con los que producen sus strain gages, para lograr compensar de alguna forma la expansión térmica propia de los cuerpos para los que están diseñadas. Aunque, de todas formas, esta compensación no es capaz de remover por completo la sensibilidad térmica, es por esto que las galgas siempre son montadas en configuraciones tipo puente con una fuente de voltaje propia.

Sistema de Conexión: El Puente de Wheatstone

Como se mencionó en la título anterior, para lograr que pequeños cambios de resistencia se traduzcan en cambios de voltaje perceptibles y que además se compensen los errores por variación de temperatura, las strain gage se conectan en configuraciones de puentes resistivos, comunmente conocidos como *Puente de Wheatsone*.

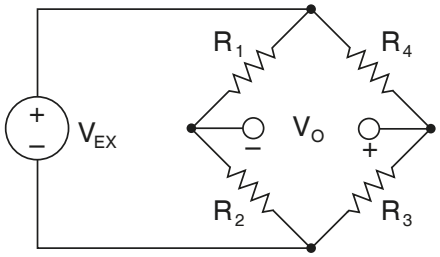


Figura 2.5: Puente de Wheatstone

El Puente de Wheatstone general, que se ilustra en la Figura 2.5, consta de cuatro brazos resistivos con un voltaje de exitación V_{ex} que se aplica a través de este, de forma que el voltaje de salida es:

$$V_o = \frac{R_1R_3 - R_2R_4}{(R_1R_2)(R_3R_4)}V_{ex} = \left(\frac{R_3}{R_3R_4} - \frac{R_2}{R_1R_2}\right)V_{ex} \qquad \textbf{(2.1.7)}$$

A partir de esta relación, se observa que si $R_1/R_2 = R_3/R_4$, el voltaje de salida V_o será igual a cero. Lo que se conoce como puente *balanceado*.

Pero si ahora se reemplaza R_4 por un strain gage de resistencia nominal R, cualquier variación ΔR desbalanceará el puente, y el voltaje de salida será:

$$V_o = \frac{R_1 R_3 - R_2(R + \Delta R)}{R_1 R_3 - R_2(R + \Delta R)} \tag{2.1.8}$$

Asumiendo $R_1 = R_2 = R_3 = R$

$$V_o = \left(\frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R}\right) V_{ex} \tag{2.1.9}$$

De ecuación 2.1.5, se sabe que $\Delta R = GF\epsilon R$. Luego, al trabajar la expresión y despejando para V_o/V_{ex} en función de la deformación:

$$\frac{V_o}{V_{ex}} = \frac{GF\epsilon}{4}\left(1 + \frac{GF\epsilon}{2}\right)^{-1} \tag{2.1.10}$$

La expresión obtenida da cuenta de que el voltaje de salida es proporcional al cambio en la resistencia, que es a su vez, una expresión de la deformación. Notar que el término $(1 + GF\epsilon/2)^{-1}$ presente en ecuación 2.1.10 da cuenta de la no linearidad entre la salida del puente y la deformación unitaria.

Este tipo de configuración con una sola galga, es conocida como **Cuarto de Puente**, y su circuito se esquematiza en Figura 2.6.

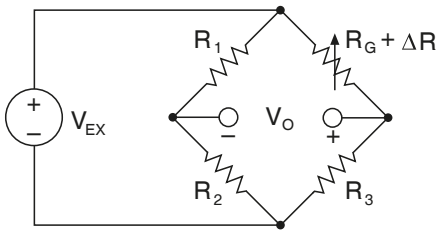


Figura 2.6: Sistema de un Cuarto de Puente

De a cuerdo al propósito de la medición, un puente de Wheatstone puede ser configurado con un cuarto de puente, medio puente, o puente completo.

Si dos de los cuatro brazos del puente son reemplazados por strain gages, se está usando una configuración tipo **Medio Puente**, con la que ya es posible evitar los efectos de la temperatura. La Figura 2.7 muestra un arreglo de galgas donde sólo una de ellas es la *activa*, pues se monta en la misma dirección del esfuerzo aplicado. En cambio la segunda es montada en dirección transversal, tomando un rol *pasivo* donde la deformación tiene un efecto mínimo sobre la magnitud de su resistencia.

Sin importar lo anterior, los cambios en la temperatura afectan a ambas galgas por igual, lo que implica que tanto la relación entre ambas resistencias como el voltaje de salida V_o no varían, y los efectos de la temperatura se minimizan.

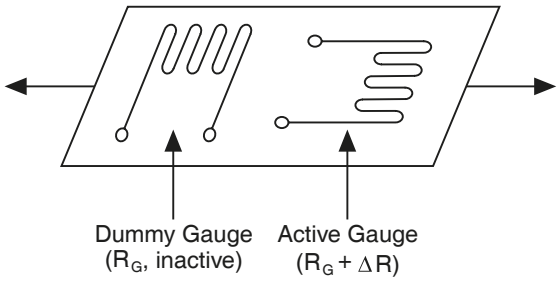


Figura 2.7: Uso de Galga Pasiva para eliminar los efectos de la Temperatura

También es posible lograr que ambas celdas tomen un rol *activo* a pesar de estar en distintas direcciones. Un ejemplo de esto se ilustra en Figura 2.8, que muestra un viga en flexión con una galga montada a tensión $(R + \Delta R)$ y otra a compresión $(R - \Delta R)$.

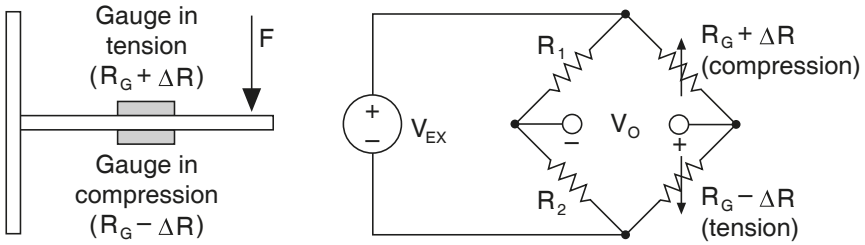


Figura 2.8: Sistema de Medio Puente con ambas galgas activas

Esta configuración de *Medio Puente* entrega un voltaje de salida $\mathrm{V_o}$ lineal y cercano al doble del *Cuarto de Puente*, siendo su relación de voltajes en función de la deformación unitaria:

$$\frac{V_o}{V_{ex}} = -\frac{GF\epsilon}{2} \tag{2.1.11}$$

Finalmente, se puede aumentar la sensibilidad del puente aún más si se utiliza una configuración de Puente Completo, en la que todos los brazos resistivos son strain gages, tal y como se ilustra en Figura 2.9. De esta forma la relación de voltajes en función de la deformación unitaria queda como:

$$\frac{V_o}{V_{ex}} = GF\epsilon \tag{2.1.12}$$

Es importante tener en cuenta que las ecuaciones 2.1.10, 2.1.11 y 2.1.12, asumen una condición inicial de puente balanceado, es decir, que la salida de voltaje es cero cuando no existen esfuerzos aplicados. Pero en la práctica todos los puentes están desbalanceados en distinta medida, por lo que es necesario tomar ciertas medidas para compensar.

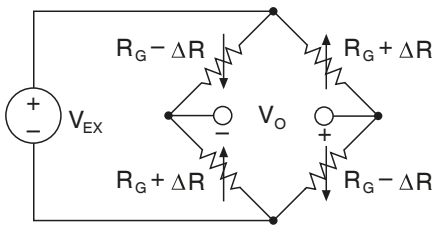


Figura 2.9: Sistema de Puente Completo

Es posible utilizar un circuito de balanceo para volver a ajustar el V_o, o simplemente medir la salida sin deformación y compensarla con software.

2.1.5. Tratamiento de Señal y Adquisición de Datos

Medir por medio del uso de strain gauges, implica percibir cambios de resistencia extremadamente pequeños. Es por esto que, para lograr mediciones confiables, se requieren una adecuada selección y uso del puente resistivo, así como prestar especial cuidado al acondicionamiento de señal y a los componentes de adquisición de data.

Completación del Puente

En general los sensores comerciales están equipados con una configuración tipo *full-bridge* con cuatro galgas activas, por lo que no suele ser necesario completarlo. Pero en caso de que, por ejemplo, se desee montar las galgas manualmente sobre un objeto a testear, será necesario completar el puente con *resistencias de referencia*. Es por esto que los acondicionadores de señal comerciales proveen un circuito que completa las configuraciones tipo *half bridge* con dos resistencias de referencia de alta precisión.

Excitación del Puente

Es de suma importancia que el voltaje de excitación sea lo más estable y preciso posible, pues de la ecuación 2.1.9 se desprende que el voltaje de salida y el voltaje de excitación están intimamente relacionados. Es por esto que los acondicionadores de señal comerciales, generalmente proveen una fuente de voltaje constante para energizar el puente. Se puede reemplazar una fuente de voltaje estable y precisa, con una medición precisa del mismo, y calcular el esfuerzo a partir de esta información. Si bien la industria no existe un voltaje de excitación estandar, los valores se mueven alrededor de los 3 y 10 [V]. Es importante tener en cuenta que a mayor V_{ex}, mayor V_o, pero un mayor voltaje también puede significar un aumento del error debido a calentamiento.

Otra fuente de error asociada al V_{ex}, es la resistencia de los cables que conectan la fuente de voltaje con el puente. Si estos se encuentran muy distanciados, es importante considerar la utilización de métodos de compensación para medición en remoto. Algunos acondicionadores de señal tienen estas características incorporadas, y suelen hacerlo midiendo el voltaje de excitación efectivo entregado al puente, para luego utilizar este valor en el cálculo del esfuerzo.

Amplificación de Señal

El voltaje de salida entregado por un *strain gauge* o un puente es relativamente pequeño. En la práctica, la mayoría de los transductores entregan menos de 10 [mV/V] , es decir, 10 [mV] de salida por 1 [V] de entrada. En otras palabras, si se cuenta con un voltaje de excitación de 10 [V], la señal de salida o V_o será de 100 [mV]. Es por esto que un arreglo de medición de este tipo, debe contar con amplificadores de señal para incrementar la resolución y minimizar el ruido.

Balanceo del Puente y anulación del Offset

Al instalar un puente, es muy poco probable que su *output* sean exactamente cero volts al no existir fuerzas aplicadas. Esto producto de pequeñas variaciones en la resistencia a lo largo de los brazos del puente y la resistencia misma. Para manejar este desbalanceo incial de voltaje existen distintos métodos.

- **Compensación con Software**: Se realiza una medición inicial antes de aplicar la fuerza. De forma que este voltaje inicial es utilizado en el cálculo de la fuerza. La ventaja de este método es que es simple, rápido y no requiere ajustes manueales. Pero es importante tener en cuenta que si el desbalanceo es lo suficientemente grande, limita la ganancia del amplificador que es posible aplicar al voltaje de salida, por lo que se limita el rango dinámico de la medición. Este es el método que utilizado en la construcción de la sonda de tensión de este proyecto.
- **Circuito de Anulación**: En este método se utiliza un potenciómetro para ajustar a cero físicamente la salida del puente. En la figura 2.10 se muestra un ejemplo de este tipo de circuitos. Al variar la posición del potenciómetro R_{POT}, es posible controlar el nivel de la salida del puente y setear la salida inciial en cero volts. El valor de R_{NULL} setea el rango en que el circuito puede ser balanceado.
- **Compensación con Buffer**: Este método, al igual que la corrección por software, no afecta al puente directamente. Se agrega un circuito de anulación que agrega

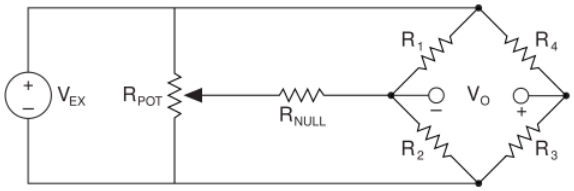


Figura 2.10: Circuito ejemplo de anulación para desbalanceo de puente de whitson.

un voltaje ajustable de corriente continua a la salida del amplificador. Existen accesorios comerciales que realizan esta tarea.

2.2. Los Microcontroladores

2.2.1. Generalidades

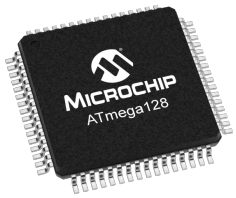


Figura 2.11: Microcontrolador AVR atmega128. *Atmel Corp.*

Un microcontrolador[1] (MCU o μC) es un dispositivo electrónico de computo muy pequeño que cuenta con una serie de terminales de entrada y salida (*Input and Output pins - I/O pins*). Enfrenta las problemáticas del prototipado electrónico por medio de la programación. Esto significa que la misma unidad puede comportarse de diferentes formas, tras modificar su software para adaptarlo a una necesidad o propósito específico.

En el mercado existen muchos tipos de microcontroladores, y su funcionalidad abarca desde el control lógico básico, hasta computadores completamente funcionales con acceso inalámbrico a internet y otras redes, comunicación vía radio frecuencia (RF), Bluetooth, GPS, y sistemas más complejos. Es por esto que existen como unidades simples en formato de circuito integrado tipo *chip* (ver ejemplo de figura 2.11). Y también en formato de un tablero electronico completo con acceso a pines desde conectores (ver ejemplos en figura 2.12).

Los microcontroladores también tienen la capacidad de medir el tiempo. Usualmente cuentan con un par de *timers* con los que se puede medir lapsos de tiempo, desencadenar eventos, sincronizar funciones y otros.

[1]Toda la información expuesta en la presente sección 2.2.1 fue extraída de (Barragán, 2004)

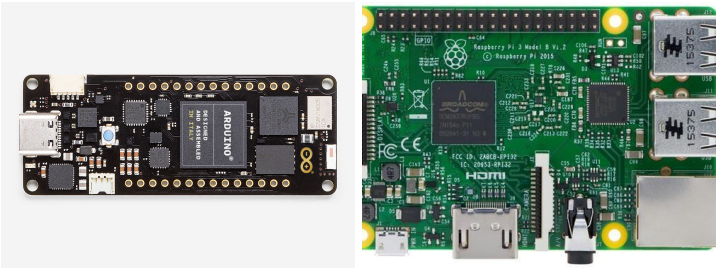
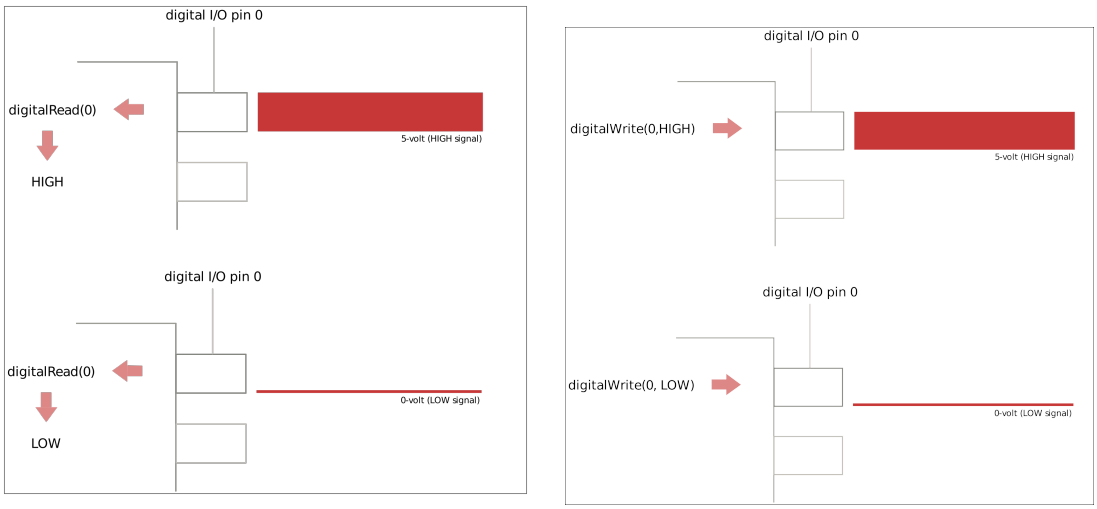


Figura 2.12: Arduino Portenta H7 y Raspberry Pi 3



(a) Lectura de valor de entrada en un *digital I/O pin*

(b) Escritura de un valor de salida en un pin digital

Figura 2.13: Representación gráfica de la lectura y escritura en un pin digital. (Barragán, 2004)

Dependiendo de la funcionalidad del microntrolador, sus terminales pueden ser utilizados tanto para recibir como enviar señales. Estas señales pueden ser **discretas** o **análogas**.

Señales Binarias Digitales

Las señales discretas se traducen como **señales binarias digitales**, sus valores posibles son el 0 lógico (LOW) o el 1 lógico (HIGH). Estos valores se reflejan en cambios de voltaje. Comunmente LOW es 0 [V], y HIGH es 5 [V]. Esto se encuentra representado en la Figura 2.13

Señales Análogas y Pulse Width Modulation

Pero en la naturaleza, no todo se expresa de forma discreta. Muchos fenómenos físicos se manifiestan de forma análoga, como la medición de la intensidad de la luz, temperatura,

sonido, posición y otros. Existiendo un rango de valores intermedios que pueden ser medidos. Para estos casos, ciertos terminales del microcontrolador pueden ser usados como **entrada análoga** (*analog input*) o **conversor analogo-digital** (ADC por sus siglas en inglés).

En un ADC, un rango de valores análogos es convertido en un rango de números, dependiendo de la precisión de este. Por ejemplo, un ADC de 10 bit puede diferenciar 1024 valores, en el rango [0 - 1023].

En la práctica, si el máximo voltaje del microcontrolador corresponde a 5 [V]. El ADC al leer este dato, devolverá el valor 1023, así mismo, al leer 0 [V] devuelve un 0. con la posibilidad de devolver todos los valores dentro de este rango, por ejemplo al leer 2.5 [V] devuelve un 511 $(1024/2 - 1)$.

Ciertos terminales de los microcontroladores pueden utilizarse como salidas análogas. Esta salida análoga se logra mediante un proceso llamado *Pulse Width Modulation* (PWM), que consiste basicamente en intercalar el estado del terminal entre HIGH y LOW muy rápidamente. Esto es similar a lo que ocurre en dimmers para lámparas o controladores de velocidad para motores, en los que la lámpara o el motor no están encendidos de forma continua, reduciendo así el tiempo de performance. También existen salidas análogas *reales*, se conocen como Conversores Digital-Análogo (*Digital to Analog Converter - DAC*). Estos también dependen de la precisión con la que es posible convertir un número en un valor de voltaje en un pin físico.

Puertos

Algunos microcontroladores proveen acceso tanto a pines individuales como a grupos de pines simultáneamente. Estos grupos de pines son conocidos como *Puertos*. Al tener la capacidad de escribir información sobre un grupo de pines, los microcontroladores son capaces de comunicarse, por ejemplo, con dispositivos 8-bit utilizando 8 de sus pines. Otra utilidad es la escritura de data en paralelo.

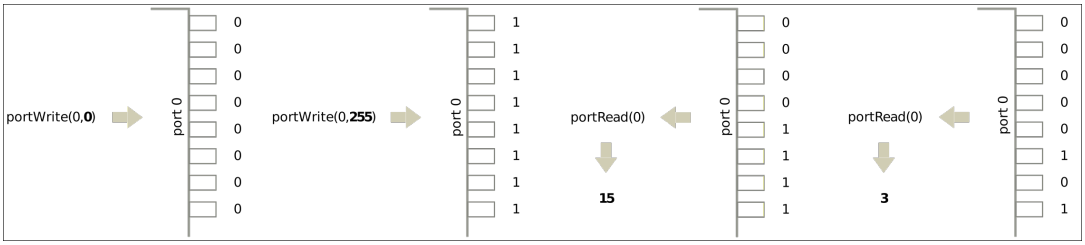


Figura 2.14: Esquematización de la lectura y escritura por medio de un puerto (Barragán, 2004)

También pueden tener capacidad de comunicación por medio de *puertos seriales*,

el mismo tipo de puertos seriales que poseen la mayoría de los computadores. De esta forma pueden conectarse y comunicarse con otros dispositivos utilizando los llamados *protocoles seriales*. En muchos casos, estos son utilizados tanto para programar el microcontrolador como confines de comunicación.

Programación de un Microcontrolador

En general, programar un microcontrolador se puede separar en dos procesos (representación gráfica en 2.15). Uno ocurre en el computador u ordenador, y el otro en el microcontrolador en sí. El computador utiliza una interfaz conocida como *Integrated Development Environment* o IDE, la que incluye un editor de texto para escribir código, y las herramientas para compilarlo. Cuando esto ocurre, el código es transformado a lenguaje de máquina, se escribe un archivo conocido como *object binary file*. Este archivo binario puede ser cargado en el microcontrolador y leído por el mismo. Para cargar este archivo usualmente se usa un puerto serial, que conecta físicamente el computador con el microcontrolador. Una vez hecho esto, la conexión puede terminarse. El programa queda en la memoria del microcontrolador y será ejecutado constantemente. Cada vez que este se encienda, se ejecutará el programa, pudiendo ser reprogramado las veces que sea necesario.

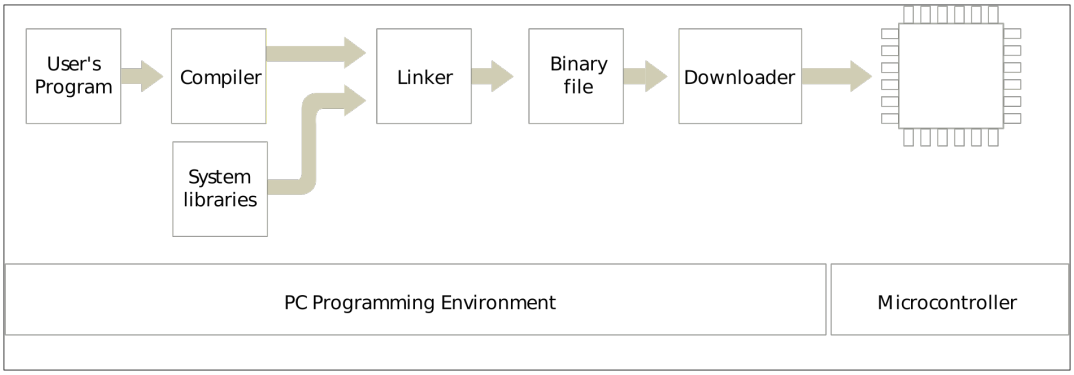


Figura 2.15: Diagrama del proceso de programación de un microcontrolador (Barragán, 2004)

2.2.2. Arduino

Arduino es una compañía de código abierto (*open-source*) de *hardware* y *software*, proyecto y comunidad de usuarios que diseña y fabrica microncontroladores de placa única (*single-board*) y kits de microcontroladores para construir dispositivos digitales. Sus productos están

bajo la *Licencia Pública General* de GNU, permitiendo la fabricación de tableros Arduino y la distribución de cualquier software por cualquier persona.

Los diseños de placas utilizan una variedad de microprocesadores y controladores. Están equipadas con conjuntos de pines I/O digitales y análogos que pueden conectarse a placas de expansión (*shields*), *breadbords* para prototipado (también conocidas como *protoboards*), y otros circuitos. Las placas cuentan con interfaces para comunicación serial, incluido el Bus Serial Universal (USB) en algunos modelos, que también son usados para cargar programas desde computadores personales.[2]

Breve Historia

Arduino nace en 2005, cuando Massimo Banzi y David Cuartielles del *Interaction Design Institute Ivrea* (Ivrea, Italia) fabrican un dispositivo programable fácil de usar, ideal para proyectos de diseño de arte interactivo. A su vez David Mellis, desarrolla el software o IDE para programarlo. Todo esto se construye sobre el trabajo de Hernando Barragán, quien en 2004 publica su tésis *"Wiring: Prototyping Physical Interaction Design"* en la que expone sobre su trabajo en la creación de *Wiring*, que se define como un ambiente de programación y como una placa electrónica con entradas y salidas para prototipar. A su vez, *Wiring* se construye sobre *Processing*, un lenguage de programación de código abierto, desarrollado en el *Massahusetts Institute of Technology Media Lab and Interact* y el *Interaction Design Institute Ivrea*.

La intención de Barragán era generar una herramienta con la que fuera posible acercar el mundo del diseño y creación de prototipos electrónicos, a audiencias que no necesariamente tienen conocimientos de electrónica, matemática o programación. Siguiendo esta idea, los fundadores de Arduino, buscaban crear un dispositivo de bajo costo, simple de programar y de conectar a múltiples objetos, como relés, motores y sensores. El resultado fue una placa de ciruito autónoma, en base a la familia AVR de microcontroladores 8-bit de Atmel, a la que se le cargan programas llamados *sketches* desde un entorno de desarrollo integrado simple e intuitivo.

Desde ese entonces, Arduino ha crecido en muchas direcciones. Y cada versión intenta complacer un nicho nuevo y específico. A pesar de esto, el factor común a todas las versiones son, la librería runtime AVR-GCC, que se suministra junto con la IDE de

[2]en.wikipedia.org. (2020). Arduino. [online] Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino [Revisado 29 Jan. 2020].

Arduino; y el firmware del *bootloader* (gestor de arranque) que viene precargado en el microcontrolador de cada placa Arduino.

Hardware

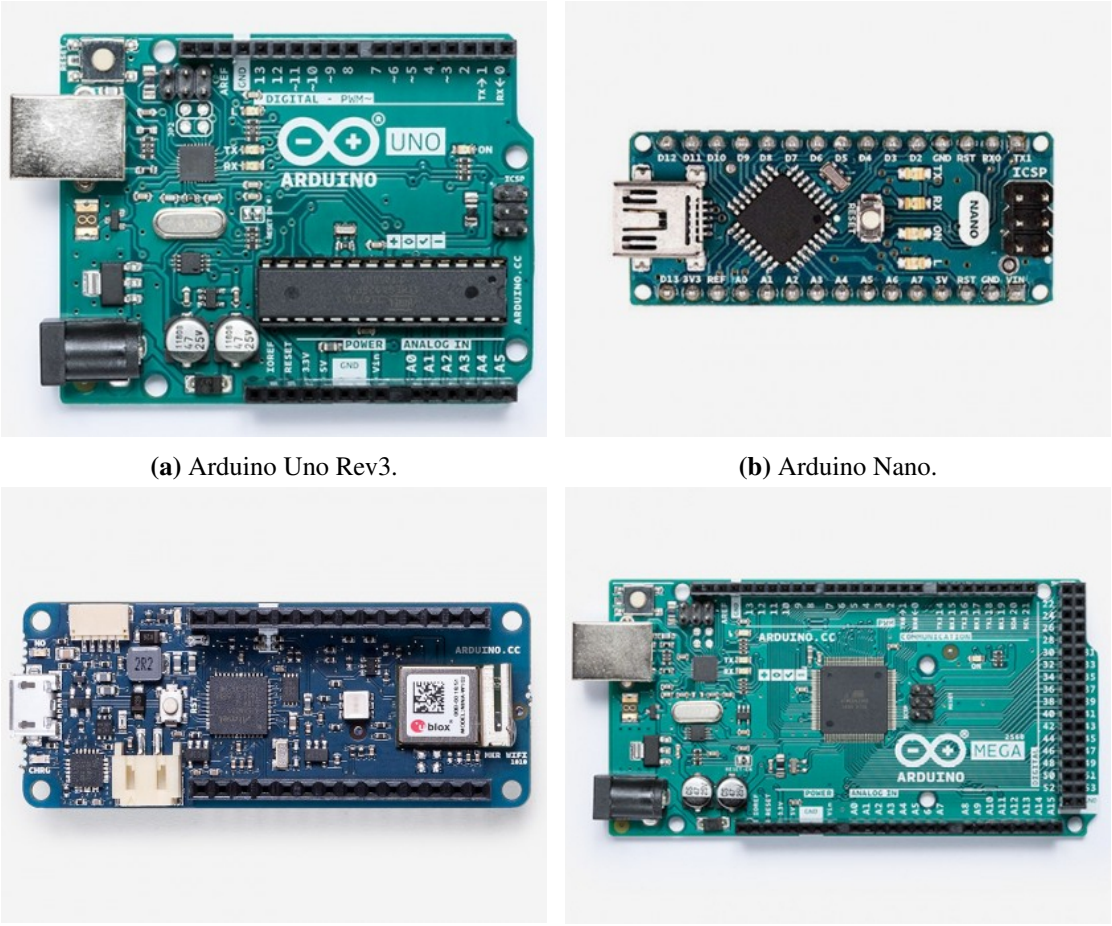
El hardware de arduino se distribuye bajo licencia Creative Commons Attribution Share -Alike 2.5, por lo que se entiende como hardware libre.Es posible encontrar los esquemas de diseño en el sitio web de Arduino.

Salvo algunas excepciones, las placas Arduino basan su funcionamiento en microcontroladores AVR Atmel-8 bits (ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280, ATmega2560). Cada microcontrolador tiene sus propias atribuciones que terminan por definir la funcionalidad de la placa. Las cuales utilizan pines/cabezales hembra de una o dos hileras para facilitar las conexiones e incorporación en otros circuitos. En general incluyen un regulador lineal de 5 V y un oscilador de cristal de 16 MHz o un resonador de cerámica. Además pueden conectarse con circuitos modulares adicionales denominados *shields* o *placas de expansión* para añadir una o más funcionalidades a la misma. En la figura 2.16 se muestran algunos ejemplos de las placas Arduino más populares.

Arduino Uno

Arduino Uno es una placa basada en el microcontrolador ATmega328P. cuenta con 14 pines digitales de entrada/salida, de los cuales 6 pueden ser usados como salidas PWM (véase 2.2.1). Además cuenta con 6 entradas análogas, un resonador de cerámica de 16 MHz, conección USB, un *porwer jack* de 12 V, un cabezal ICSP[3], y un botón de reset. Contiene todo lo necesario para apoyar al microcontrolador; para utilizarlo sólo se requiere conectarlo al computador mediante un cable USB o energizarlo con un adaptador AC/DC o una batería. La placa UNO y la versión 1.0 del software de Arduino (IDE) fueron las versiones de referencia para la creación de las versiones más nuevas.

[3]Programación serial en circuito (ICSP por las siglas del inglés : In-Circuit Serial Programming), es la habilidad de algunos dispositivos lógicos programables, microcontroladores y otros circuitos electrónicos, de ser programados mientras están instalados en un sistema completo, en lugar de requerir que el chip sea programado antes de ser instalado dentro del sistema.



(a) Arduino Uno Rev3.

(b) Arduino Nano.

(c) Arduino MKR WiFi 1010

(d) Arduino Mega 2560 Rev3

Figura 2.16: Cuatro ejemplos de las placas más populares de Arduino.

Cuadro 2.1: Resumen aspectos técnicos de placa Arduino UNO

Microcontrolador	Atmega328P
Voltaje de Operación	5 V
Voltaje de Entrada (Recomendado)	7-12 V
Voltaje de Entrada (Límite)	6-12 V
Digital I/O Pins	14 (de los cuales 6 proveen salida PWM)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
Flash Memory	32 kB (ATmega328P). 0.5 kB son usados por el bootloader
SRAM	2 kB (ATmega328P)
EEPROM	1 kB (ATmega328P)
Velocidad del Reloj	16 MHz
LED_BUILTIN (Pin del led incorporado)	13
Largo	68.6 mm
Ancho	53.4 mm
Peso	25 g

2.3. Teoría de Oleaje

2.3.1. Generalidades

El oleaje corresponde a las ondas producidas por el viento oceánico. Estas se propagan por la superficie del mar con un periodo de entre 3 [s] y 30 [s] (Beyá et al., 2016).

Si bien el oleaje producido por el viento oceánico, es el tipo de onda superficial que mayor energía transporta, también existen otros mecanismos generadores de ondas en el océano. Estos son las mareas astronómicas, movimientos del suelo marino, desprendimientos de laderas y glaciares, erupciones volcánicas submarinas, explosiones y movimientos de cuerpos flotantes o sumergidos. Es por esto que se vuelve muy frecuente encontrar estados de mar que presentan oleajes provenientes de distintas direcciones, lo que se conoce como, multimodalidad.

Por otra lado, los estados de mar o condiciones de oleaje se pueden clasificar en dos tipos (ver figura 2.17):

El mar de viento o **sea**, se presenta en la zona de generación del oleaje, donde el viento incide. Suele ser desordenado y anguloso, en algunos casos con rotura frecuente del oleaje. Es común asociar la descripción de este tipo de oleaje al **fetch**, que se entiende como la distancia de la superficie de agua sobre la que el viento incide en una misma dirección.

El mar de fondo o **swell**, El cual se encuentra lejos de la zona de generación, siendo relativamente más ordenado y regular, tras haber disipado parte de su energía.

En general, este último tipo de oleaje es el más simple de estudiar, ya que puede considerarse como unimodal. Es más, puede modelarse mediante ecuaciones de onda

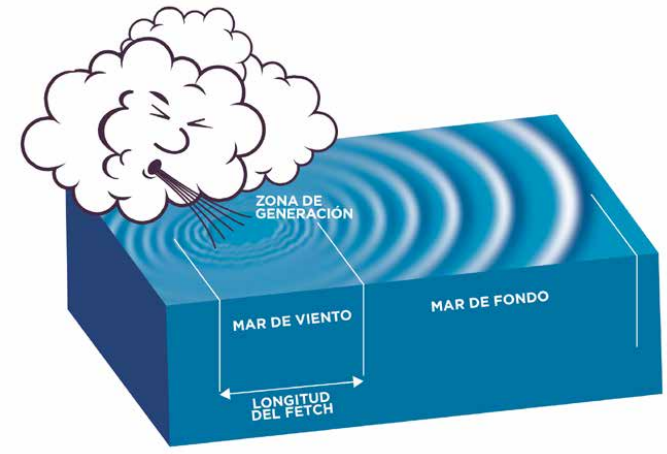


Figura 2.17: Generación de oleaje por viento (Beyá et al., 2016)

lineales, como las de la Teoría lineal de Ayri 2.3.3. Pero cuando la ola se acerca al borde costero, una vez alcanzado el punto de quiebre o rotura, el flujo se vuelve completamente rotacional, por lo que la teoría de flujo potencial deja de ser válida (Bakhtyar et al., 2009a). Desde este punto hasta el punto máximo que alcanza el agua en tierra, se pueden distinguir dos regiones, la **surf zone** y **swash zone** (ver Figura 2.18).

Estas zonas, son y han sido de alto interés científico desde al menos la primera mitad del sigo XX (Shepard et al., 1941). Son regiones hidrodinámicamente muy activas, y juegan un rol primordial en la morfología de la costa pues conllevan un gran transporte de sedimentos. De esta forma, son las olas rompiendo, las grandes responsables de la eroción y acreción del borde costero.

Cuando el rompimiento de las olas ocurre, mucha energía se disipa a lo largo de la playa, y este fenómeno aún no es bien entendido por ingenieros y científicos (Balaji et al., 2019). Es por esto que para investigar estas zonas, se necesitan en conjunto la experimentación en terreno, mediciones en laboratorio y modelamientos numéricos.

A pesar de que las mediciones en laboratorio tienen sus limitaciones producto de lo acotado de las circunstancias en comparación con las de una medición en terreno. La data obtenida resulta ser la más confiable para procesos de investigación y para validar modelos (Bakhtyar et al., 2009a). Las mediciones en terreno significan un desafío tremendo debido a la dificultad en la obtención de información robusta, la variabilidad de las condiciones meteorológicas, y los costos asociados al despliegue de equipos (Balaji et al., 2019).

Aún así, es importante no abandonar el desafío de la medición en terreno, pues cada ecosistema tiene características propias y únicas relativas a la morfología y a la composición de las aguas y sedimentos. Como se menciona en 3.1, las pruebas

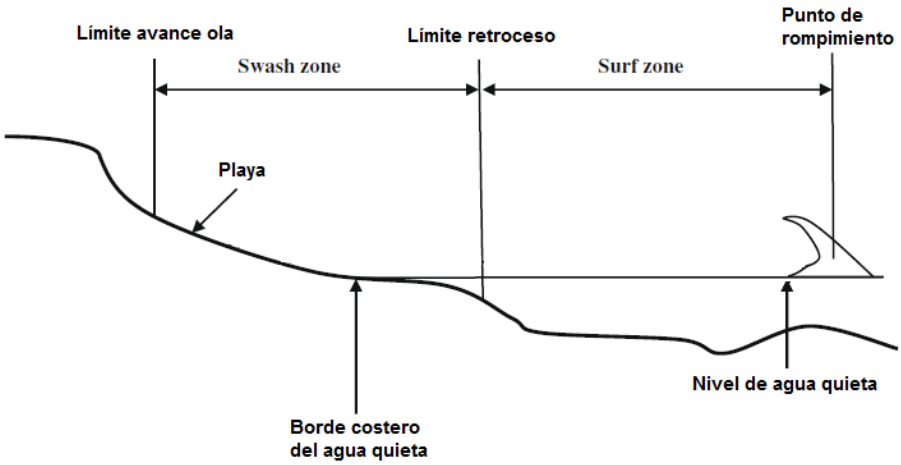


Figura 2.18: Ilustración esquemática de la *swash zone* y *surf zone* (Bakhtyar et al., 2009a)

asociadas al proyecto *Wasserdrachen* se han llevado a cabo en una canal de olas natural. Las características propias del *Canal de Pruebas de Punta Curaumilla* ofrecen una oportunidad de experimentación en terreno más simple de abordar.

2.3.2. Enfoques en la observación y descripción de un fluido

Una vez entendida la importancia de realizar experimentación en terreno, cabe preguntarse qué enfoque dar a la observación de la data oceánica. Existen dos enfoques clásicos para abordar la observación de un fluido, el enfoque *Euleriano* o el enfoque *Lagrangiano*.

El enfoque Euleriano ofrece una forma de observar el movimiento de un fluido en que las características del mismo se describen en función de su posición en el espacio y el tiempo. De esta forma, la información se obtiene a partir de puntos fijos en el espacio por donde fluye el fluido. Este enfoque, puede asociarse al interés por obtener una fotografía de las características del fluido (como la velocidad, densidad y presión) a cada instante y en cada punto del espacio. Por ejemplo, la componente **u** de la velocidad de flujo, se representa como función de la posición **x** y el tiempo t, es decir, $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathrm{t})$.

El enfoque Lagrangiano, por su parte, ofrece una forma de observar el fluido en la que se persiguen porciones individuales de fluido a través del tiempo. Así las cantidades físicas propias del fluido se relacionan a porciones identificables de materia. Estos elementos se *nombran* o *etiquetan* según la posición inicial de su centro de masa $\mathbf{x}_0$ (vector independiente del tiempo). Cabe notar que los elementos materiales del fluido cambian su forma mientras se mueven. Entonces, considerar el centro de masa del mismo, como parámetro de descripción es una forma de tener en cuenta los efectos de esta deformación. Finalmente, de esta forma es posible identificar el historial dinámico del elemento seleccionado.

Por ejemplo, cuando se mide la presión de flujo en un laboratorio, el sensor está fijo en una posición específica $(\mathrm{x}, \mathrm{y}, \mathrm{z})$. Así, la información entregada contribuye a una descripción euleriana del campo de presión $\mathrm{p}(\mathrm{x}, \mathrm{y}, \mathrm{z}, \mathrm{t})$. Para simular una medición con un enfoque lagrangiano, el sensor de presión tendría que moverse con la corriente a la velocidad de las partículas de fluido; esto a veces se hace en mediciones oceanográficas con sistemas como los descritos en 3.3.1.

A su vez, el enfoque en la descripción y análisis del movimiento de un fluido, se puede clasificar en terminos de la escala de observación. Por un lado, se puede optar

por un enfoque diferencial, es decir, que persiga describir en detalle el patrón de flujo en todos los puntos del campo. Y por otro, trabajar con una región finita, o volumen de control, donde se pueden realizar balances de flujo de entrada versus flujo de salida, y determinar los efectos brutos del flujo, tales como la fuerza o el toque sobre un cuerpo, o el intercambio total de energía.

De esta forma, como se verá en los capítulos siguientes, el sistema de sondeo propuesto, considera un enfoque de medición euleriano, pues pretende encontrar información útil del flujo marino, a partir de la tensión de las cuerdas que soportan un elemento fijo en el espacio, cuyo volumen de control es conocido, con la intensión de obtener información útil relacionada a la dinámica del mismo.

2.3.3. Historia sobre Descripción y Análisis del Oleaje

A continuación se hace una revisión general de los modelos existentes utilizados en la descripción del oleaje. Se busca complementar la bibliografía para el proyecto CERTES, y comprender la motivación por generar alternativas de medición en aguas someras y el borde costero. Esto último pues los principales modelos descritos a continuación responden al estudio de aguas profundas.

El lenguaje utilizado para la descripción básica del oleaje se presenta en la tabla 2.2, así como su descripción gráfica en 2.19.

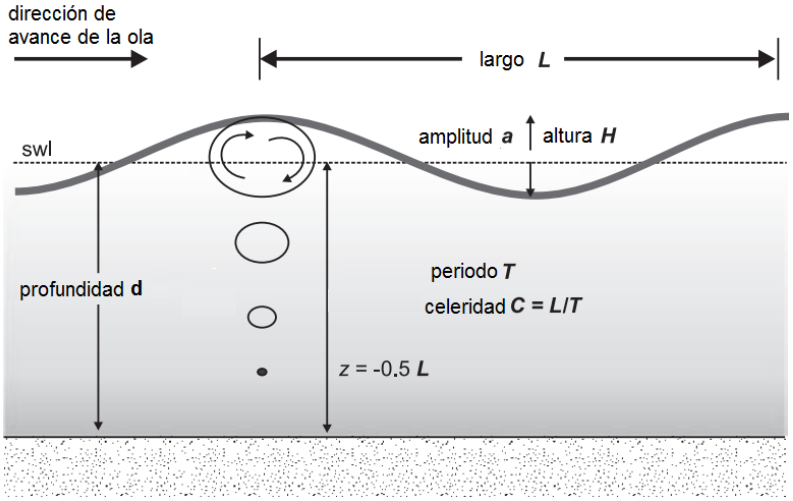


Figura 2.19: Definición Gráfica de las características principales de una ola. Nomenclatura en tabla 2.2

Cuadro 2.2: Nomenclatura asociada a la descripción de una ola

Símbolo	Nombre	Descripción
	Cresta	Parte más alta de la ola
	Valle	Parte más baja de la ola
swl	Nivel de agua quieta (*still water level*)	Superficie del agua en ausencia de olas
H	Altura	Distancia entre cresta y valle
a	Amplitud	Distancia desde la cresta o valle al *swl*
L	Largo	Distancia entre dos crestas sucesivas
T	Periodo	Tiempo entre dos crestas sucesivas
f	Frecuencia	$1/\mathrm{T}$
σ	Frecuencia Angular	$2\pi/\mathrm{T}$
c	Celeridad	Velocidad de una única ola
k	Número de Onda	$2\pi/\mathrm{L}$
ξ	Elevación del nivel de agua (*Water surface Elevation*)	Elevación del agua definida según distancia (x) y tiempo (t)
d	Profundidad	Distancia desde el *swl* hasta el fondo marino
z	Distancia bajo el *swl*	$\mathrm{z} = -\mathrm{h}$ en el fondo marino
h	Profundidad local	$\mathrm{h(x)} = \xi(\mathrm{x}) + \mathrm{d(x)}$

Primeros Modelos

Cabrera Fernández (2017) en su trabajo de título, revisa la **Teoría Lineal de Airy** (1845), también conocida como *Teoría de Onda Lineal* o de *Pequeña Amplitud*. Este es el modelo de oleaje más simple, y sus ecuaciones se obtienen integrando los principios de conservación de masa y momento bajo los siguientes supuestos:

- La onda es regular y bidimensional, es decir, no varía en el tiempo ni en el espacio.
- El fluido es imcompresible, su densidad es constante.
- Se pueden despreciar la tensión superficial, el efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra, y los efectos debidos a la viscosidad.
- La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- El flujo es irrotacional, no existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino.
- El fondo marino constituye un límite horizontal, fijo e impermeable.
- La amplitud de onda es pequeña con respecto a la longitud de onda y el fondo.

Esta teoría entrega ecuaciones que describen la velocidad del fluido y la altura de la superficie libre. Ambas en el tiempo y el espacio con respecto a la frecuencia del oleaje. A partir de esto, es posible definir conceptos como la celeridad de onda, y las ecuaciones del movimiento orbital de las partículas. Este último implica un nulo transporte de sedimentos que se ve representado gráficamente en la figura 2.19.

Pero esta teoría es insuficiente cuando se habla del mar de viento *sea*, es decir, en las zonas de generación, donde es necesario considerar los efectos de la viscosidad del agua y el roce con la viento atmosférico.

También se vuelve insuficiente en zonas cercanas al borde costero donde la amplitud de la ola no puede considerarse lo suficientemente pequeña en comparación con la profundidad del fondo marino. Para estos casos se desarrollan las *Teorías no Lineales* de **Stokes** (1847), para aguas profundas, y **Cnoidal** (1895) para aguas someras. Ambas también descritas en el trabajo de Cabrera Fernández (2017).

En términos generales, estas teorías describen ondas con elevaciones de cresta mayores que la depresión de sus valles con respecto al punto medio; y a su vez, considera un largo de los valles mayor al de las crestas. A diferencia de las ondas de Ayri, donde la elevación de las crestas y la depresión de los valles respecto del nivel medio es el mismo.

Otro aspecto importante de las descripciones no lineales, es que consideran trayectorias de partículas que se vuelven cada vez más elípticas al disminuir la profundidad del fondo marino, en consecuencia se produce un pequeño transporte neto de masa.

Análisis Espectral: Modelos de 2° y 3° generación

Las técnicas de análisis en el dominio frecuencial reciben, en general, el nombre de técnicas de análisis espectral, y sus fundamentos básicos pertenecen al *análisis de Fourier*. La idea básica sobre la que se apoya este tipo de análisis considera una función $\eta(t)$ que se puede expresar como combinación lineal de un conjunto de funciones $\beta_i(t)$, esto es:

$$\eta(t) = \sum_i \Gamma_i \beta_i(t) \tag{2.3.1}$$

La ecuación 2.3.1 define un conjunto de cantidades en función de Γ, que muestra la importancia relativa de cada β_i para generar $\eta(t)$ mediante una combinación lineal. De esta forma, el análisis espectral permite descomponer fenómenos, y entender cómo cada una de estas componentes elementales contribuyen a la totalidad de un proceso. Las funciones β_i serán del tipo $\sin$ y $\cos$, y los valores de Γ_i corresponden a sus amplitudes.

Esta idea fue incialmente aplicada al siguiente modelo de oleaje propuesto por Pierson y Marks (1952):

$$\eta(x, y, t) = A\cos[K(x\cos\theta + y\sin\theta) - \omega t + \varphi] \tag{2.3.2}$$

Donde A es la amplitud de onda, K es el módulo del vector número de onda, ω la frecuencia angular, φ el ángulo de fase, y θ la dirección de propagación de la onda progresiva respecto al eje x positivo.

Utilizando las herramientas que entraga el *análisis de Fourier* (las cuales no serán estudiadas), la ecuación 2.3.2 puede representarse de forma discreta como

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} A_{mn}\cos(K_m x\cos\theta_n + K_m y\,\mathrm{sen}\,\theta_n - 2\pi f_m t + \varphi_{mn}) \tag{2.3.3}$$

siendo f la frecuencia lineal; A_{mn} la amplitud y φ_{mn} la fase de las componentes.

Además, al introducir el concepto de **espectro direccional** del oleaje, $S(f, \theta)$, que se entiende como la densidad de energía expresada en función de la frecuencia f y la dirección θ. Y definendo la relación entre el espectro direccional y el **espectro unidereccional** como

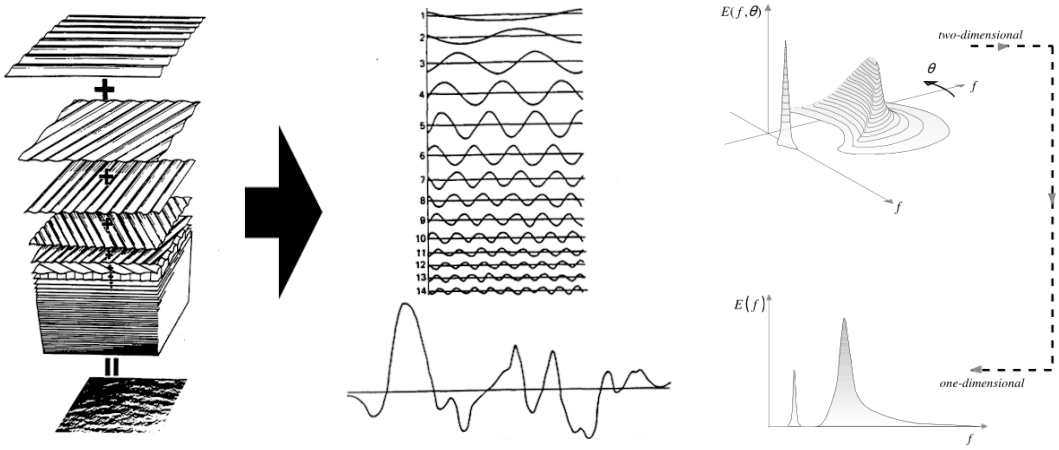
$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta)d\theta \tag{2.3.4}$$

es posible reescribir la ecuación 2.3.3 como

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^{\infty}\sqrt{2S(f)\Delta f}\cos(2\pi f_m t + \varphi_m) \tag{2.3.5}$$

Obteniendo de esta manera un *modelo de oleaje unidireccional*, que reduce la representación de los desplazamientos verticales de la ecuación 2.3.2, a una superposición de ondas cosenoidales con un contenido energético igual al del proceso real, pero sin discernir entre las diferentes direcciones con que dicha energía se aproxima al punto donde se analiza el fenómeno. Esto se representa gráficamente en la figura 2.20.

El estudio de esta simplificación lleva al planteamiento de modelos empíricos de oleaje del tipo *frecuencial escalar*, aplicables a condiciones oceánicas específicas, conocidos como **Modelos de Segunda Generación**. El más simple es el denominado **Pierson-Moskowitz** (1964). Este asume que las olas eventualmente alcanzarán un equilibrio con el viento si este sopla de forma estable por un tiempo y un área lo suficientemente grandes. Es decir, es aplicable para el mar de fondo *swell*, con oleajes



(a) Elaboración propia a partir de Rodríguez Rodríguez (1995)

(b) Fuente: The SWAN team (2019)

Figura 2.20: Dos representaciones gráficas de la relación entre un modelo de oleaje direccional (bidimensional) y un modelo frecuencial escalar (unidimensional)

completamente desarrollados de aguas profundas, y se define como

$$S_{\mathrm{PM}}(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^2} f^{-5} exp\left[\frac{-5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^4\right] \tag{2.3.6}$$

donde α es el parámetro de Phillips $(0{,}0081)$; g es la aceleración de gravedad $(9{,}8[m/s^2])$; y f_p es la frecuencia de pico $[Hz]$

Otro modelo muy popular, es el denominado **JONSWAP** (Joint North Sea Wave Project), desarrollado por Hasselman en 1974. Este modelo incorpora un factor γ de intensificación de pico. Es aplicable a entornos con *fetch* más reducido, donde el oleaje nunca se encuentra completamente desarrollado. En otras palabras es aplicable para el mar de viento *sea*. Se define como

$$S_{\mathrm{J}}(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^2} f^{-5} \exp\left[\frac{-5}{4}\left(\frac{f}{f_p}\right)^4\right] \gamma^{\exp\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right]} \tag{2.3.7}$$

La discretización de estos modelos, y su cálculo automático se logra mediante distintas técnicas. En 1965 Cooley y Turkey proponen el famoso algoritmo computacional conocido como la **Transformada Rápida de Fourier** (TRF ó FFT), que reduce significativamente el cálculo de la *Transformada de Fourier* de series largas de datos.

Desde la década de los ochenta, se popularizaron los llamados *Métodos Paramétricos*. Técnicas basadas en la caracterización de los procesos estocásticos mediante el ajuste de modelos lineales, autorregresivos (**AR**), de media móvil (**MA**), o combinaciones de

ambos (**ARMA**).

Durante la década de los 90, surgen una serie de modelos avanzados de viento-oleaje, conocidos como **modelos de tercera generación**:

- WAM (WAMDI Group, 1988)
- WAVEWATCH III (Tolman, 1991)[4]
- TOMAWAC (Benoit et al., 1996)
- SWAN (Booij et al., 1999)

Usualmente estos modelos utilizan la notación $E(\sigma, \theta)$ en lugar de $S(f, \theta)$ para la densidad de energía; y determinan la evolución de la densidad de acción $N(\mathbf{x}, t; \sigma, \theta)$, que se define como $N = E/\sigma$.

Esto lo hacen resolviendo la ecuación de equilibrio de acción espectral (ecuación 2.3.8), sin restricciones *a priori* en el espectro para la evolución del crecimiento de las olas. Esta ecuación gobierna la razón de cambio de la densidad de acción N, y se escribe como sigue:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \left(\frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} \right) + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{\text{tot}}}{\sigma} \tag{2.3.8}$$

El lado izquierdo representa las componentes cinemáticas de la ecuación. El segundo término (entre paréntesis), denota la propagación de la energía de la ola en un espacio Cartesiano bidimensional donde c es la celeridad de la ola. El tercer término, representa el efecto del cambio de la frecuencia debido a variaciones en la profundidad y corrientes importantes. El cuarto término representa la refracción inducida por el fondo y por corrientes. Las cantidades c_σ y c_θ son las velocidades de propagación en el espacio espectral (σ, θ). Por su parte, el lado derecho, representa las fuentes y sumideros espacio-temporalmente variables de todos los procesos físicos que generan, disipan o redistribuyen la energía de las olas. Como lo son el crecimiento del oleaje debido viento, transferencia no lineal de energía por la interacción entre tres y cuatro olas, y el decrecimiento del oleje por *white-capping*[5], roce con el fondo marino, y rotura de la ola debido a la profundidad.

[4] Utilizado en en la construcción del Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016)

[5] *White-capping* es el término utilizado para referirse a la rotura de la ola producto de la inclinación de la misma. Este fenómeno ocurre en aguas profundas cuando la altura de la ola se vuelve muy grande en comparación con la longitud de la misma.

Machine Learning

El *Machine Learning*, se entiende como una rama de la *Inteligencia Artificial*. Y puede definirse como el estudio científico de algoritmos, cuyo input es la llamada *training data*, con el fin de realizar predicciones y tomar decisiones sin ser programada explícitamente para lograr una tarea específica. El estudio teórico de este tipo de algoritmos se remonta a los 50s, pero no es hasta los 90s que comienzan a aplicarse en el análisis de grandes cantidades de data.

El uso del *machine learning* comienza a ligarse al estudio de las condiciones de oleaje en los 2000. De forma paralela, con el crecimiento de la capacidad de computo, la llamada *Tercera Generación* de modelos de oleaje se masifica.

Estos modelos de simulación computacional de alta fidelidad demandan una gran capacidad de computo. Lo que se vuelve una limitación para los sistemas de predicción a tiempo real. En base a esto, James et al. (2018) propone un marco de trabajo en base a *machine learning* para predecir condiciones de oleaje. Esto con la intención de general un *meta modelo*[6] que reemplace técnicas de alta demanda computacional, basadas en modelos físico-matemáticos del oleaje, por la multiplicación directa de un vector de entrada. Esto gracias al mapeo de matrices resultantes de los modelos de *machine learning* ya entrenados.

En general, la mayor limitante para el desarrollo de aplicaciones desde el *machine learning*, es la tremenda cantidad de data necesaria para entrenar el algoritmo. Esto se puede resolver entrenando el modelo con los resultados obtenidos al ejecutar cientos de veces un modelo teórico de alta fidelidad. James et al. (2018) ordena los vectores de entrada obtenidos de cientos de ejecuciones del modelo de tercera generación **SWAN** (*Simulating Waves Nearshore*), basado en la ecuación de equilibrio de acción espectral 2.3.8. El modelo de *machine learning* utilizado para obtener la altura significativa de ola H_s es el llamado *multi-layer perceptron (MLP)*.

[6]Los *metamodels*, *model emulators*, *proxy models* o *surrogate models*, se definen como modelos alternativos que sustituyen un modelo original, cuyo costo computacional es significativamente más alto

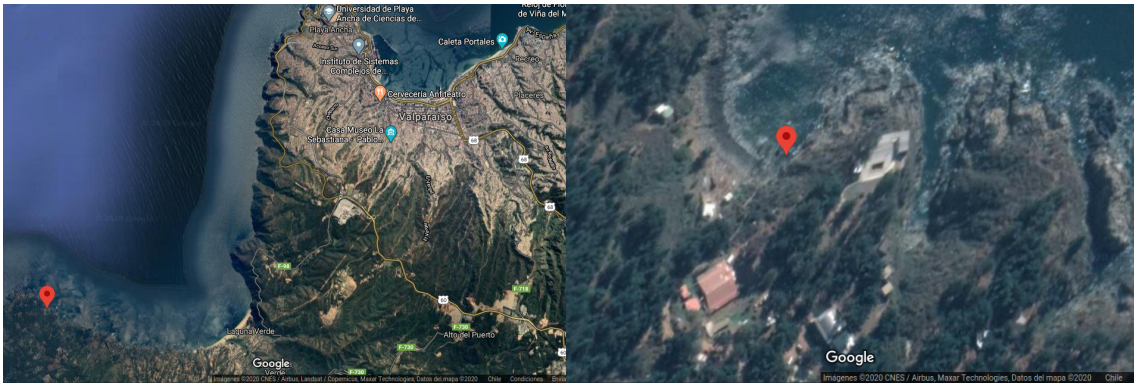
Capítulo 3

Levantamiento de Información

El siguiente capítulo recopila información necesaria para *«definir el problema»* de diseño del que se hace cargo este proyecto. Si bien la metodología de trabajo se explica en el Capítulo 4, es importante entender que todo proceso de diseño tiende a ser iterativo. Entonces, estudiar el problema antes de definirlo por completo, resulta indispensable para disminuir costos asociados a una etapa de prueba y error prolongada.

3.1. Lugar de Emplazamiento

El canal de olas natural utilizado para las pruebas de este proyecto queda ubicado en Punta Curaumilla, aproximadamente a unos 12 kilómetros al suroeste de la ciudad de Valparaíso, región de Valparaíso, Chile. Las figuras 3.1 y 3.2 muestran respectivamente,



(a) Vista relativa a zonas urbanas de Valparaíso y Laguna Verde.

(b) Detalle de la Bahía de Punta Curaumilla.

Figura 3.1: Ubicación Canal Natural de Olas de Punta Curaumilla.
Latitud 33.093875 °S
Longitud: 71.721891 °O

una vista satelital del lugar, y una fotografía del canal a nivel del mar.

El sector está catalogado como zona rural, debido a su baja densidad poblacional. Está formado por acantilados de gran elevación, en promedio de 200 [msnm]. Se trata de una zona de gran biodiversidad. Los fuertes vientos arrastran una gran cantidad de nutrientes hasta el borde costero, los cuales son aprovechados por la abundante fauna, desde moluscos y crustáceos, hasta aves pelágicas y migratorias.

La devastación del borde costero producto del extractivismo desmedido, ha llevado a empresas como Marine Farms S.A., dedicadas a la comercialización de crustáceos y moluscos, a instalar, fuera del mar, piscinas artificiales alimentadas por agua marina. Esto como una medida para minimizar el impacto sobre el ecosistema marino. A pesar de esto, el suministro de agua marina se realiza mediante una bomba centrifuga con motor diesel. Siendo este último el sistema que Englisch (2018) y Cabrera Fernández (2017) buscaron reemplazar.



Figura 3.2: Canal natural de olas utilizado como centro de pruebas en Punta Curaumilla. Arriba a la derecha se observa la caseta de resguardo de la bomba centrífuga de Marine Farms S.A.

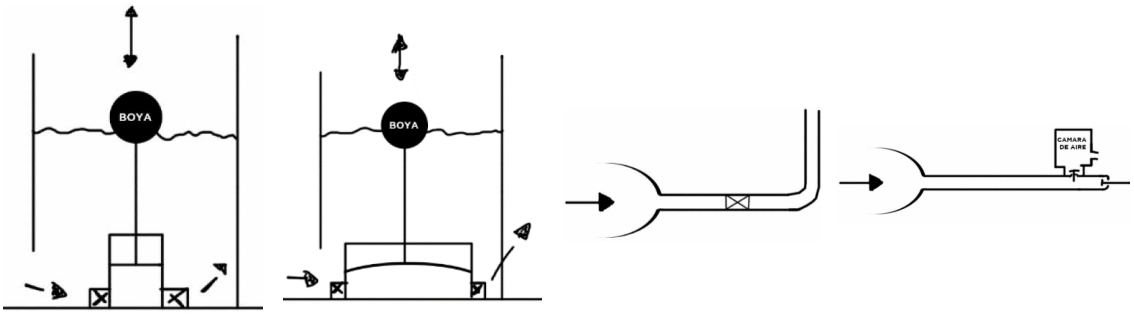
3.2. Estado del Proyecto

El Centro Educativo Regional de Tecnología y Energía Renovables (CERTES), nace al reconocer la necesidad de acercar el conocimiento y el estudio de la sustentabilidad energética de forma oportuna y temprana a la comunidad. Pretende conformarse como un observatorio pedagógico virtual sobre tecnologías sustentables y energía renovable, integrando programas educativos tanto escolares como universitarios, así como distintas organizaciones de la región.

A la fecha el centro se conforma como una sumatoria de proyectos independientes. Pablo Campos, en su trabajo de título (véase Campos (2019)), hace una revisión rápida de estos subproyectos. Los que están ligados a tecnologías de desalinización de agua marina por medio de energía solar; a estudios y evaluaciones de energía eólica; y a tecnologías de bombeo de agua marina por medio de energía undimotriz.

Es en el contexto de esta última que se reconoce el agua marina como un recurso que puede abastecer de agua potable a comunidades costeras, en conjunto a la utilización de desalinizadores solares. Además, se reconoce la creciente sobre explotación del borde costero, y junto a ella la aparición cada vez más común de granjas marinas que utilizan el agua para abastecer sus criaderos de moluscos y crustáceos.

Eliecer Cabrera, en su trabajo de título (véase Cabrera Fernández (2017)), realiza una revisión extensa de esta situación y del estado del arte del aprovechamiento de la energía undimotriz. Su investigación lo lleva a comparar cuatro sistemas de bombeo que se subdividen en dos principios: la *Columna de Agua Oscilante* (también conocido como OWC - Oscillating Water Column) y el *Comeolas*, cuya descripción gráfica puede verse en Figura 3.3.



(a) OWC con boya tipo pistón

(b) OWC con boya tipo diafragma

(c) bomba comeolas

(d) Comeolas con bomba de ariete

Figura 3.3: Comparación esquemática de los conceptos de bombeo propuestos por (Cabrera Fernández, 2017).

Eliecer decide investigar más a fondo los sistemas bajo el principio del *comeolas*

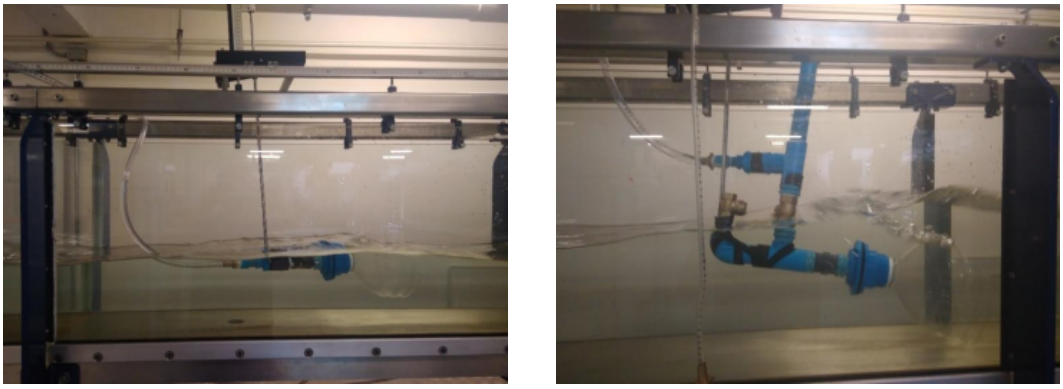
producto de los buenos resultados obtenidos en la ponderación relativa que se muestra en la Tabla 3.1.

Cuadro 3.1: Tabla de Ponderación de Alternativas Cabrera Fernández (2017)

	Originalidad	Costos	Dificultad de Construcción	Confiabilidad	Impacto Ambiental	Ponderación
OWC de boya con pistón	1	1	2	1	1	6
OWC de boya con diafragma	3	2	1	3	2	11
Bomba de Ariete Marina	4	3	3	2	3	15
Comeolas	2	4	4	4	4	18

Se diseñaron prototipos a escala para ambos conceptos de comeola, los que finalmente fueron probados en un canal de olas (ver fig 3.4). Eliecer concluye al respecto lo siguiente:

- *"El dispositivo comeolas puede ser una alternativa interesante de generación eléctrica mediante una turbina al aumentar el diámetro del ducto principal en sectores de emplazamiento como muelles y formaciones rocosas"*
- *"La bomba de ariete marino presentada en esta memoria presenta grandes dificultades en su emplazamiento geográfico para el bombeo de agua, aunque de todas maneras puede ser una solución interesante de abastecimiento de agua para caletas, muelles e islotes con un caudal máximo alcanzable de 288 metros cúbicos diarios a 25 metros de altura"*

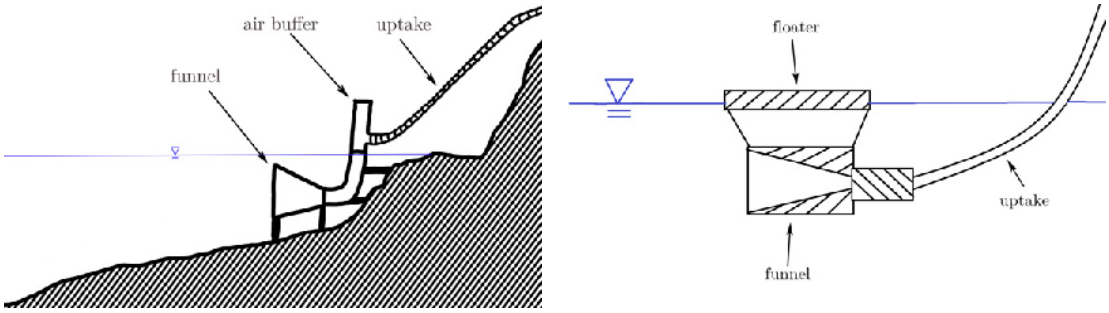


(a) Comeolas con *check valve* **(b)** comeolas con bomba de ariete

Figura 3.4: Ensayos en canal de olas para ambos prototipos de comeolas. (Cabrera Fernández, 2017).

Considerando estas conclusiones, Phillip Englisch continúa la investigación, y se hace cargo del diseño de un prototipo de tamaño real, de bajo costo y fácil construcción e implementación. En su *Bachelortesis* (véase Englisch (2018)) documenta el proceso y hace una revisión más extensa del trabajo de Eliecer.

Phillip analiza dos conceptos de captación de ola, uno fijo y otro flotante (ver figura 3.5). Una ventaja del sistema fijo 3.5a, es la carencia de partes móviles. Pero implementar



(a) Concepto comeolas fijo **(b)** Concepto comeolas flotante

Figura 3.5: Comparación de Conceptos Fijo y Flotante (Englisch, 2018).

y asegurar adecuadamente un sistema que esté continuamente bajo el impacto de las olas es una tarea muy compleja. Por otro lado, una ventaja importante del sistema flotante 3.5b, es la posibilidad de sacarlo del agua en situaciones peligrosas o extremas como tormentas. Es por esto que finalmente termina desarrollando el sistema flotante.

De esta forma, Phillip diseña y construye un *comeolas* a partir de un barril de PVC y una lámina de metal en forma de embudo, que conecta con una válvula antirretorno y una manguera. En sus palabras, "Para establecer la tonalidad y la vibra del proyecto, el prototipo es llamado *Wasserdrachen*, por su forma de flotar en el agua". El modelo CAD del prototipo final puede verse en la figura 3.6.

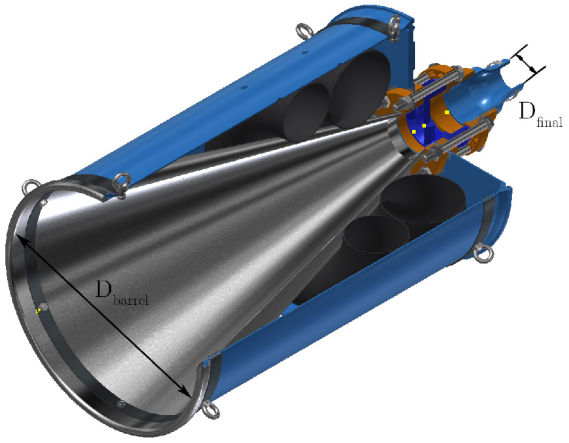
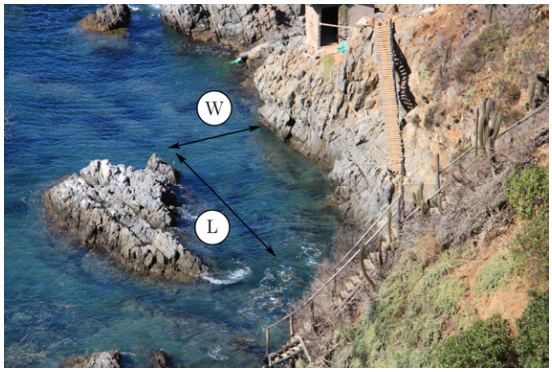


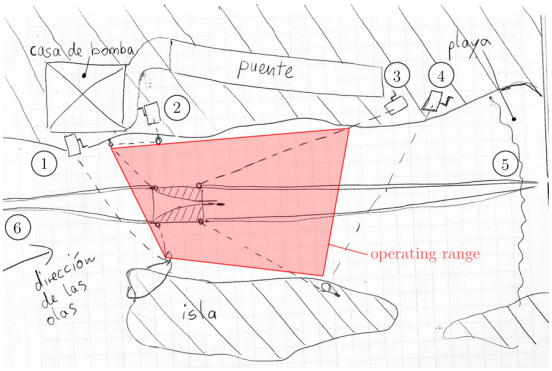
Figura 3.6: Vista en corte del modelo CAD del Wasserdrachen

Uno de los principales retos fue diseñar el sistema de anclaje y posicionamiento del *Wasserdrachen*. La solución propuesta consta de un sistema de huinches, cables y lingas que, desde la roca, afirman el comeolas y lo ubican dentro de la zona de operación. El canal de olas natural y la esquemática del sistema de anclaje pueden verse en figura 3.7

Así, el *Wasserdrachen* es construido y probado en el canal de olas natural. El ensamble



(a) Lugar de implementación
L=15[m]
W=4.5[m]



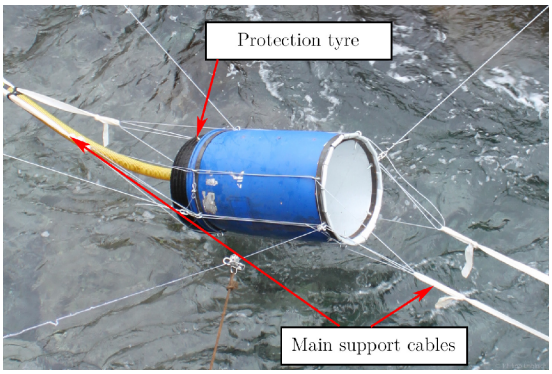
(b) Vista aérea esquemática del sistema de anclaje y su rango de operación. Se numeran del 1-4 los huinches de posicionamiento, y del 5 al 6 los cables de soporte principales.

Figura 3.7: Lugar de emplazamiento y esquemática del sistema de anclaje del *Wasserdrachen* (Englisch, 2018).

final puede observarse en la figura 3.8. Vale mencionar que es durante esta fase de prueba y observación, que se abstraen de su función de diseño, tanto al *comeolas* como a los huinches de posicionamiento. Y se comienza a entender el *Wasserdrachen* como un objeto inmerso en un medio dinámico-acuático, que se comunica con un operador inmerso en un medio estático-terrestre. Siendo los cables y los huinches anclados a tierra los elementos que conforman el canal de comunicación.



(a) Ensamble sin el neumático de seguridad y el arreglo de cables de posicionamiento y soporte.



(b) *Wasserdrachen* completamente ensamblado en maniobras de posicionamiento.

Figura 3.8: Ensamble completo del *Wasserdrachen* antes y después de su montaje (Englisch, 2018).

Con la vista de la figura 3.9, se comprende lo que implica la comodidad de observar, e incluso medir, la dinámica de un objeto sumerjido en el mar, desde tierra firme. Y, más allá de la capacidad de bombeo lograda con el *Wasserdrachen*, se decide seguir con la línea de diseño de anclaje planteada por Phillip para diseñar un sistema de sondeo del oleaje.

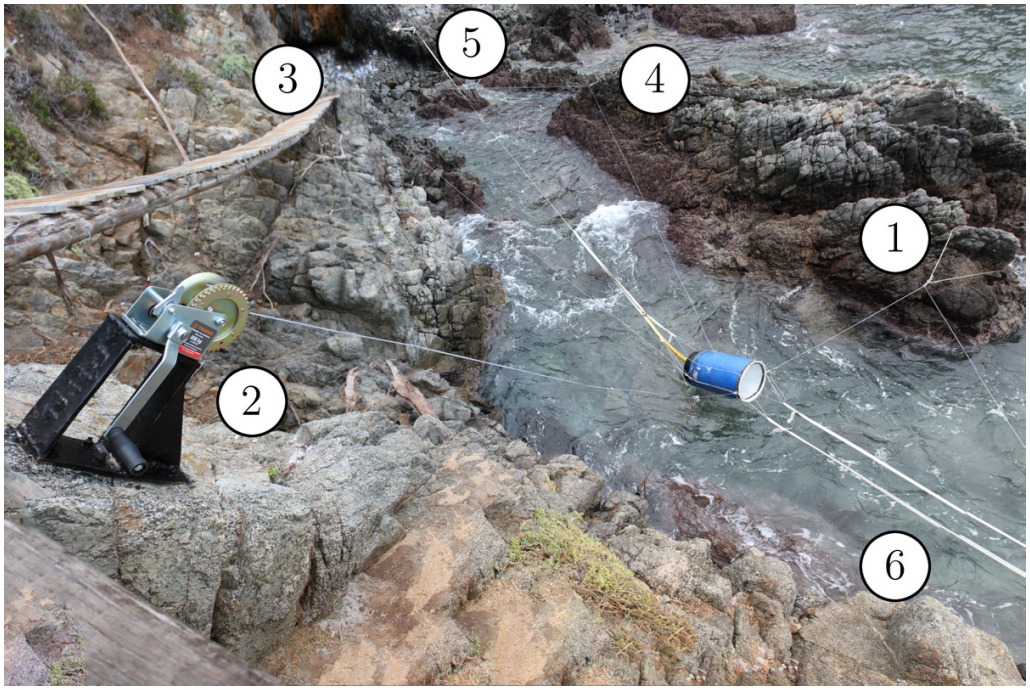


Figura 3.9: Vista general del *Wasserdrachen* y sus puntos de anclaje

3.3. Estado del arte en tecnologías de medición

3.3.1. Instrumentos asociados a medición de oleaje

Aguas Profundas

Nota La información presentada en este ítem de aguas profundas fue extraída del Anexo 4 del informe técnico final del proyecto "*Catastro del Recurso Energético Asociado a Oleaje para el Apoyo a la Evaluación de Proyectos de Generación Undimotriz*"(código 09CN-145718), cuya lectura se recomienda a toda persona interesada en el desarrollo de alternativas energéticas sustentables. Este proyecto fue adjudicado por Innova Chile de CORFO en el concurso de I+D Precompetitiva el año 2009. Desarrollado por HydroChile, el Instituto Nacional de Hidráulica (INH), la Pontifica Universidad Católica de Chile (PUC), la Universidad Técnica Federico Santamaría (UTFSM), la Universidad de Valparaíso (UV), PRDW Aldunate Vásquez y la Dirección de Proyectos de la Armada de Chile (DIPRIDA).

Las mediciones de oleaje en aguas profundas se realizan comúnmente mediante el uso de boyas, las que permiten obtener una descripción espectral 2D (dominios de frecuencia y dirección) de los estados de mar. Entre las boyas más utilizadas a nivel nacional se encuentran los modelos Triaxys y Watchkeeper de Axys Environmental Systems, y Waverider de Datawell.

La boya direccional de oleaje TRIAXYS es un instrumento de precisión diseñado y fabricado por Axys Environmental Systems. La boya TRIAXYS incorpora tecnologías que la convierten en una herramienta de fácil utilización, robusta y económica. La boya es utilizada para obtener mediciones in-situ del oleaje direccional (Densidad espectral del oleaje) con una alta precisión. Para la obtención de estas mediciones la boya TRIAXYS está compuesta por los siguientes sensores:

- Tres acelerómetros.
- Tres giroscopios.
- Un compás fluctuante.
- GPS
- Reloj

Además, su CPU consta de un procesador de baja potencia (Watchman, diseñada por AXYS Environmental Systems) el que asegura la autonomía y la eficiente descarga y transmisión de los datos de modo de optimizar el uso de recursos desde el punto de

vista energético. La alimentación de electricidad es por medio de 10 paneles solares que alimentan a 4 baterías de 13 Volt instalas al interior de la boya (Figura 3.10).



Figura 3.10: Boya TRIAXYS separada por componentes.

El software de procesamiento de datos de oleaje direccional utiliza un algoritmo iterativo, basado en el análisis de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). El software procesa los movimientos registrados correspondientes a los ángulos de balance (Roll), cabeceo (Pitch) y guiñada (Yaw), así como las aceleraciones en las 3 direcciones principales (Figura 3.11).

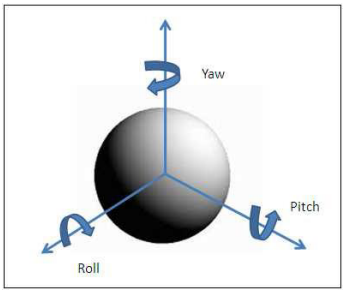


Figura 3.11: Movimientos que afectan a la boya.

Las boyas Triaxys poseen múltiples sistemas de transmisión de datos, los que no serán detallados, pues se escapan del alcance de esta tésis. Pero se reitera la recomendación de lectura del informe ya mensionado, pues la telemetría es un área fundamental de desarrollo en proyectos de este tipo, donde se necesite transmitir datos de mediciones remotas.

Aguas Someras

Uno de los instrumentos más populares para la medición de oleaje en aguas someras o poco profundas , son los Perfiladores Acústicos o ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) (ver Figura 3.12. Cuyo principio de medición es el mismo que el de los radares portátiles utilizados por la policía para medir la velocidad de vehículos motorizados.

Los ADCP pueden montarse tanto en boyas como en el fondo marino. Desde aquí, emiten ráfagas de sonido, de forma que al analizar los ecos, es posible:

- Generar un Perfil de Corriente, es decir, medir la velocidad y dirección de las corrientes de agua a distintos niveles. Esto es posible pues el sonido choca con las partículas que arrastra la corriente marina, las cuales se asume viajan a la misma velocidad que esta.
- Generar una distribución espacial de sedimentos o el plankton transportado por el agua.
- Medir la velocidad del ADCP con respecto al suelo y generar una trayectoria. Esto se conoce como mediciones de fondeo, y se logran montando el instrumento en la superficie marina, apuntando hacia abajo.
- Medir profundidad o altura de columna de agua (en conjunto con sensor de presión). Esto se puede hacer tanto montando el instrumento en la superficie como en el fondo marino. Esta última ofrece una forma interesante de medir las olas de la superficie.

En Chile, los principales proveedores son Teledyne RD Instruments, Nortel y Sontek. En el proyecto "*Catastro del Recurso Energético Asociado a Oleaje para el Apoyo a la Evaluación de Proyectos de Generación Undimotriz*", llevado a cabo entre 2011 y 2014, se utilizó el modelo WHSW600 de Teledyne RDI (ver figura 3.13)

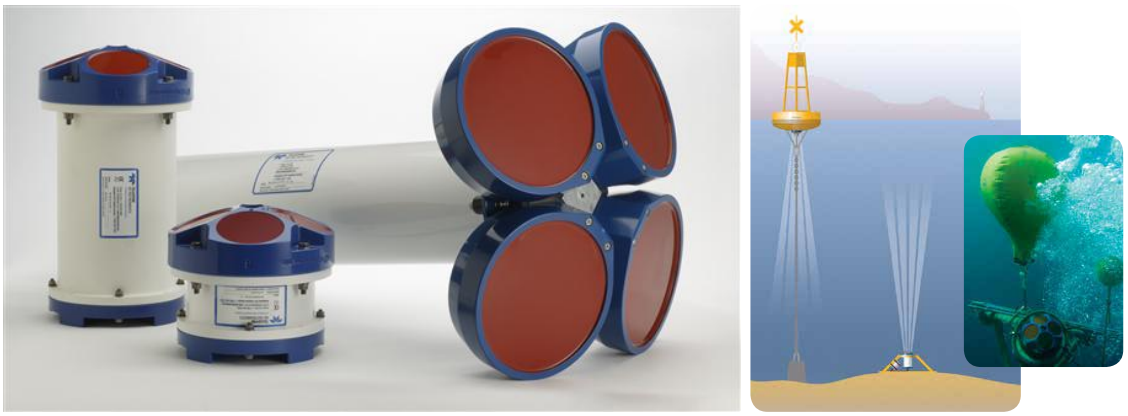


Figura 3.12: Distintos modelos de ADCP y esquematización de montaje.



Figura 3.13: Acoustic Doppler Current Profiler modelo WHSW600 de Teledyne RD Instruments.

Este modelo de ADCP es uno de los más populares a nivel mundial. De extrema precisión y exactitud en aguas someras con un rango de hasta 175m (en modelos de 300 kHz) y con un consumo eléctrico muy bajo, que lo hace ideal para series temporales de varios años. Es muy fácil de integrar en diversas plataformas, como boyas, embarcaciones y sobre el fondo. Posee una memoria interna de hasta 2 Gb la cual es capaz de registrar información de series de tiempo extensas (depende de cuanto sea la precisión que se necesite). También existe la posibilidad de enviar los datos a superficie vía modem (también modem inductivo) y/o cable, lo cual lo hace una muy buena herramienta al momento de necesitar información en tiempo real. Opcionalmente, permite su ampliación con un sensor de presión, con lo que en conjunto con el software WAVES, se puede operar como monitor de mareas y oleaje direccional (Directional Wave Gauge). También permite la posibilidad de monitorizar el fondo (batimetría) en modo 'bottom tracking'. (COR, 2014)

Swash and Surfzone

Como se explicó anteriormente en 2.3.1, los límites de la surf y swashzone son bastante difusos. De modo que su extensión y morfología varían de lugar en lugar. Es por esto que el método y la instrumentación utilizados para abarcar mediciones en estas zonas, dependerá de cada caso de estudio.

Por ejemplo, si se trata de un borde costero amplio y homogéneo, la surfzone tiende a estar bien definida, por lo que pueden utilizarse ADCPs en caso de que los requisitos de profundidad lo permitan y el estudio lo requiera.

Un caso de estudio como este se expone en (Balaji et al., 2019), donde se realizan mediciones en la localidad de Pondicherry, ubicada en la costa oeste de India. Se utiliza un arreglo de 10 GPS-drifters de bajo costo (ver Figura 3.14), que colectan información de forma continua a lo largo de las fases de flujo y reflujo de las mareas. Estas pruebas



Figura 3.14: GPS-drifters utilizados en Larson et al. (2004)

se repiten varias veces dentro de una zona de medición predefinida, con el fin de mejorar la resolución espacial de la maya de información sobre las corrientes. Además, dicha información fue contrastada con mediciones realizadas con ADCPs. Esta investigación, con un enfoque claramente Euleriano - se busca caracterizar los patrones del fluido punto por punto - presenta una alternativa interesante para la caracterización de las corrientes marinas en la surfzone.

Por otro lado, realizar mediciones en una zona altamente dinámica como lo es la *swash zone* es una tarea altamente compleja y difícil. Muchas de las investigaciones existentes se basan en mediciones de las oscilaciones en la orilla del mar. Para estos casos, las series de tiempo de la elevación de la superficie, usualmente se obtienen mediante wave gauges capacitivas o resistivas. Cualquiera sea el caso, es importante tener en cuenta que el espacio entre estos sensores, debe ser mayor a un mínimo para evitar interferencia. (Longo et al., 2002).

Mediciones en terreno de este tipo se presentan en Larson et al. (2004). En este estudio el interés se enfoca en la dinámica morfológica de la playa. Se analizan los datos obtenidos a partir de experimentos realizados en dos playas del Pacífico en Japón, con el fin de determinar la tasa neta de transporte de sedimentos y como responde a esto la playa. En la Figura 3.15 se puede observar el arreglo de medición montado, y cómo se disponen las wave gauges.

Por último cabe mencionar el estudio presentado en Stringari et al. (2019). Donde se describe un algoritmo para rastreo de oleaje en la *surfzone*, que utiliza visión por computador, detección de picos y técnicas de *machine learning*. La propuesta conceptual es similar a otros estudios en que se rastrean picos de oleaje en series de tiempo a lo largo de la dirección de propagación del oleaje. La diferencia radica en que este estudio utiliza información derivada a partir de imágenes de video costero (ver ejemplo en Figura 3.16). Aprovechando el hecho de que el color de la ruptura de la ola, es significativamente diferente al de las olas *no-rotas*, del agua calma, o la arena.



Figura 3.15: Fotografía del arreglo de medición montado por Larson et al. (2004)

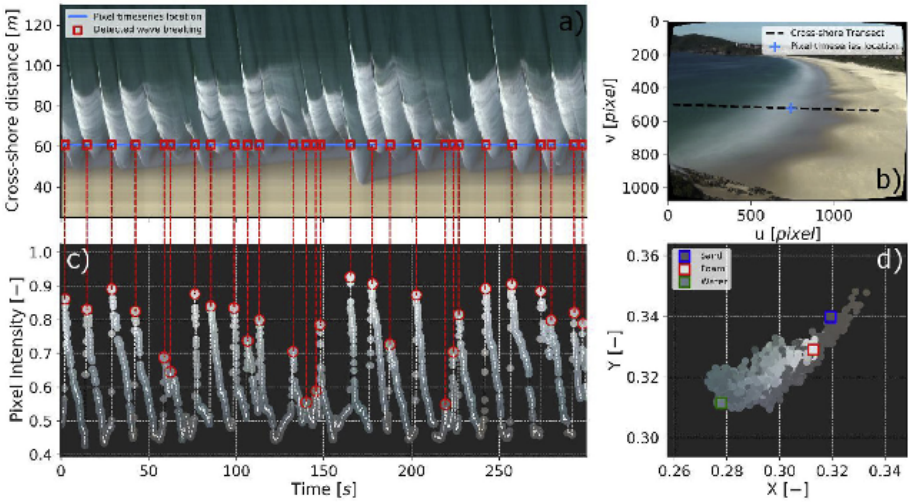


Figura 3.16: Ejemplo del proceso de detección de rompimiento del oleaje utilizado en Stringari et al. (2019)

3.3.2. Instrumentos asociados a medición de tensión

En el mercado existen un sin número de medidores de tensión. Los hay para mediciones bajo condiciones estáticas o dinámicas. De montaje fijo, para aplicaciones como el sistema de control de una línea de producción, o sistemas portátiles, pensados para mediciones puntuales y manuales. También existen para mediciones bajo condiciones controladas como laboratorios, o sistemas más robustos diseñados para exteriores. Los diseños varían según el tipo de cuerda, incluso existen para medición de tensión en cintas y correas. A continuación se hace una revisión de los principales modelos encontrados en el mercado.

Tensómetros de Alta Capacidad

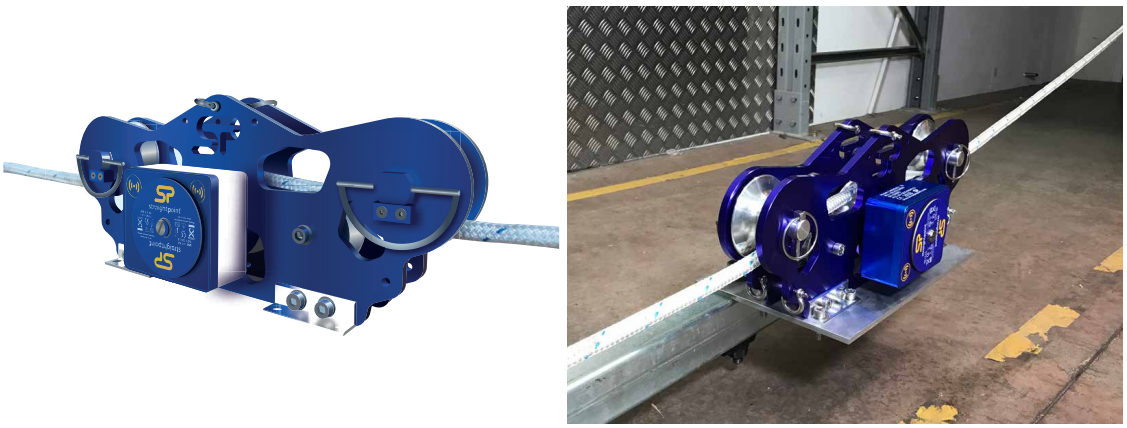


Figura 3.17: Tensómetro para cuerdas de *CableSafe*

En la figura 3.17 se presenta el tensómetro *CableSafe*, pensado para ser montado en línea con un sistema de winche cabrestante, y medir la tensión de cuerdas que están siendo desenrolladas del carrete por distintos motivos, permitiendo controlar la tensión de estas evitando que se vean sobre exigidas y se rompan.

Este instrumento es ideal para medir tensión al tirar cables eléctricos o de fibra óptica hacia el interior de sus conductos. Protegiendo ante fractura o elongación, ayudando a conservar la capacidad de transmisión de la línea, y evitando que se vuelva foco de incendios. También es aplicable a cuerdas sintéticas utilizadas para levantar estructuras delicadas que necesiten ser aseguradas por medio de cables a tierra, como es el caso de torres telefónicas u otros.

Además, el dispositivo tiene un sistema de protección que le permite trabajar bajo condiciones climáticas adversas. Y puede comunicarse con un smartphone vía bluetooth

para presentar la información a través de una interfaz gráfica. Otras especificaciones pueden verse en la Tabla 3.2

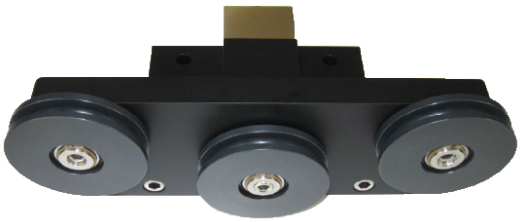
Este modelo es la principal fuente de inspiración en el diseño de este trabajo de título. El elevado costo del mismo, y la forma en que entrega la información hacen que se tome la decisión de fabricar un modelo propio que satisfaga las necesidades específicas del problema de diseño planteado. Por supuesto, no se descarta la posibilidad futura de adquirir un dispositivo similar a este para adaptarlo.

Cuadro 3.2: Especificaciones Técnicas para Tensómetro *CableSafe*

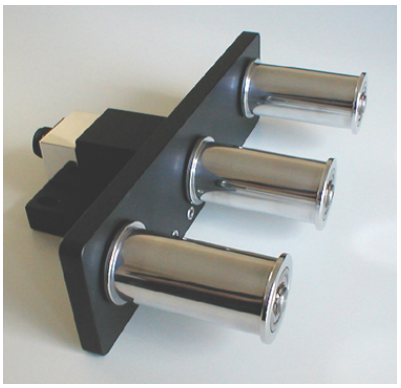
Precisión	$+/-2\,\%$ of Full Scale
Capacidad	1 t, 2 t, 5 t y 10 t
Resolución	0.01 t
Diámetro de Cuerda	4-19 mm *(Para diámetros de mayor tamaño se requiere calibración)*
Peso	4.5 kg
Duración Batería	500 h
Tipo Batería	4 x AA Alkaline
Temperatura de Trabajo	$-10°\mathrm{C}/+50°\mathrm{C}$
Alcance de Bluetooth	50m
Precio	$4700\mathrm{USD}-5500\mathrm{USD}$

Tensómetros para uso industrial y laboratorio

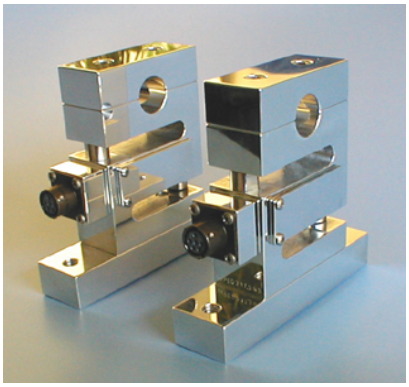
Los ejemplos presentados en la Figura 3.18 fueron recopilados del catálogo de *«Tension Measurement, inc»*. No se presenta información técnica específica, pues sólo se busca mostrar la variedad de configuraciones posibles.



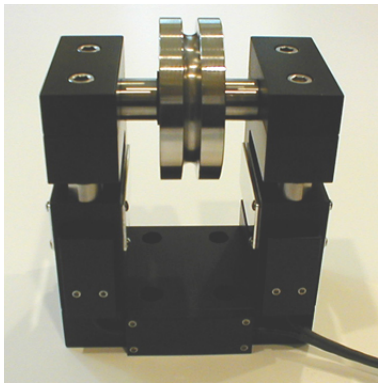
(a) modelo: MPHB
rango: 0-6000 g



(b) modelo: MPHB
rango: 0 - 100 lbs



(c) modelo: MPMB
rango: 0 - 500 lbs



(d) modelo: WPM
rango: 0 - 500 lbs

Figura 3.18: Ejemplos de distintos modelos de tensómetros de «*Tension Measurment, inc*»

En la industria existen configuraciones para distintos tipos y grosores de cuerdas, cintas o correas. Lo que implica rangos de medición también variados. Estos pueden ir de 0-100 g hasta 0-500 lbs, dependiendo del tipo de celda de carga utilizada.

Medidores de tensión portátiles

Este tipo de medidores suelen ser de alta precisión, por lo que están diseñados para un diámetro específico de cable o un tipo específico de correa. En la figura 3.19 se presentan tres ejemplos de tensómetros manuales utilizados para distintas aplicaciones.



(a) Para medir correas de polímeros plásticos utilizado en el embalaje de pallets, cajas y maletas.
Rango de trabajo desde 2-25 lb hasta 40-500 lb



(b) Para correas en V, correas dentadas y cables
Rango: 2 - 200 lb



(c) Para fibras, hilos y cables finos sometidos a baja tensión. Típicamente utilizado en la industria de tejido circular.
Rango: 0.5-100 cN y 1-200 cN

Figura 3.19: Ejemplos de tensómetros manuales y sus características básicas.

3.3.3. Instrumentos asociados a medición con strain gages

Como se comenta en la sección 2.1.5, el tratamiento de la señal de salida de un puente resistivo, es un paso sumamante importante para lograr la precisión deseada al realizar mediciones con srain gages. A continuación, se presentan dos ejemplos de equipos comerciales que facilitan esta tarea.

Strain Indicator and Recorder

El Indicador y Grabador de Esfuerzos Modelo P3 de *Vishay Micro-Measurments* que se muestra en la figura 3.20, es un instrumento de precisión portable, pensado para ser usado tanto con strain gages resistivas y con transductores basados en strain gages.

Es compatible con configuraciones de cuarto de puente, medio puente y puente completo. Puede completar puentes resistivos de 120,350 y 1000 [Ω]. Y es resistente al polvo y la humedad.

Estabiliza la señal y minimiza el ruido por medio de procesamiento digital. Y utiliza algoritmos de linearización y escalamiento para lograr precisión en las mediciones.



Figura 3.20: Strain Idicator and Recorder. Modelo P3

Signal Conditioning Extensions for Instrumentation

Las extensiones de acondicionamiento de señal para instrumentación (SCXI por sus siglas en inglés), son sistemas de adquisición de data y acondicionamiento de señal pensados para trabajar con un PC. Un sistema SCXI consiste en una caja que alberga una combinación de modulos de entrada y salida que cumplen una variedad de funciones de acondicionamiento de señal.

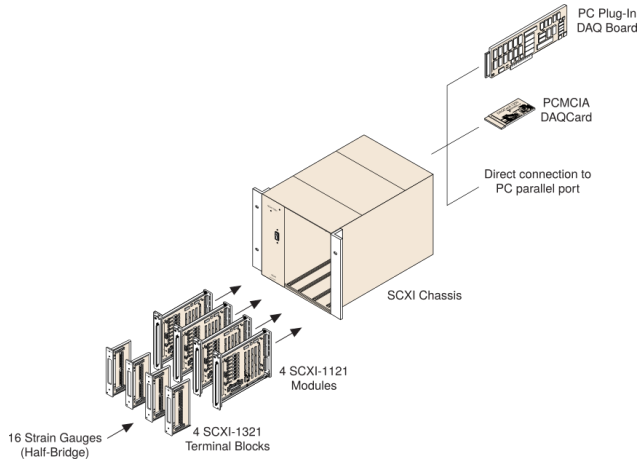


Figura 3.21: Ejemplo de configuración de sistema SCXI para Strain Gauges. Fuente: (National Instruments Corporation, 1995)

Se pueden conectar distintos tipos de transducores, e incluso puentes de strain gages, directamente a este tipo de módulos. Pueden funcionar como sistema de acondicionamiento de señal para conectar tanto a PC como a placas de adquisición de datos tipo PCMCIA. Alternativamente, puede usarse sólo como un conversor análogo digital para posterior tratamiento de la señal en el computador.

National Instruments ofrece diversos modelos para distintas aplicaciones. En la figura 3.21 se muestra una configuración utilizada para la adquisición de datos de 16 transductores de *medio puente*, en la que se utiliza un computador para grabar y monitorear los 16 parámetros.

Capítulo 4

Metodología

Es sabido que los procesos de diseño distan mucho de ser lineales, y sus etapas son más bien iterativas. Por lo que seguir esquemas de desarrollo conceptual puede ser de gran ayuda para plantear ideas y objetivos de trabajo.

Este capítulo busca explicar las etapas de desarrollo del sistema propuesto, desde el reconocimiento de una necesidad, hasta la posterior fabricación y evaluación del prototipo. Si bien la información se presenta linealmente, es importante entender que sólo se trata de un recurso que simplifica la narración. Ya que en la práctica, el proceso de diseño se asemeja mucho más al de la Figura 4.1.

Este es precisamente el esquema guía de este trabajo de título, y es en base a él que se mostrarán el alcance del sistema y las decisiones tomadas a lo largo del proceso de diseño.

4.1. Reconocimiento de la Necesidad

Durante la etapa de pruebas realizadas con el *Wasserdrachen* en el Canal de Pruebas de Punta Curaumilla, se observó el comportamiento de la bomba tanto en su estado ON, como en su estado OFF (ver Figura 4.2). Se analizó el ciclo completo de posicionamiento, funcionamiento, y retiro del atrapaolas.

Al posicionar el dispositivo en el mar, queda en evidencia la poca efectividad en la canalización de las olas hacia el interior del mismo. Se observa repetidamente cómo el agua golpea de costado o por debajo del atrapaolas, el que termina comportándose erráticamente producto de una flotabilidad superior a la esperada.

También se entiende que posicionar el *comeolas* en el mar y canalizar la ola de forma efectiva no es una tarea trivial, pues la posición ideal del dispositivo varía en el tiempo.

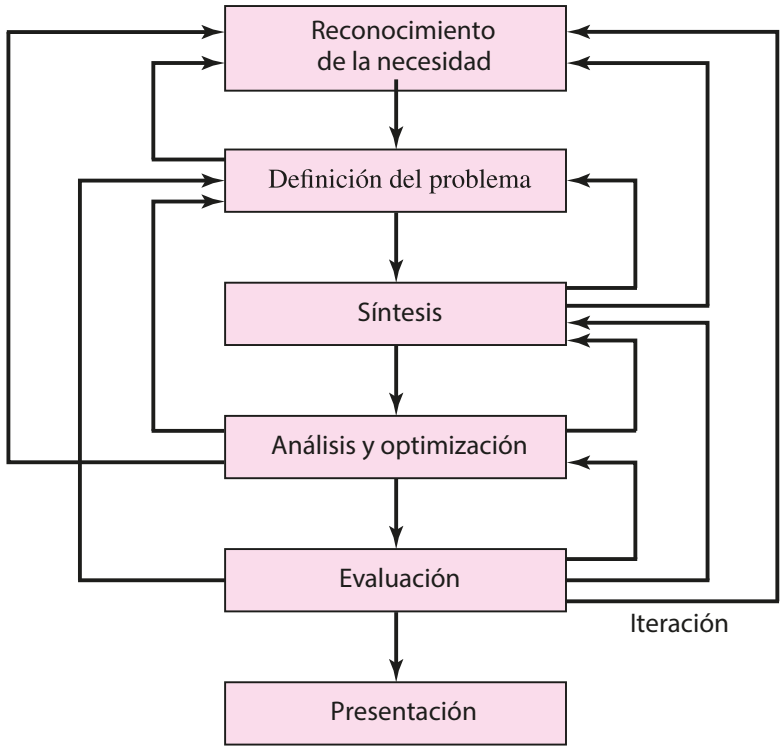
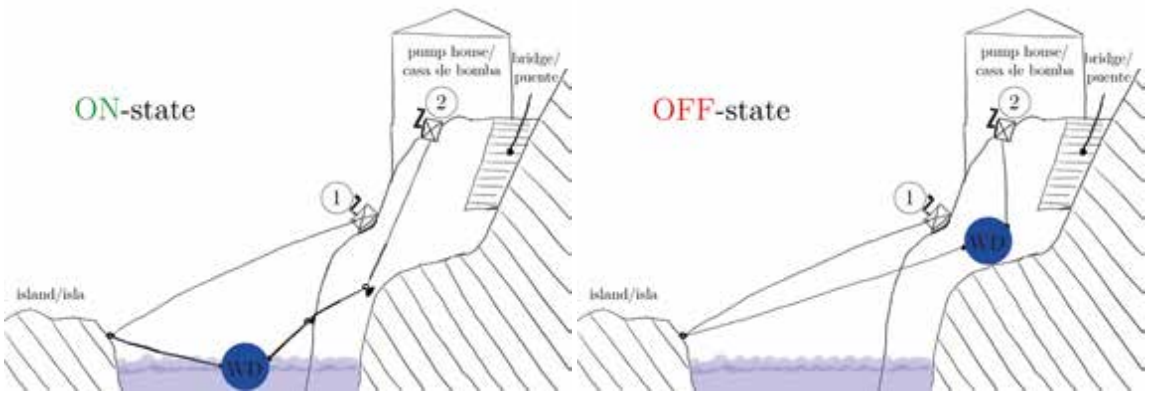


Figura 4.1: Esquematización de las fases del proceso de diseño y sus iteraciones. (Budynas y Nisbett)

Entonces, el comportamiento cíclico, tanto de las olas como de las mareas, sugiere dos caminos de desarrollo.

Por una parte, está el trabajo en la materialidad del sistema, en pos de aumentar la capacidad de bombeo. Persiguiendo un diseño robusto y eficiente que sea afectado lo menos posible por la variabilidad del medio.

Y por otro, el trabajo enfocado al emplazamiento de sistemas acuáticos, desde lo terrestre. Recogiendo características clave del modelo de Phillip. Como lo son el bajo



(a) Estado ON de funcionamiento **(b)** Estado OFF guardado o en espera

Figura 4.2: Esquematización de los estados ON/OFF del sistema de bombeo (Englisch, 2018).

costo, el bajo impacto en el medio, y la capacidad de control y posicionamiento desde fuera del agua.

De esta forma, tras entender el modelo de Phillip como dos subsistemas con líneas de trabajo paralelas y objetivos independientes. Se termina abarcando el segundo camino mencionado. El análisis del sistema cable-huinche.

Esta decisión nace al reconocer un roce excesivo de los cables contra el borde de los huinches. Especialmente en el punto de anclaje N°2, mostrado anteriormente en la figura 3.9. El daño ocurre durante el posicionamiento del Wasserdrachen, es decir, en la transición desde su posición de descanso en las rocas hasta su despliegue total en las olas.

Reconocer esta problemática motiva una atención extra sobre el subsistema cable-huinche. Y así se termina por resignificar la funcionalidad del mismo. Los cables no cumplirían una labor únicamente estructural ligada al emplazamiento. Se comenzarían a entender como canales de información entre un usuario *estático-terrestre*, y un aparato sumergido en un sistema *dinámico-acuático*.

Es así como este nuevo entendimiento, ligado al interés por caracterizar el sistema inercial de un dispositivo acuático, ofrece una nueva oportunidad de desarrollo. Entonces, se decide fabricar un sistema autónomo capaz de medir la tensión instantánea de los cables de enclaje.

Si este parámetro llegara a ser representativo de las fuerzas a las que está sometido el sistema, y enteniendo estas fuerzas como *inputs*, se puede contrastar con los *outputs* del mismo para obtener, por ejemplo, un indicador de rendimiento. Si se toma el caso de estudio del *Wasserdrachen*, se podrían contraponer dichas fuerzas con la altura efectiva de bombeo.

4.2. Definición del Problema

Para definir el problema en su totalidad, es necesario conocer las especificaciones del objeto a diseñar. Este se considera como una caja negra, con el fin de identificar fácilmente las variables de entrada y salida. (ver Figura 4.3).

Este análisis rápido termina por convertirse en un generador de preguntas. De las cuáles es posible identificar cuatro temáticas.

1. La **capacidad de medición** del sistema: ¿Cuánta es la tensión máxima y mínima que debe ser capaz de medir el sistema? ¿Qué tan rápida es esta variación? ¿Cuál debe ser la frecuencia de muestreo? ¿Y la resolución? ¿Cómo afecta la elasticidad de la cuerda o cable en la medición?

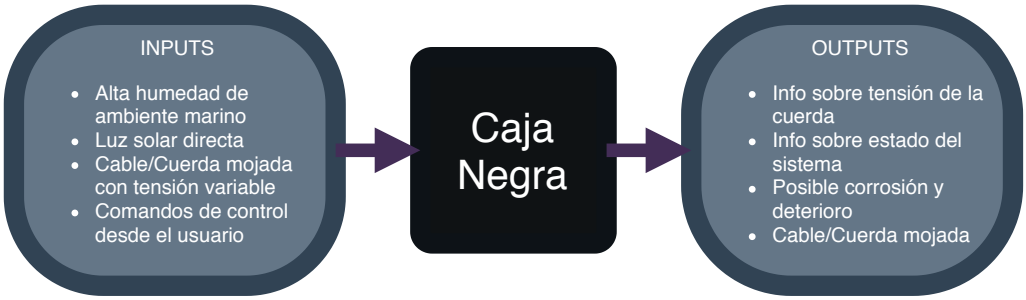


Figura 4.3: Inputs y Outputs del sistema visto como una caja negra.

2. La **autonomía energética** del dispositivo: ¿Cuánto consumiría un dispositivo como este? ¿Cuánta es la energía solar disponible? ¿Es suficiente? ¿Cuánto tiempo de autonomía se espera del dispositivo? ¿De qué tamaño y capacidad debe ser su batería? ¿qué tipo de batería se debe utilizar?

3. La **materialidad y manufactura** del sistema: ¿Qué tecnología es la apropiada para esta aplicación? ¿Qué es más conveniente, un dispositivo fijo o uno móvil? Si fuera fijo ¿Cómo montarlo? ¿Es necesario incluir el huinche en la caja negra? ¿Cómo se va a construir? ¿Qué procesos de manufactura están disponibles? ¿Cuánto va a costar?

4. Ligada a la **vida útil** del sistema: ¿Cómo va a afectar la humedad? ¿Y el sol? ¿Cómo evitar la corrosión? ¿Es necesario considerar fatiga de materiales por cargas cíclicas? ¿Cuál será su vida útil?

Para responder estas preguntas, se lleva a cabo una etapa de investigación y levantamiento de información. Debido a su extensión e importancia, las temáticas investigadas son tratadas tanto en el Capítulo 3: "*Levantamiento de Información: Contexto y Antecedentes*", como en el Capítulo 2: "*Marco Teórico*".

A partir de este estudio se da una bajada más acabada al sistema y se consolida lo siguiente:

- La utilización de una celda de carga de strain gage para captar la tensión de la cuerda.
- La utilización de la Placa Arduino UNO programada como datalogger, para recolectar los datos de medición en una tarjeta SD. Esto considerando que la información no requiere ser revisada y analizada en tiempo real.
- La energización del sistema por medio de una batería recargable y un panel solar.

4.2.1. Dimensionamiento

Capacidad de Medición

En la tarea de definir por completo el tensómetro a diseñar, es necesario conocer el rango de medición del mismo, es decir, conocer el orden de magnitud de las fuerzas a las que será sometido. Este es su rango de trabajo, requerimiento de diseño que marca pautas clave para el dimensionamiento del prototipo.



Figura 4.4: Vista superior del arreglo de medición con dinamómetro de resorte anclado a la roca y a la linga que, a su vez, afirma el *comeolas* a la roca.

Para conocer el orden de magnitud de estas fuerzas, se utilizó un dinamómetro de resorte con una resolución de 5[kg] y un rango de 0-60[kg]. Este se ancló a la roca como se muestra en la figura 4.4, buscando la perpendicularidad entre su eje de medición y la linga principal del punto de anclaje n° 6 (figura 3.9).

Los ángulos ilustrados en la figura 4.4 fueron medidos de forma digital en software AutoCad. Es importante entender que su magnitud no es constante, pues la tensión que *siente* el dinamómetro, implica un cambio en el largo del mismo. A pesar de esto, para efectos de cálculo, se consideró el diagráma de cuerpo libre estático de la figura 4.5. Esto pues, al momento de capturar la fotografía, se observó que la variación angular era muy pequeña debido a que el *Wasserdrachen* se encuentra a unos 10 [m] aproximadamente del punto de medición. Además se asume que todos los vectores de tensión son intersectados por un mismo plano espacial.

Considerando lo anterior, y ocupando los ejes coordenados propuestos en figura 4.5, es posible realizar una sumatoria de fuerzas en ambos ejes que llevan a las siguientes igualdades:

$$\sum \mathrm{F_x} = \mathrm{T_R} \sin 3^\circ + \mathrm{T_W} \sin 12^\circ - \mathrm{T_D} = 0 \qquad \textbf{(4.2.1)}$$

$$\sum \mathrm{F_y} = \mathrm{T_R} \cos 3^\circ - \mathrm{T_W} \cos 12^\circ = 0 \qquad \textbf{(4.2.2)}$$

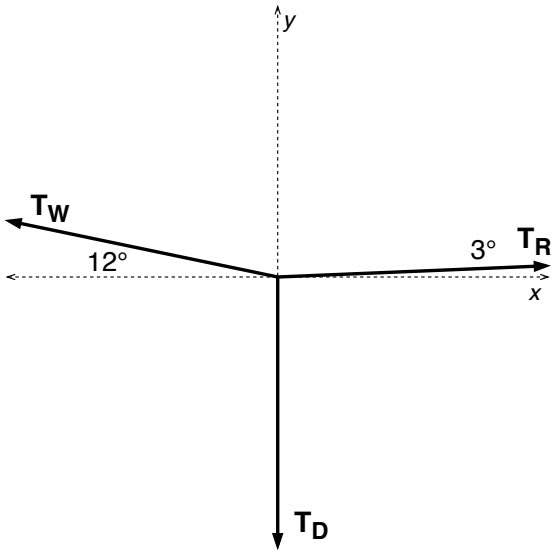


Figura 4.5: Diagrama de Cuerpo libre. El origen equivale al punto en que el dinamómetro se engancha a la linga. Luego $\mathrm{T_D}$ es el vector de la tensión en la dirección del Dinamómetro, $\mathrm{T_W}$ en la dirección del *comeolas*, y $\mathrm{T_R}$ en la dirección de la roca.

Este sistema de dos ecuaciones y tres incógnitas, permite encontrar una relación para $\mathrm{T_W}$ en función de $\mathrm{T_D}$:

$$\mathrm{T_W} = \frac{\mathrm{T_D}}{\sin 12^\circ + \tan 3^\circ \cos 12^\circ} \tag{4.2.3}$$

$$\mathrm{T_W} \approx 3{,}86\mathrm{T_D} \tag{4.2.4}$$

Donde el valor de $\mathrm{T_D}$ está dado por la fuerza marcada por el dinamómetro, el cual fue observado por alrededor de 30 minutos. Durante este tiempo se realizaron nueve videos de distinta duración con la intensión de capturar el movimiento del dinamómetro producto del oleaje. Es posible ver el encuadre utilizado para la observación en la figura 4.6.

Posteriormente, se hizo un análisis cualitivo de los videos, y se escogió un ciclo de oleaje particular representativo del movimiento general del dinamómetro. Este ciclo tiene una duración de 14 segundos y comienza cuando el *Wasserdrachen* es afectado prácticamente sólo por fuerzas gravitacionales y de flotabilidad. En este punto el dinamómetro marca 4[kg]. Luego, sigue toda la variación producto de la ola, llegando



Figura 4.6: Fotograma de referencia del video que captura la oscilación del dinamómetro en conjunto con el oleaje.

a marcar 26 [kg]. Y finalmente termina una vez que la ola pasó y el dinamómetro vuelve a marcar 4 [kg]. El video fue grabado a 30 [fps] (fotogramas por segundo). Es decir, se pueden obtener hasta 30 datos de medición del dinamómetro por cada segundo analizado, un total de 420 datos. Considerando que la resolución del dinamómetro es de 5 [kg], y que los fotogramas en que el dinamómetro marca valores intermedios no pueden utilizarse como información válida. Se opta por recolectar un total de 32 datos a partir de fotogramas clave. Con esta información se construye la figura 4.7 que grafica la tensión del dinamómetro de resorte en el tiempo para el ciclo de oleaje analizado.

A partir de este análisis se desprende que $4[\mathrm{kg}] \leq \mathrm{T_D} \leq 26[\mathrm{kg}]$. Luego, reemplazando en ecuación 4.2.4 se tiene que:

$$15{,}44[\mathrm{kg}] \leq \mathrm{T_W} \leq 100{,}36[\mathrm{kg}] \tag{**4.2.5**}$$

Finalmente, teniendo en cuenta la baja precisión de las mediciones realizadas, y considerando además la intención de aumentar el tamaño del dispositivo acuático se opta por definir una tensión de diseño

$$T = 300[kg]$$

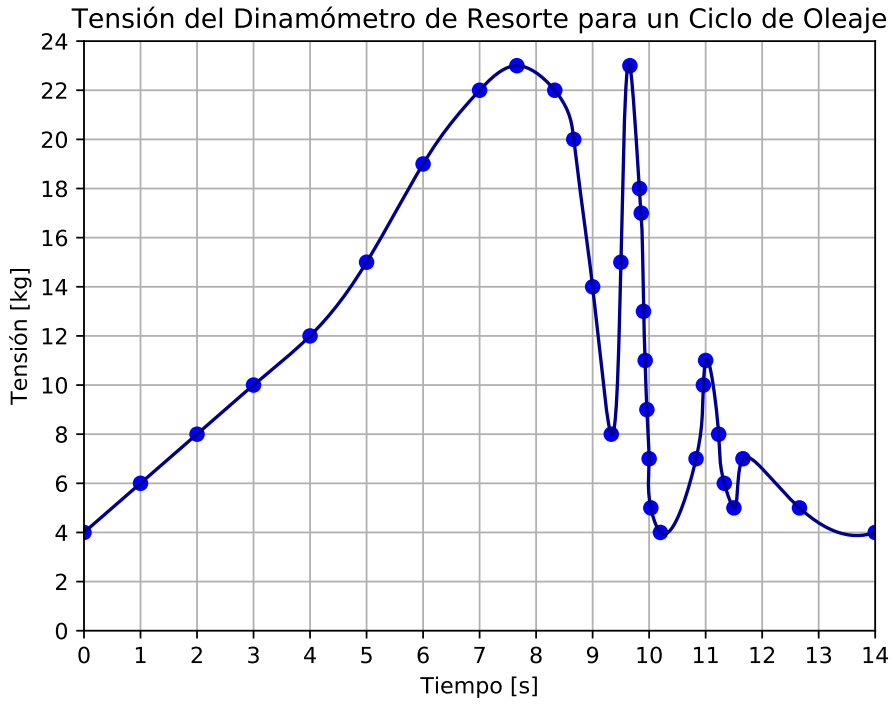


Figura 4.7: Tensión del dinamómetro en el tiempo: Gráfico construido en base a grabación de video con cámara de teléfono.

Autonomía Energética

Los parámetros críticos a considerar para dimensionar tanto la batería como el panel fotovoltaico son dos: El consumo de la máquina y la energía solar disponible.

Si bien no es posible conocer el consumo exacto del dispositivo sin medirlo. Es necesario estimarlo para adquirir los componentes adecuados. Luego, el consumo estimado del dispositivo se considera como la suma del consumo estimado de sus componentes, esto se presenta ordenada en la tabla 4.1.

Cuadro 4.1: Consumo Estimado Dispositivo de Medición en mA

Componenete	Comsumo Estimado	Nota
Puerto SD	$5[mA]$	En base a proyectos similares
Sensor Humedad y Temperatura	$10[mA]$	En base a proyectos similares encontrados en la web
Celda de Carga	$15[mA]$	Resistencia de $330[\Omega]$ y voltaje de excitación de $5[V]$
Consumo Interno Arduino	$40[mA]$	En base a proyectos similares
Consumo Estimado Total CET	$100[mA]$	Consumo estimado total del dispositivo de medición.

Luego, considerando que el Voltaje de Trabajo Interno de la placa Arduino UNO es de $5[V]$, y que el *Consumo Estimado Total* (CET) del dispositivo es de $0,1[A]$ según lo presentado en la tabla 4.1. La *Potencia Requerida Estimada* es

$$W_{r,e} = 5[V]0,1[A] = 0,5[W] \tag{4.2.6}$$

Para estimar la energía solar disponible se utilizó un reporte generado automáticamente por el *Explorador Solar*[1] en base a las coordenadas expresas en 3.1.

La información entregada por este reporte se basa en una modelación numérica de la transferencia de radiación solar en la atmósfera y en datos satelitales de alta resolución. Si bien el modelo ha sido validado con observaciones, no debe ser considerado como definitivo. Esto pues la información utilizada para la nubosidad considera datos desde el año 2004 a 2016. Además la base de datos de altura del terreno tiene $90[m]$ de resolución. Es decir, no considera sombras por obstáculos tales como árboles o rocas de menor tamaño.

A pesar de esto, el informe proporciona información relevante para el dimensionamiento de la batería. La figura 4.8 muestra el porcentaje de cada hora del día con sombra para cada mes del año. Estas horas se definen como el *Tiempo de Descarga de la Batería* (t_d). Considerando que los meses más críticos son abril y mayo, con 14 horas de

[1]Herramienta desarrollada por el departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Disponible en www.minenergia.cl/exploradorsolar/

sombra al día. Se puede calcular el *Tamaño Mínimo de la Batería* (TMB) multiplicando estas horas por el CET del dispositivo de la tabla 4.1, como sigue:

$$TMB = CETt_d \tag{4.2.7}$$

De esta forma, la autonomía del dispositivo dependerá de la definición de las horas de descarga. Si se consideran las 14 horas de sombra promedio de los meses de abril y mayo, entonces el TMB se estima en $1400[mAh]$. En cambio si se define como 2 horas, que es el tiempo estimado de una primera prueba, el TMB se estima en $200[mAh]$.

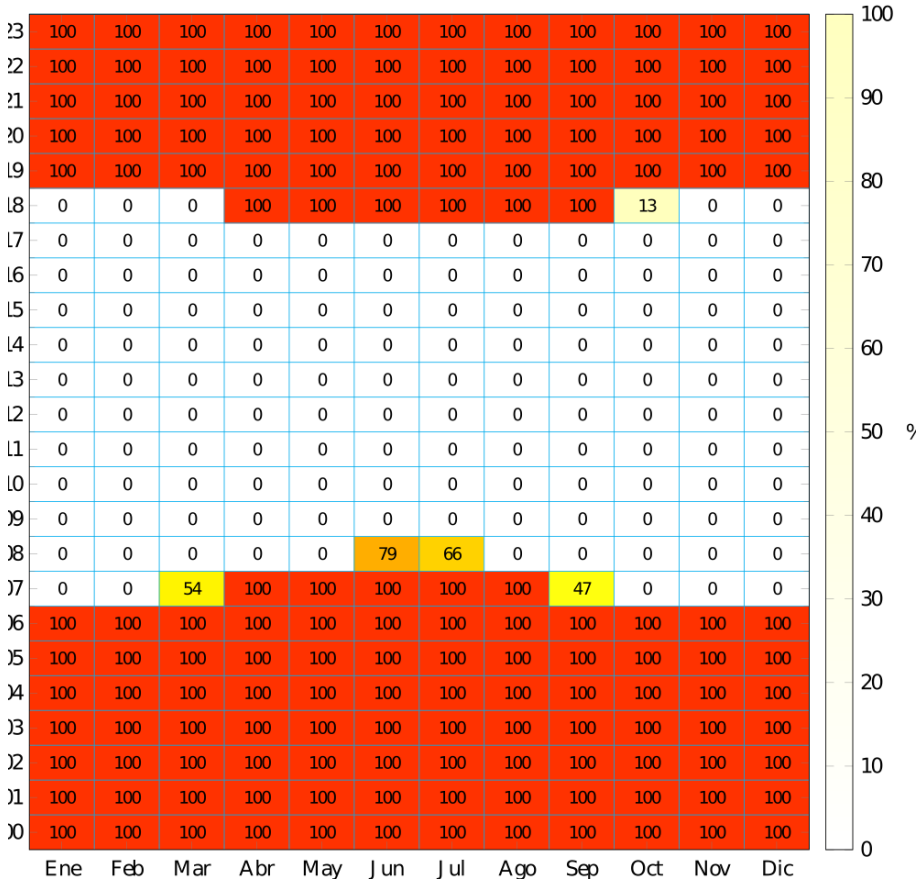


Figura 4.8: Porcentaje de la hora con sombra durante cada mes.

A su vez, la tabla 4.2 muestra promedios mensuales de *Insolación Diaria* I_{s_d}. Siendo el mes de mayo el más crítico con una insolación diaria promedio de $3{,}63[kWh/m^2/dia]$. A partir de los valores de I_{s_d} se pueden calcular valores de *Irradiancia Promedio Mensual* I_{r_m}:

$$I_{r_m}[W/m^2] = \frac{1000}{24} I_{s_d} \tag{4.2.8}$$

Luego, para el mes de mayo, se tiene un valor de $I_{r_{mayo}} = 151[W/m^2]$. De esta forma,

Cuadro 4.2: Promedio mensual de la insolación diaria en unidades de $[kWh/m^2/dia]$ para un plano con inclinación igual a la latitud del sitio.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Directa	4.36	4.43	4.21	3.72	2.71	2.95	3.04	3.45	4.05	4.47	4.44	4.44
Difusa	1.64	1.49	1.27	1.02	0.87	0.69	0.76	0.92	1.17	1.4	1.62	1.62
Suelo	0.13	0.12	0.1	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.09	0.11	0.13	0.14
Global	6.13	6.04	5.58	4.81	3.63	3.69	3.85	4.43	5.31	5.98	6.19	6.2

la *Potencia por Unidad de Área* $P_{u,a}$ que es capaz de generar el panel solar, será un porcentaje de esta irradiancia que corresponde a la eficiencia ξ del panel.Es decir,

$$P_{u,a} = \xi I_{r_m} \tag{4.2.9}$$

Asumiendo una eficiencia del $15\,\%$, para el mes de mayo se tiene que $P_{u,a} = 22,69[W/m^2]$.

Así, el *Tamaño del Panel Solar* TPS, se obtiene

$$TPS = \frac{W_{r,e}}{P_{u,a}} = \frac{0,5[W]}{22,69[W/m^2]} = 220[cm^2] \tag{4.2.10}$$

Notar que todas las magnitudes utilizadas en los cálculos recién presentados, corresponden a promedios mensuales para planos con una inclinación igual a la latitud del lugar. No se consideran situaciones climáticas extremas con periodos prolongados de sombra por nubosidad, ni la posibilidad de instalar el panel solar horizontalente. De esta forma, los valores TMB y TPS no son más que referencias, y las magnitudes finales tanto de la batería como del panel se deciden en función de los demás requerimientos de diseño.

Capacidad de Almacenamiento de Información

La Capacidad Mínima Requerida de Almacenamiento C_{min} se refiere al tamaño mínimo en bytes $[B]$, que debe tener la tarjeta SD del sistema, para almacenar la información recopilada y decodificada por el microprocesador, a partir de las variaciones de voltaje de los transductores de fuerza, temperatura y humedad.

Su magnitud está dada por:

$$C_{min} = T_l V_{es} t_{med}[s] \tag{4.2.11}$$

donde T_l es el tamaño de una línea de data; V_{es} es la velocidad de escritura; y t_{med} es el

tiempo requerido de medición.

A su vez, el tamaño de línea depende de la cantidad de caracteres escritos en la misma. Para estimarlo, se define el formato de escritura separado por comas:

`tttttttttt`, `TT.TT`, `HH.HH`, `WWWW`

donde `t` corresponde al tiempo en milisegundos desde que se inicia el programa; `T` es la temperatura medida en $[°C]$; `H` es el porcentaje de humedad y `W` la tensión de la cuerda en $[kg]$.

El código ASCII, utiliza $1[B]$ de $8[bit]$ por caracter. Luego, si se considera que cada línea tiene 26 caracteres, $T_l = 26[B]$

Por su parte, la velocidad de escritura no es posible determinarla previamente. Pero una vez escrito el programa, y tras realizarse las primeras pruebas de escritura, se revisa el archivo creado y se observa que en un segundo se imprimen entre 9 y 10 líneas. Luego $V_{es} = 10[s^{-1}]$.

El tiempo requerido de medición es una variable completamente arbitraria. Si se considera una primera prueba en terreno de $2[h]$, equivalentes a $7200[s]$, se tiene que la Capacidad Mínima Requerida de Almacenamiento será aproximadamente $C_{min} = 1,8[GB]$. Así mismo, para un día de medición se requieren $22,5[GB]$

4.2.2. Requerimientos de Diseño

A partir de lo estudiado anteriormente, es posible plantear ciertos requerimientos de diseño. Estos, desde luego, son mutables y se reescriben continuamente a lo largo del proceso. Pero, más allá de esto, su función radica en explicitar tanto los objetivos mínimos como los ideales del proyecto, así como sus limitantes y principales problemáticas. En otras palabras, buscan responder las preguntas planteadas anteriormente en la sección 4.2. Estos requerimientos se muestran en la Tabla 4.3.

Cuadro 4.3: Requerimientos de Diseño

N°	Descripción	Ideal	Requerimiento
1	Capacidad de Medición		
1.1	Rango de Medición	0 - 500 [kg]	0 - 300 [kg]
1.2	Resolución	1 [kg]	5 [kg]
1.3	Capacidad Almacenamiento	250 [GB]	2 [GB]
2	Autonomía Energética		
2.1	Tiempo	10 días	2 horas
2.2	Batería	Ion Litio 2000 [mAh]	Ion Litio 500 [mAh]
2.3	Panel solar	1 [W]	1 [W]
3	Materialidad: Manufactura e Implementación		
3.1	Montaje	1. Realizable por una persona en una día 2. Compatible con soporte diseñado por Phillip	Realizable por dos personas en un día
3.2	Producción	Una persona en 15 días	1. Una persona en un mes 2. Recursos disponibles en UTFSM
3.3	Traslado	Realizable por una persona en un día	Realizable por dos personas en un día
3.4	Dimensiones totales		<500x200x500 [mm]
3.6	Costo Total	<= 200 CLP	<= 250 CLP
4	Mantenimiento y Protección		
4.1	Corrosión	1. Evitar Piezas Metálicas 2. Preferir Acero Inoxidable 3. Considerar Recubrimientos de pintura	La totalidad del sistema debe ser resistente a la corrosión
4.2	Impermeabilidad	Dispositivo capaz de soportar una tormenta	Dispositivo resistente al rocío salpicaduras

4.3. Síntesis, Análisis y Optimización

En la figura 4.1 se observa la relación íntima que existe entre la síntesis, el análisis y la optimización propios de un proceso de diseño. Resulta casi imposible hablar de ellos por separado. A partir del análisis de caja negra (Figura 4.3) y el análisis de los requerimientos de diseño (Tabla 4.3), se realiza una síntesis conceptual que plantea un primer acercamiento tanto a los subsistemas mínimos con los que debe contar el dispositivo, como a la forma en que estos se relacionan entre sí y con el medio. La figura 4.9 esquematiza esta síntesis, mostrando los flujos de energía en naranjo y de información en azul.

A partir de este desarrollo conceptual, se proponen diversas soluciones al sistema general y a los subsistemas planteados. A continuación se presentan los cuestionamientos y análisis que surjen a lo largo del proceso creativo antes de llegar al prototipo final. Esta sección se enfoca en el proceso de diseño del Sistema de Medición y sus componentes, el resultado final se presenta en detalle en el Capítulo 5.

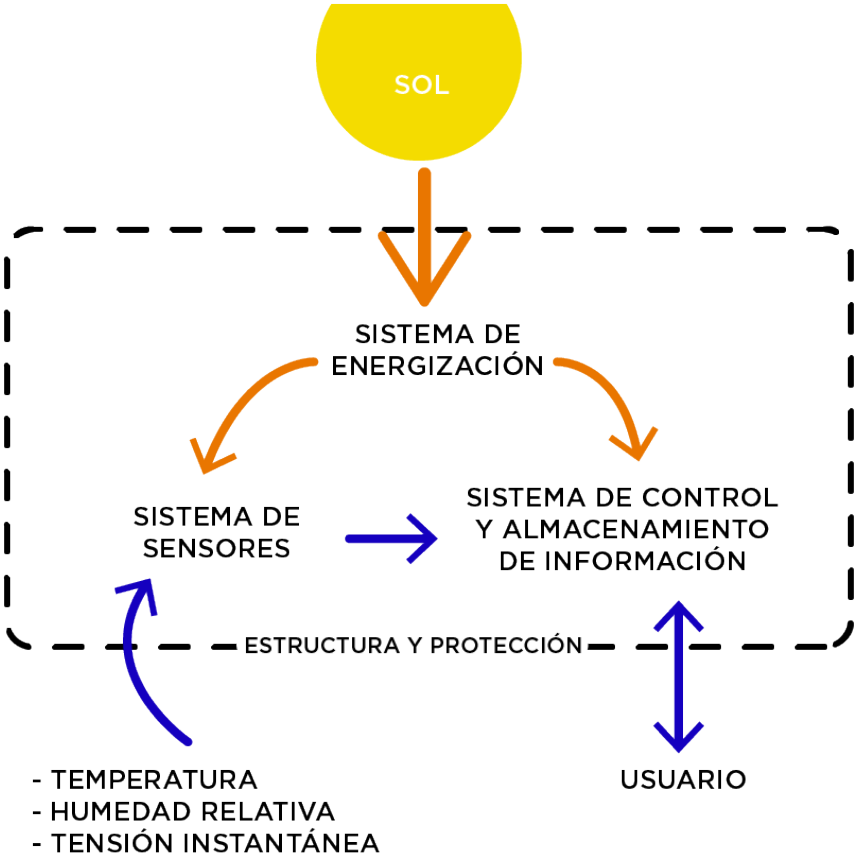


Figura 4.9: Síntesis Conceptual.

4.3.1. Análisis de Geometría General y Fuerzas Involucradas

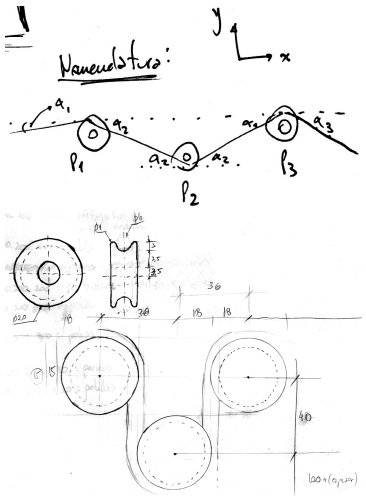


Figura 4.10: Primeros bocetos de estudio sobre geometría del sistema.

En la sección 3.3.2, se presentaron distintos alternativas disponibles en el mercado para medir tensión de cuerdas. Su principal factor común es la utilización de un sistema de tres poleas, en el que la polea central está acoplada a algún tipo de transductor. Siendo la disposición de los ejes la que determina la fuerza que *percibe* la polea central.

Definir esta geometría requiere tener en cuenta multiples factores, como lo son la tensión de diseño, el diámetro de los ejes, de los rodamientos y de la cuerda. Además, de ella depende la forma de la estructura general del dispositivo. Es por esto que los primeros bocetos realizados (ver figura 4.10) giran en torno a la geometría de la disposición de los ejes de estas poleas.

Así, es importante considerar que:

- La tensión de diseño se define como $T = 300[kg]$ (ver sección 4.2.1).
- El diámetro de eje se define a priori como $d_{eje} = 8[mm]$ (ver sección 4.3.3).
- El diámetro de cuerda se define a priori como $d_{cuerda} = 12[mm]$ (ver sección 4.3.4).

Teniendo esto en cuenta, para comenzar a definir la geometría, se definen las magnitudes representadas en la figura 4.11. Donde, P_i identifica cada polea, α_i denota el ángulo que se forma entre la horizontal y la cuerda para cada polea; β_i denota el llamado *wrap angle* o *ángulo de envoltura* para cada polea; y $\vec{F_i}$ es la fuerza resultante sobre cada polea producto

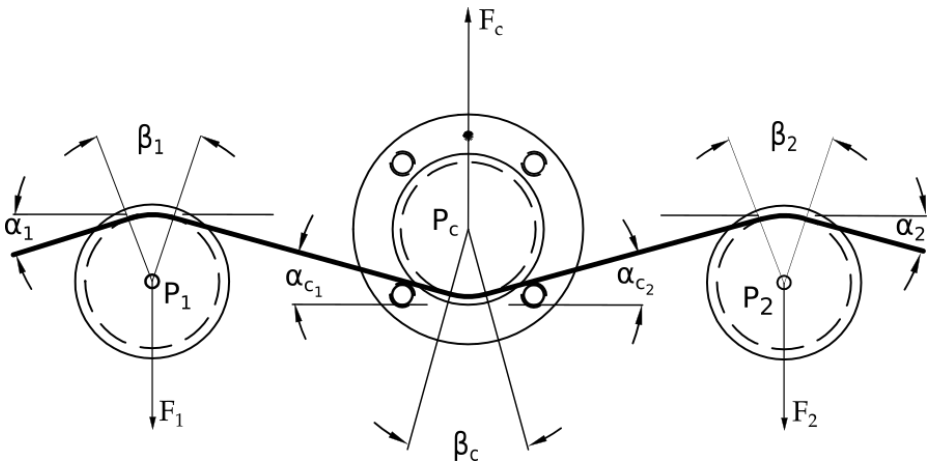


Figura 4.11: Geometría general del sistema de poleas. P_1 conecta con el dispositivo acuático, P_2 con el huinche, y P_c con la celda de carga.

de la tensión de la cuerda.

Los ángulos envolventes β_i se relacionan con los horizontales α_i como sigue:

$$\beta_1 = \alpha_1 + \alpha_{c1} \tag{4.3.1}$$

$$\beta_c = \alpha_{c1} + \alpha_{c2} \tag{4.3.2}$$

$$\beta_2 = \alpha_2 + \alpha_{c2} \tag{4.3.3}$$

Además, es posible escribir cada fuerza resultante según su descomposición vectorial como sigue:

$$\vec{F_1} = F_{1x}\hat{\imath} + F_{1y}\hat{\jmath} \tag{4.3.4}$$

$$\vec{F_2} = F_{2x}\hat{\imath} + F_{2y}\hat{\jmath} \tag{4.3.5}$$

$$\vec{F_c} = F_{cx}\hat{\imath} + F_{cy}\hat{\jmath} \tag{4.3.6}$$

De forma que:

$$\vec{F_1} = T(\cos\alpha_{c1} - \cos\alpha_1)\hat{\imath} - T(\sin\alpha_{c1} + \sin\alpha_1)\hat{\jmath} \tag{4.3.7}$$

$$\vec{F_2} = T(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_{c2})\hat{\imath} - T(\sin\alpha_2 + \sin\alpha_{c2})\hat{\jmath} \tag{4.3.8}$$

$$\vec{F_c} = T(\cos\alpha_{c2} - \cos\alpha_{c1})\hat{\imath} + T(\sin\alpha_{c1} + \sin\alpha_{c2})\hat{\jmath} \tag{4.3.9}$$

Notar que $\vec{F_1} = \vec{F_2} = \vec{F_c}$ si, y sólo si, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{c1} = \alpha_{c2}$. Desde luego, esta condición no es posible pues tanto α_1 como α_2 son variables. Pero, con la intención de eliminar las cargas angulares excéntricas (ver Apéndice A) y minimizar posibles errores de medición, se busca que $\alpha_{c1} = \alpha_{c2}$ (desde ahora llamado α_c). De esta forma las componentes horizontales de $\vec{F_c}$ se anulan. Luego, la ecuación 4.3.9 se reescribe como:

$$\vec{F_c} = F_{cy}\hat{\jmath} = 2T\sin\alpha_c\hat{\jmath} \tag{4.3.10}$$

Notar que al ser una función senoidal, encuentra su máximo cuando $\alpha_c = 90°$. En la tabla 4.4 se muestra el comportamiento de F_c para distintos ángulos β_c.

Por su parte, el rango en que se mueven los ángulos α_1 y α_2 se define en función de el lugar de emplazamiento y una distancia arbitraria entre el huinche y el sistema de poleas.

Considerando todo lo anterior, se definen:

- α_{c1} y α_{c2} como los ángulo que forma la cuerda con la horizontal al unir la polea P_c

Cuadro 4.4: Fuerza Resultante para la Polea Central considerando $T = 300[kg]$ en función de la ecuación 4.3.10

Ángulo de Envoltura β_c	Fuerza Resultante $F_c[kg]$	Relación F_c/T
30°	155,3	0,5
60°	300	1
90°	424,2	1,4
120°	519,6	1,7
180°	600	2

con P_1 y P_2, respectivamente:

$$\alpha_c = \alpha_{c1} = \alpha_{c2} = 30^\circ \tag{4.3.11}$$

- α_1 como el ángulo que forma la cuerda con la horizontal al unir la polea P_1 con el dispositivo acuático, de forma que:

$$4^\circ \leq \alpha_1 \leq 8^\circ \tag{4.3.12}$$

- α_2 como el ángulo que forma la cuerda con la horizontal al unir la polea P_2 con el huinche, de forma que:

$$12^\circ \leq \alpha_2 \leq 29^\circ \tag{4.3.13}$$

Finalmente, considerando que la magnitud de las fuerzas resultantes en P_1 y P_2 es máxima cuando α_1 y α_2 son máximos. Es posible evaluar las ecuaciones 4.3.7 y 4.3.8 para encontrar las magnitudes críticas de dichas fuerzas. Luego:

$$\vec{F}_{1,\alpha_1=8^\circ} = -37,3\hat{\imath} - 191,7\hat{\jmath} \tag{4.3.14}$$

$$\vec{F}_{2,\alpha_2=29^\circ} = 2,6\hat{\imath} - 295,4\hat{\jmath} \tag{4.3.15}$$

De forma que:

$$F_{1,\alpha_1=8^\circ} = 195,3[kg] \tag{4.3.16}$$

$$F_{2,\alpha_2=29^\circ} = 295,4[kg] \tag{4.3.17}$$

También, reescribiendo la ecuación 4.3.10 según la ecuación 4.3.11 y la tabla 4.4, se tiene:

$$F_c = T = 300[kg] \tag{4.3.18}$$

4.3.2. Estructura General

Se entiende la *Estructura General*, como el armazón que sostiene al huinche, sensores, poleas, y sistema eléctrico. Siendo la resistencia a la corrosión el principal requerimiento para su desarrollo.

Así, las primeras propuestas, mostradas en la figura 4.12, consideran un armazón con una sección superior que contiene todo el sistema mecánico (transductor, poleas, huinche), y una inferior donde se resguardaría el sistema eléctrico (placa arduino, puerto SD, batería).

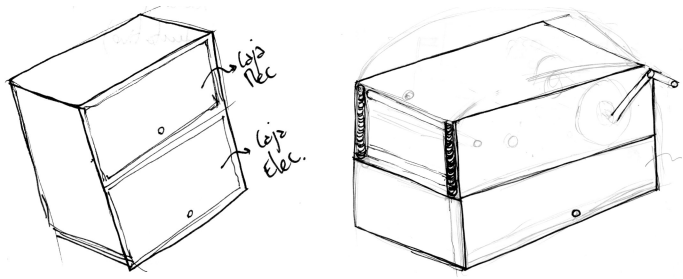


Figura 4.12: Primeros acercamientos a la estructura general del dispositivo

Como el huinche es una estructura independiente y disponible en el mercado, no se justifica diseñar un nuevo armazón para el mismo. Considerando esto, se analizan configuraciónes posibles para su disposición dentro del armazón. En la figura 4.13 se muestran los esquemas realizados.

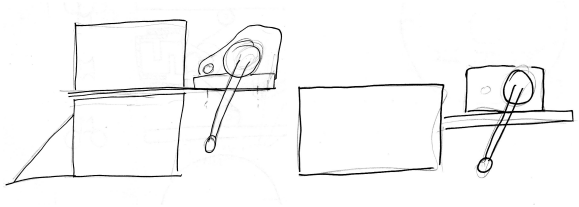
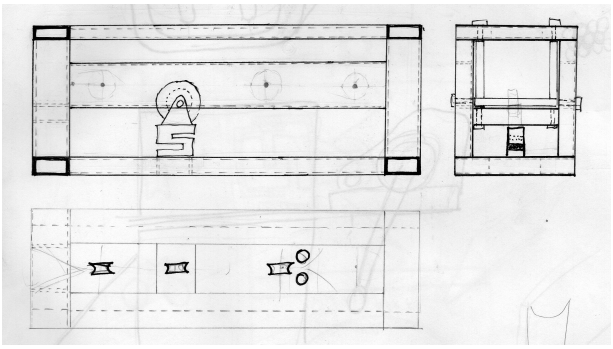


Figura 4.13: Primeros acercamientos a la disposición del huinche

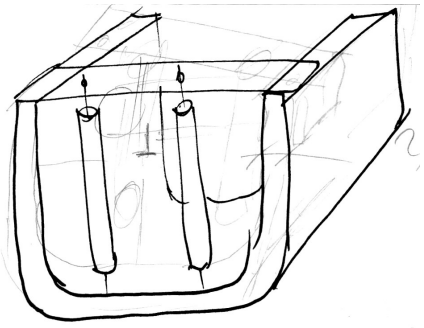
Una vez aclarados estos conceptos generales, se comparan posibles materiales y sus respectivos procesos de manufactura. En primer lugar, se considera un esqueleto hecho de tuberías con perfil cuadrado o rectangular como el que se boceta en la figura 4.14a. Este concepto se descarta por la necesidad de una base plana imposible de lograr sólo con estos perfiles. Se prioriza la simpleza del diseño y el uso de la menor cantidad de materiales posible.

En base a esto, se bosqueja la figura 4.14b, que considera construir un perfil en U doblando pletinas de acero. Este concepto también es descartado, pues la distancia mínima

entre dobleces que permite la máquina disponible en la Universidad, no permite generar una geometría que se adecúe a los requerimientos.



(a) Concepto estructura en base a perfiles rectangulares



(b) Concepto estructura en base a pletina doblada en U

Figura 4.14: Boceto de conceptos para construcción de estructura general

El prototipo final aúna ambos conceptos, y consta de dos estructuras fabricadas a partir de pletinas de acero de 3 [mm] de espesor. Estas pletinas son cortadas y soldadas en el *Taller de Metalmecánica de la UTFSM*. La estructura principal es el *Cuerpo del Tensómetro* y se presenta en la Sección 5.1.2. Esta estructura es soportada junto al winche por la *Base del Dispositivo* anclada a la roca. La figura 4.15 presenta dos fotografías capturadas durante el corte de las pletinas.

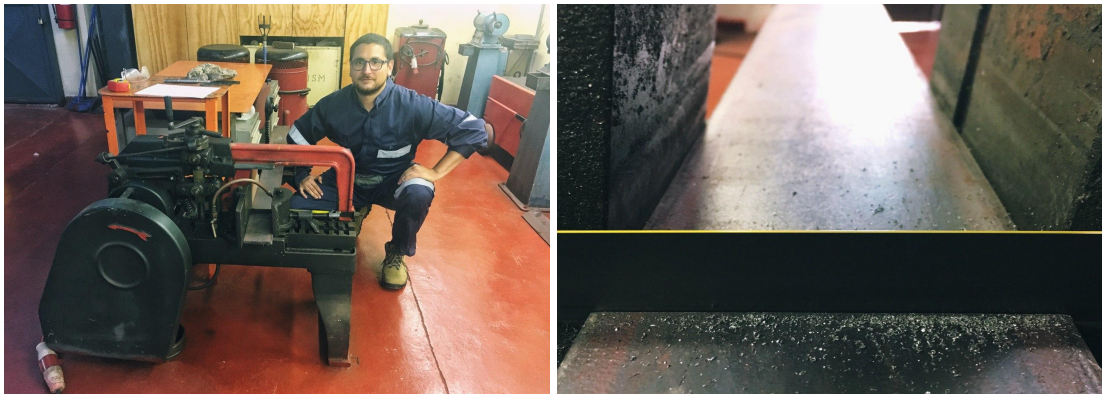


Figura 4.15: Corte de pletinas de acero en taller de metalmecánica UTFSM

4.3.3. Diseño de Ejes

El diámetro $d_{eje} = 8[mm]$ y largo de los ejes L_i, se definen a priori en función de la geometría de la estructura. Los ejes a diseñar, corresponden a los de las poleas anteriormente nombradas como P_1, P_2 y P_c. Estos son considerados como vigas biempotradas de sección circular, sometidas a flexión pura por una carga central. Este es un caso típico de estudio, y se presentan los diagrama de cuerpo libre 4.16a, de fuerza cortante 4.16b, y de momento flector 4.16c.

Según Budynas y Nisbett, la fórmula para el esfuerzo cortante máximo debido a flexión en vigas de sección circular, se escribe:

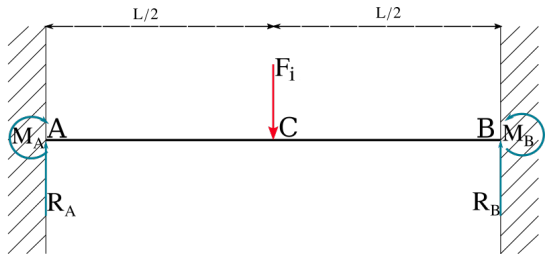
$$\tau_{max_i} = \frac{4V_{max_i}}{3A_t} \qquad \textbf{(4.3.19)}$$

Donde $V_{max_i} = \frac{F_i}{2}$ es la fuerza cortante máxima para este caso; y $A_t = \frac{\pi {d_t}^2}{4}$ es el área de esfuerzo a tensión, donde d_t dependerá del tipo de eje.

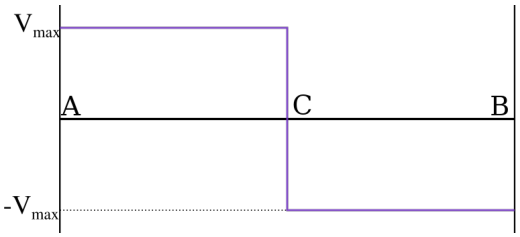
Además, considerando que los transductores de fuerza son sensibles a la deformación, es importante tener en cuenta la deflexión producida en el eje. Según Budynas y Nisbett la deflección máxima y_{max_i} para este caso se calcula como sigue

$$y_{max_i} = \frac{F_i L_i^3}{192EI} \qquad \textbf{(4.3.20)}$$

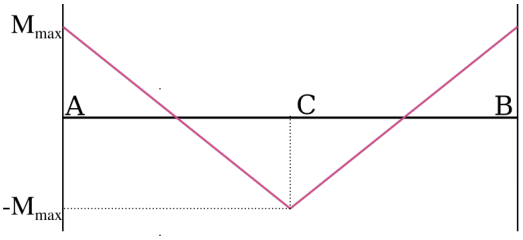
donde E es el Módulo de Young del material, e I es el segundo momento de área, que para el caso de un círculo es $I = \frac{\pi d^4}{64}$.



(a) Diagrama de Cuerpo Libre



(b) Diagrama de Fuerza Cortante



(c) Diagrama de Momento Flector

Figura 4.16: Diagramas para viga biempotrada con carga central. Fuente: Elaboración propia a partir de Budynas y Nisbett

Desde luego, cada eje posee largos distintos y es sometido a una fuerza distinta. Estas se definen en la sección 4.3.1, y se presentan resumidas en la tabla 4.5.

Con esta información se analizan tres alternativas respecto al material del eje:

1. **Eje macizo de Acero Inoxidable**: si bien es la más lógica en términos geométricos. Se descarta rápidamente pues mecanizar tres ejes a medida no se justifica existiendo alternativas comerciales más económicas.

Cuadro 4.5: Magnitud de la fuerza aplicada y largo de cada eje

Polea	Carga aplicada	$[kg]$	$[N]$	Largo del eje [mm]
P_1	F_1	195	1913	$L_1 = 48$
P_2	F_2	295	2894	$L_2 = 48$
P_c	F_c	300	2943	$L_c = 24$

2. **Eje Roscado de Acero Inoxidable**: Esta alternativa contempla la fabricación de los ejes a partir de una varilla inoxidable roscada de un metro de largo, conocida como *espárrago*. Con esta varilla es posible fabricar los tres ejes de las poleas, más los ocho ejes de fijación para las guías. Por lo que se vuelve muy atractiva en términos de costos de fabricación, compatibilidad y mantenimiento del dispositivo.
3. **Pernos ASTM**: Si bien un perno ASTM no es capaz de resistir la corrosión de ambientes marinos. Se decide analizar esta alternativa porque, al tratarse de pernos estructurales, se minimiza el largo de la rosca, para maximizar el largo del cuerpo, lo que les proporciona una mayor resistencia a esfuerzos cortantes. Además su bajo costo y alta disponibilidad en el mercado, hacen que sea interesante incorporarlo al dispositivo como *pieza de sacrificio*. Es decir, considerar la corrosión como parte del diseño, y perseguir la fácilidad de reparación en conjunto con un plan de mantenimiento.

Eje Roscado de Acero Inoxidable

Los aceros inoxidables más comunes en el comercio, corresponden a los AISI 304 y 316. Sus propiedades mecánicas se presentan en la tabla 4.6.

Cuadro 4.6: Propiedades Mecánicas de Interés aceros inoxidables AISI 304 y 316

Norma AISI	Resistencia a la Tracción $[MPa]$	Esfuerzo de Fluencia $[MPa]$	Módulo de Elasticidad $[GPa]$
304	550	240	190
316	585	235	190

Se sabe que *"Una varilla sin rosca con diámetro igual a la media del diámetro de paso y al diámetro menor, mostrará la misma resistencia a la tracción que la varilla roscada"* (Budynas y Nisbett). En la tabla 4.7 se encuentran el área $A_{t,R}$ y diámetro $d_{t,R}$ de esfuerzo a la tensión para roscas M8.

Entonces,se puede calcular el esfuerzo cortante máximo debido a flexión en una vara

Cuadro 4.7: Dimensiones e interés para roscas M8x1.25

Diámetro Nominal $d[mm]$	Paso $p[mm]$	Área de Esfuerzo a la Tensión $A_{t,R}[mm^2]$	Diámetro de Esfuerzo a la Tensión $d_{t,R}[mm]$	Área de Diámetro Menor $A_r[mm^2]$	Diámetro Menor $d_r[mm]$
8	1.25	36.6	6.83	190	6.46

roscada τ_{R_i}, reescribiendo la ecuación 4.3.19 según las magnitudes de la tabla 4.7:

$$\tau_{max,R_i} = \frac{2}{109{,}8} F_i \tag{4.3.21}$$

Luego, reemplazando F_i, se obtienen los valores de la tabla 4.8. Notar que todas estas magnitudes son significativamente menores a los esfuerzos de fluencia presentados en la tabla 4.6, por lo que es posible utilizar el esparrago inoxidable para la fabricación de los ejes de poleas, y también para la fijación de las guías.

Por otro lado, la deflexión máxima que sufre cada eje roscado y_{max,R_i} se calcula en función de la ecuación 4.3.20. Notar que el segundo momento de área I, debe calcularse para el área de esfuerzo a tensión, utilizando el diámetro $d_{t,R}$ de la tabla 4.7; a su vez, el módulo de elasticidad se presenta en la tabla 4.6

Cuadro 4.8: Esfuerzo cortante y deflexión máximos debido a carga central en condición de viga biempotrada, para ejes roscados M8x1,25

Esfuerzo Cortante Máximo $[MPa]$	Deflexión máxima $[mm]$
$\tau_{max,R_1} = 34,84$	$y_{max,R_1} = 0,054$
$\tau_{max,R_2} = 52,71$	$y_{max,R_2} = 0,082$
$\tau_{max,R_c} = 53,61$	$y_{max,R_c} = 0,010$

Eje Perno ASTM

En este caso la zona sometida a flexión corresponde al cuerpo del perno, por lo que el área de esfuerzo a tensión corresponde a la nominal, de forma que el diámetro de esfuero a tensión del perno $d_{t,P}$ es igual al diámetro de diseño del eje $d_{eje} = 8[mm]$. Entonces, se calcula el esfuerzo cortante máximo debido a flexión en el perno τ_{max,P_i}, reescribiendo la ecuación 4.3.19 como:

$$\tau_{max,P_i} = \frac{0{,}85}{64} F_i \tag{4.3.22}$$

Los valores para τ_{max,P_i} se presentan en la tabla 4.9. Notar que todas estas magnitudes son significativamente menores que los esfuerzos de fluencia presentados en al tabla 4.10, por lo que es posible utilizar los pernos como ejes.

Por otro lado, la deflexión máxima que sufre cada perno y_{max,P_i} se calcula en función de la ecuación 4.3.20. Notar que el segundo momento de área I, debe calcularse para el área de esfuerzo a tensión, utilizando el diámetro $d_{t,P} = d_{eje} = 8[mm]$. A su vez, se considera el módulo de elásticidad para la Clase 12.9 presentada en la tabla 4.10.

Cuadro 4.9: Esfuerzo cortante y deflexión máximos debido a carga central en condición de viga biempotrada, para ejes roscados M8x1,25

Esfuerzo Cortante Máximo $[MPa]$	Deflexión máxima $[mm]$
$\tau_{max,P_1} = 25,41$	$y_{max,R_1} = 0,026$
$\tau_{max,P_2} = 38,44$	$y_{max,R_2} = 0,039$
$\tau_{max,P_c} = 39,09$	$y_{max,R_c} = 0,005$

Cuadro 4.10: Propiedades mecánicas de pernos de acero según clase métrica (Budynas y Nisbett)

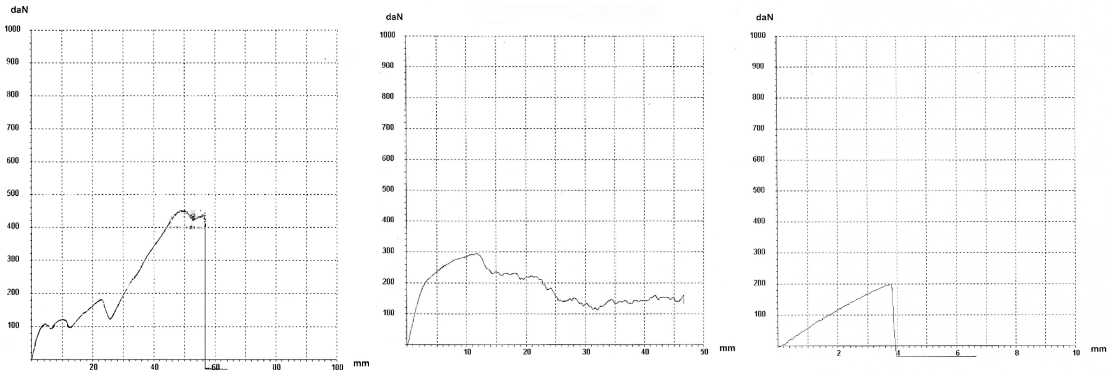
Clase	Tamaño	Resistencia de prueba mínima[a] $[MPa]$	Resistencia mínima[a] a la tensión $[MPa]$	Resistencia mínima[a] a la fluencia $[MPa]$	Módulo de Elasticidad[b] E a $20°C$ $[GPa]$
4.6	M5-M36	225	400	240	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	
5.8	M5-M24	380	520	420	
8.8	M16-M36	600	830	660	211.7
9.8	M1.6-M16	650	900	720	
10.9	M5-M36	830	1040	940	214.5
12.9	M1.6-M36	970	1220	1100	211.1

[a] Las resistencias mínimas son las resistencias que excede 99 % de los sujetadores.
[b] Fuente Pang et al. (2019)

4.3.4. Selección de la Cuerda

Para el emplazamiento del Wasserdrachen, Phillip utilizó cables de acero de 3 [mm] de diámetro con cubierta plástica. El ensayo de tracción realizado al cable en el Laboratorio de Tecnología Mecánica de la UTFSM, concluye que la fuerza máxima que es capaz de soportar es de $F_{max} = 45,1[kN]$. Considerando que la tensión de diseño es $T = 300[kg]$, la resistencia de estos cables resulta más que suficiente.

El problema con estos cables surje tras pocos días de exposición al ambiente marino, cuando se ve fuertemente afectado por el óxido. Considerando esto, se vuelve a someter al cableado al ensayo de tracción, concluyendo que la fuerza máxima capaz de soportar puede disminuir más de la mitad. Ver figura 4.17.



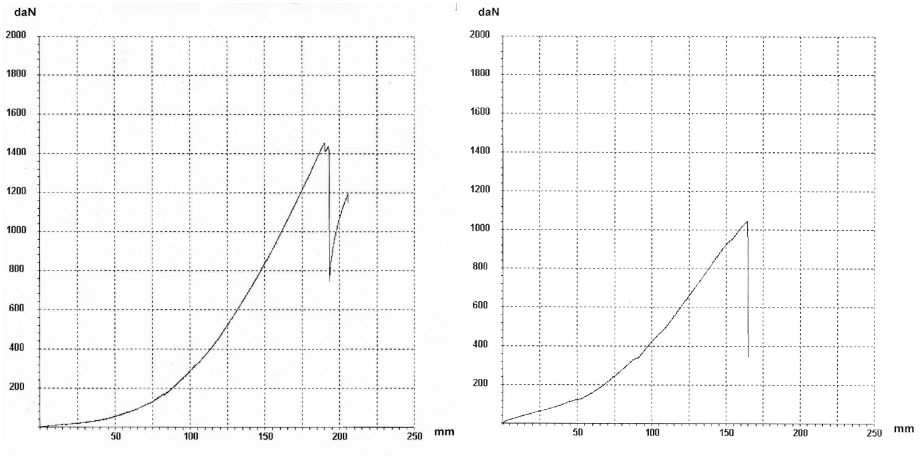
(a) Cable Nuevo. Velocidad $5[mm/min]$. $F_{max} = 45{,}1[kN]$

(b) Cable Semioxidado. Velocidad $20[mm/min]$. $F_{max} = 29{,}4[kN]$

(c) Cable Oxidado. Velocidad $20[mm/min]$. $F_{max} = 19{,}9[kN]$

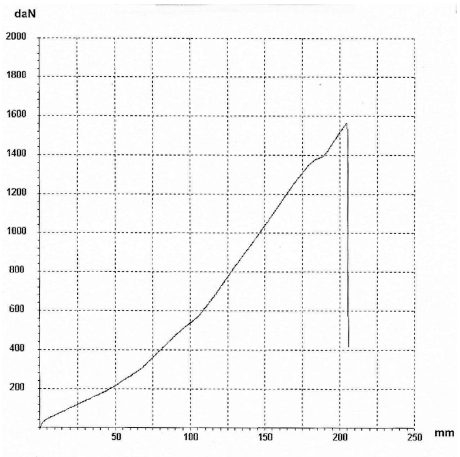
Figura 4.17: Gráficos de Fuerza Aplicada vs. Deformación generado para pruebas de tracción realizada a cable de $3[mm]$ utilizado por Phillip en su prototipo.

Consierando esto, se opta por utilizar una cuerda de tres hebras de nylon torcido. Se define a priori un diámetro $d_{cuerda} = 12[mm]$, y se testea su capacidad a la tracción bajo cuatro condiciones: cuerda pura; cuerda con nudo simple en el centro, unión mediante nudo en 8; y unión mediante entramado. Siendo esta última la más resistente, superando incluso a la cuerda pura. Los resultados de esta prueba pueden verse en la figura 4.18, así como el estado final de las cuerdas posterior a la prueba destructiva en la figura 4.19.

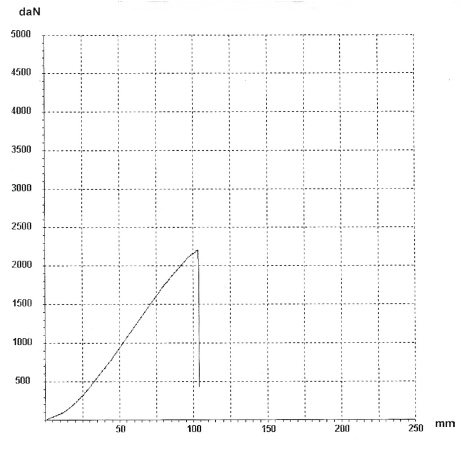


(a) Cuerda Pura.
Velocidad $20[mm/min]$.
$F_{max} = 145,5[kN]$

(b) Cuerda con nudo al centro.
Velocidad $100[mm/min]$.
$F_{max} = 104,6[kN]$



(c) Unión mediante nudo en 8.
Velocidad $100[mm/min]$.
$F_{max} = 156,2[kN]$



(d) Unión por entramado.
Velocidad $100[mm/min]$.
$F_{max} = 220,7[kN]$

Figura 4.18: Gráficos de Fuerza Aplicada vs. Deformación generado para pruebas de tracción realizada a cuerda de tres hebras de nylon torcido. $d_{cuerda} = 12[mm]$.



Figura 4.19: Estado cuerdas posterior a prueba de tracción. De izquierda a derecha: cuerda con nudo central, cuerda con unión por entramado, cuerda con unión por nudo en 8.

4.3.5. Diseño y Manufactura de Poleas

Los primeros bocetos y acercamientos conceptuales, mostrados en la figura 4.20, permiten visualizar que el diseño de las poleas debe ajustarse a los parámetros dimensionales de las piezas que las rodean. Estos parámetros son: el diámetro de cuerda, de los ejes y de los rodamientos. Además, el material del que están hechas, debe ser capaz de soportar la tensión de diseño.

A continuación se explican las principales etapas involucradas en el diseño y fabricación de las poleas.

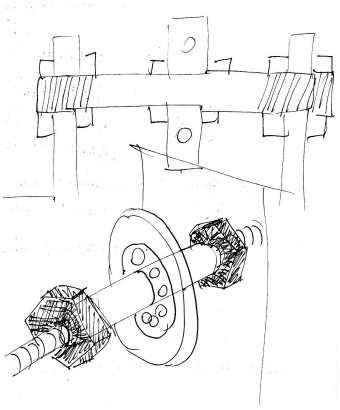


Figura 4.20: Primeros bocetos de poleas que incluyen rodamientos y separadores.

Selección Rodamientos

La elección de rodamientos debe responder a los requerimientos de diseño de la máquina. De esta forma los criterios de selección fueron:

- Resistencia a ambiente corrosivo
- Capacidad de Carga dinámica: Debe ser igual o superior a la tensión de diseño $T = 300[kg]$
- Tipo de carga: Radial
- Baja resistencia a la fricción
- Dimensiones acorde al diseño

Teniendo esto en cuenta se sigue el proceso de selección recomendado por el fabricante[2], utilizando como parámetro de entrada el diámetro interno d, el que debe ser igual al diámetro de eje d_{eje}. Luego se corrobora que la capacidad de carga dinámica básica C sea igual o superior a la tensión de diseño T.

Se opta por utilizar rodamientos rígidos de acero inoxidable con una hilera de bolas. Se selecciona el modelo W638-2RS1, cuya ficha técnica se presenta en el Apéndice C.

Considerando que el rodamiento seleccionado tiene un ancho $B = 9[mm]$ y la cuerda un diámetro $d_{cuerda} = 12[mm]$, se decide utilizar dos rodamientos por polea, de forma que el ancho de la polea sea superior al diámetro de la cuerda y la carga se distribuya de la forma más uniforme posible.

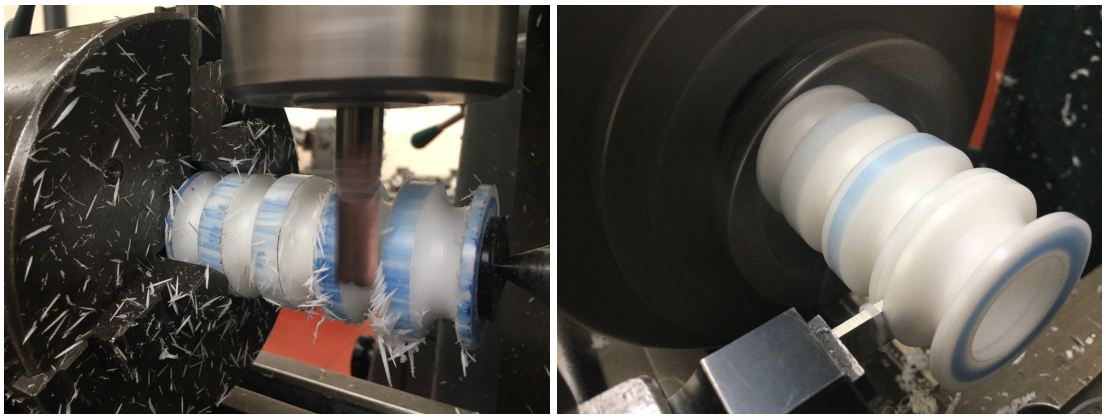
[2] https://www.skf.com/cl/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process

Selección de Material y Manufactura

La selección del material se hace en función de las posibilidades de manufactura existentes en la universidad, se decide utilizar un plástico conocido como *Technyl* cuya ficha técnica se presenta en el Apéndice D.

El Technyl es una poliamida (PA) de tipo 6, que se caracteriza por sus propiedades mecánicas. Posee una alta resistencia mecánica, rigidez y dureza. Además de una buena resistencia a la fatiga, impacto y vibraciones. Al ser fácil de mecanizar, es ampliamente preferido para la manufactura de bujes, poleas, engranajes, ruedas y guías de desgaste.

Las tres poleas se fabrican en el taller de metalmecánica de la UTFSM, a partir de una barra de $50[mm]$ de diámetro. en la figura 4.21 se pueden observar el fresado de los surcos, y el tronzado final del proceso de mecanizado.



(a) Mecanizado de zurcos con fresa cilíndrica de punta plana

(b) Tronzado en torno mecánico para obtensión de polea terminada.

Figura 4.21: Mecanizado de poleas en fresa y torno. Taller metalmecánica UTFSM

4.3.6. Soporte-Horquilla Polea Central y Guías

El Soporte-Horquilla de la polea central, funciona como interfaz, fijando la polea P_c a la celda de carga. Entonces, esta pieza debe resistir la tensión de diseño y los efectos del agua salada.

En la figura 4.22 se presenta un boceto del primer acercamiento conceptual de este soporte. Finalmente se desarrollan dos alternativas. La primera soldando dos escuadras de acero galvanizado; y la segunda mecanizando una barra maciza de acero 1045. Ambas alternativas se presentan a continuación.

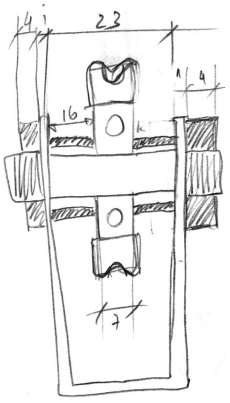


Figura 4.22: Concepto polea central

Cuadro Acero Galvanizado

Este concepto consiste en la unión por TIG de dos ángulos de refuerzo de $3''$x$3''$, y busca rescatar tanto la resistencia a la corrosión del acero galvanizado, como la simpleza de utilizar como base constructiva dos piezas disponibles en el comercio.

Finalmente esta propuesta se descarta pues la geometría obtenida no es satisfactoria. La cuadratura final del marco no permite lograr un alineamiento óptimo, generando *condiciones de carga adversas* como cargas excéntricas (ver Apéndice A).

Como consecuencia de esto, se sopesan las dificultades y consideraciones de seguridad que se deben tener al soldar acero galvanizado:

1. Acceso a soldadora TIG
2. Espacio de trabajo equipado con extractor de aire para eliminar el humo con alto contenido de oxido de zinc. En las figuras 4.23a y 4.23b se puede observar cómo se solidifica el humo posterior a la soldadura, adoptando una textura similar a la de una *telaraña* o a la del *algodón de azucar*.
3. El revestimiento de zinc desaparece en las zonas afectadas por el arco, lo que obliga un tratamiento posterior para devolver las características anticorrosivas.

Teniendo esto en cuenta, se entiende que la simpleza de este concepto no es tal si no se cuenta con las condiciones de trabajo requeridas. Además, durante la segunda parte del desarrollo de este trabajo de título, la universidad se mantuvo cerrada por el COVID-19, lo que imposibilita el uso de los talleres y obliga a buscar nuevas alternativas de fabricación.

A pesar de esto, el concepto recién planteado se mantiene para la construcción del marco de las guías. Estos marcos, junto con la interfaz desechada, se muestran en la figura 4.23c



(a) Prueba con retazos. **(b)** Cuadro recién soldado. **(c)** Cuadros terminados

Figura 4.23: Construcción de cuadros de acero galvanizado para guías y primer concepto de soporte-interfaz.

Diseño de Guías

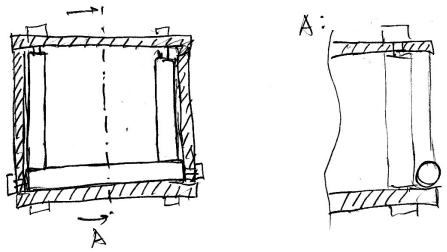


Figura 4.24: Concepto de Guía

Si bien las guías no son parte directa del sistema de poleas, son esenciales para su correcto funcionamiento. Estas se diseñan con dos propósitos. Por un lado se busca eliminar el roce que se producía con los cables del sistema propuesto por Phillip. Y por otro, se busca evitar posibles *descarrilamientos* de la cuerda.

En la figura 4.24 se muestra el concepto desarrollado inicialmente. Y en la figura 4.23c se muestran los cuadros recién fabricados, sin armar ni montar.

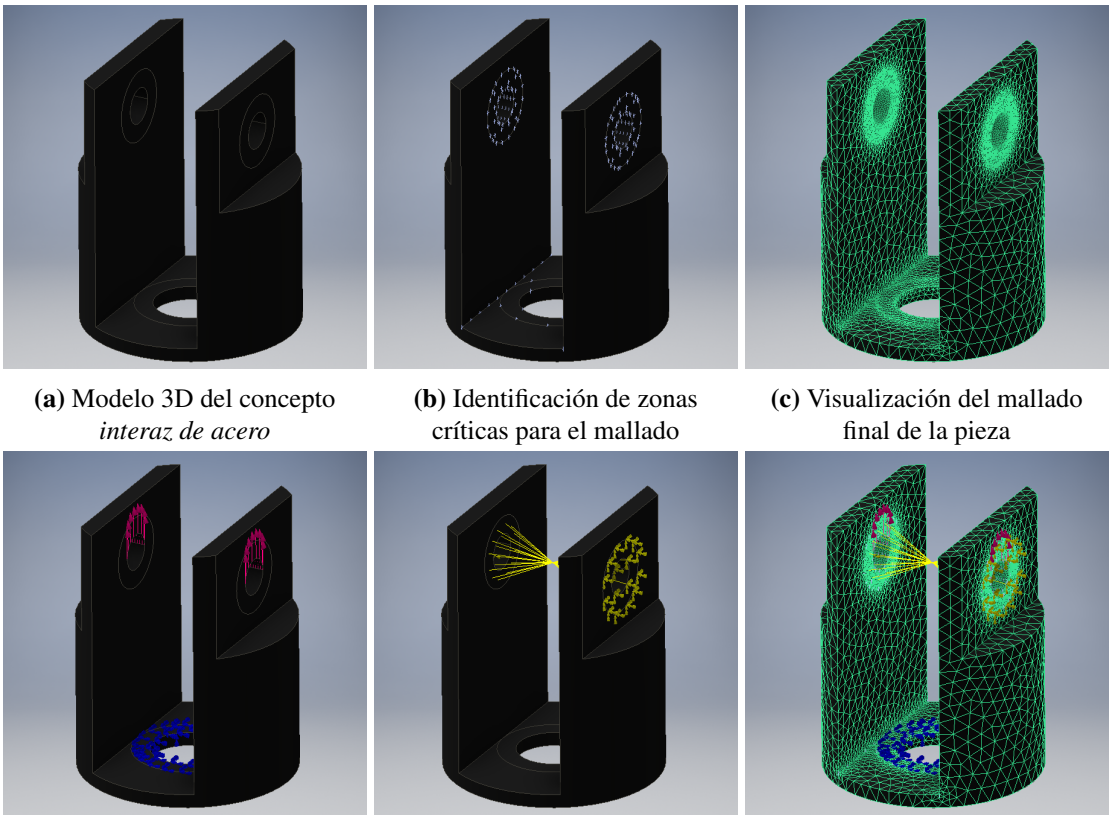
Soporte-Horquilla de Acero 1045

En base a lo expuesto anteriormente, se analiza la posibilidad de mandar a mecanizar una pieza sólida de acero 1045. El boceto del concepto propuesto se presenta en la figura 4.25a, notar que la pieza se mecaniza a partir de una barra cilíndrica considerando que es más fácil de conseguir en el mercado un retazo con las dimensiones requeridas.

Si bien este acero no es resistente a la corrosión, es posible revestirlo con pintura zincada; procedimiento que de todas formas habría sido necesario con los marcos de acero galvanizado afectados por el arco de la soldadura.

Para predecir el comportamiento de esta pieza, se hace una análisis estático lineal mediante un software de elementos finitos. A continuación se exponen algunos de los criterios utilizados.

Mallado Para el grueso de la pieza se utiliza un tamaño de elementos de $3[mm]$, que corresponde a la configuración por defecto. Además, en los vertices, aristas y



(a) Modelo 3D del concepto *interaz de acero*

(b) Identificación de zonas críticas para el mallado

(c) Visualización del mallado final de la pieza

(d) Fuerza aplicada (fuccia) y restricción de movimiento (azul)

(e) Ideailzación de la polea mediante un *conector*

(f) Visualización de todas los criterios

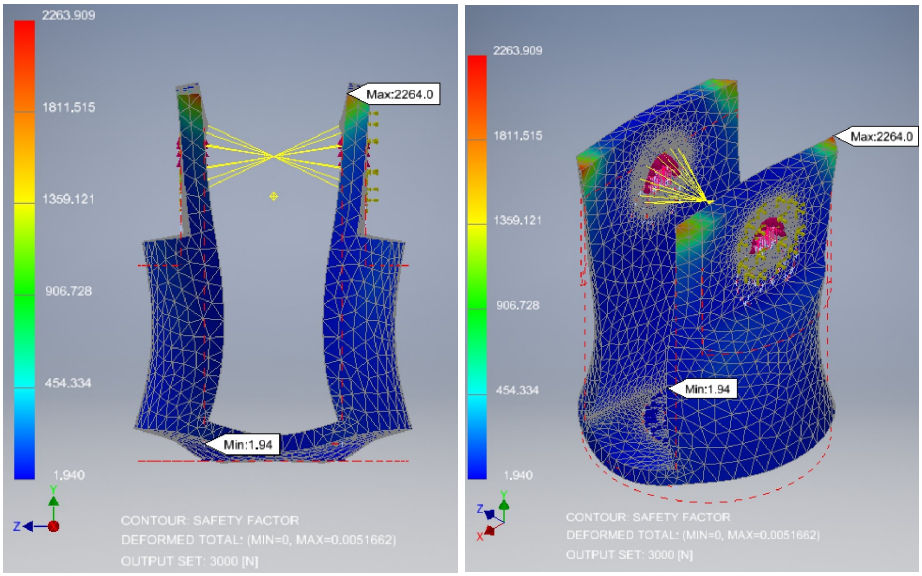
Figura 4.25: Criterios utilizados para la simulación de la horquilla con software de elementos finitos.

superficies cercanas a los orificios del perno de fijación y del eje, se setea un mallado más fino de $0{,}5[mm]$. Las zonas seleccionadas para el mallado fino se presentan en la figura 4.25b, y el mallado final en la figura 4.25c.

Fuerza Aplicada y Restricción de movimiento La fuerza se setea como una carga distribuida de $3000[N]$ en la mitad superior del manto de los orificios del eje. Así mismo la restricción de movimiento se aplica en la superficie que tiene contacto con la cabeza del perno de fijación. Esto se muestra en la figura 4.25d.

Conectores Se utiliza un *conector* tipo *cuerpo sólido* que unifica las dos superficies encontacto con las golillas (ver figura 4.25e).

Los resultados arrojados por la simulación entregan un factor de seguridad mínimo de $FS = 1{,}94$ (ver figura 4.26). Esta magnitud se considera más que suficiente teniendo en cuenta que la tensión de diseño ya está sobredimensionada. (ver sección 4.2.1).



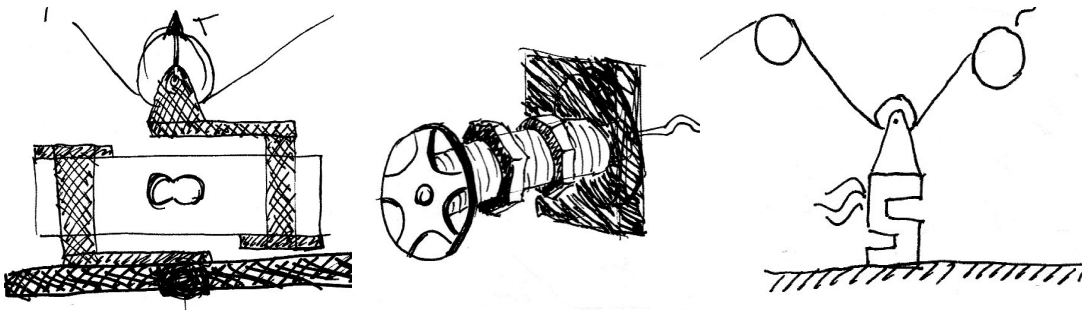
(a) Vista Frontal **(b)** Vista Isométrica

Figura 4.26: Factor de seguridad entregado por modelación con software de elementos finitos para la horquilla de la polea central.

4.3.7. Transductor de Fuerza

Se comparan tres posibles configuraciones que responden a tres tipos distintos de celdas:

1. **Single Point Load Cell** o celda de carga de un sólo punto, o de punto único (ver figura 4.27a). Es la primera en ser evaluada por su bajo costo y por ser la más utilizada en prototipos de pesaje en base a arduino. Finalmente se descarta por su baja capacidad de pesaje (máximo 50 kg.)
2. **Roller Tension Sensor**, o celda de carga con rueda (ver figura 4.27b). Este tipo de celda es ideal para medir la tensión de cuerdas o cintas en movimiento. Pero su rango de medición es muy acotado y su costo muy elevado.
3. **S-beam Load Cell**, o celda de carga tipo S (ver figura 4.27c). Se decide utilizar esta celda por su amplio rango de medición. El principio de medición es el mismo que el de un dinamómetro de resorte, que es el método utilizado en la etapa de dimensionamiento (ver Sección 4.2.1).



(a) Single Point Load Cell **(b)** Roller Tension Sensor **(c)** S-beam Load Cell

Figura 4.27: Bocetos para distintos tipos de celda y su configuración

Tras decidir el tipo de celda a utilizar, se hace un estudio de mercado y se decide importar una celda de carga china vía *aliexpress*. Una celda de carga de procedencia alemana puede llegar a costar hasta ocho veces más. Entonces, considerando que se trata de la construcción de un prototipo, no resulta conveniente experimentar con instrumentos de alta gama, más aún considerando que serán expuestos a ambiente marino.

La Tabla 4.11, muestra la cotización de cuatro celdas de carga tipo S. Ninguna de los modelos posee una *datasheet* oficial, lo que los vuelve difíciles de comparar. Finalmente, se opta por el modelo YZC-516, por ser el que ofrece mayor cantidad de información junto con el modelo YZC-YFB, que es descartado por su geometría. Notar que la celda seleccionada está catalogada como C2, que corresponde, según la norma OIML R60, a celdas típicamente utilizadas para básculas sencillas de materiales de construcción como

Cuadro 4.11: Cotización Celdas de Carga tipo S en *AliExpress*

	ZHIPU 1PCSX		ZHIPU 1 PCSX		YZC-5FB		YZC-516	
Precio	33,91	USD	37,03	USD	35,02	USD	42,19	USD
Tiempo Entrega	20-31	días	20-31	días	20-31	días	20-31	días
Overall Dimensions	76x51x19.05	mm	76x51x22	mm	88(56)x44x26	mm	76.2x50.8x28	mm
Rosca	M12x1.75		M12x1.75		M16x2		M16x2	
Capacidad	100, 500, 1000	Kg	50, 100, 500, 1000	Kg	100,500, 1000	kg	100, 500, 1000	kg
Accuracy Class					C2		C2	
Precisión General			0,3	%FS				
Error Combinado					<±0.030	%RO	<±0.030	%RO
Creep			0,5	%FS/30min	0,02	%RO/30min	0,02	%RO/30min
Sensibilidad de Salida	2.0 ± 0.004 3.0 ± 0.008	mV/V mV/V	2 ± 0.1	mV/V	1.5 ± 0.05 2.0 ± 0.05	mV/V mV/V	2.0 ± 0.05	mV/V mV/V
No Linealidad	0.02	%	$\pm$ 0.03	%FS				
Histéresis	0.02	%	$\pm$ 0.03	%FS				
Repetibilidad	0.02	%	0.02	%FS				
Zero Balance	2.0 ± 0.004				±1.0	%RO	±1.0	%RO
max number of verification interval					2000	n_{max}	2000	n_{max}
minimum load cell verification intervals					$E_{max}/5000$	v_{min}	$E_{max}/5000$	v_{min}
Output Temperature Coeficient	0.02	%/°C	±0,03	%FS/10°C	0.0016	%RO/°C	0.0017	%RO/°C
Zero Temperature Coefficient	0.026	%/°C	±0,03	%FS/10°C	0.003	%RO/°C	0.005	%RO/°C
Rango Temperatura funcionamiento	de -20 a +65	°C	de -20 a +70		de -35 a 80	°C	de -35 a 80	°C
Rango Temperatura compensada	de -10 a +55	°C			de-10 a 40	°C	de-10 a 40	°C
Impedacia Entrada	405 ± 30	Ω	700 ± 15	Ω	365±10	Ω	365±10	Ω
Impedancia Salida	405 ± 30	Ω	650 ± 15	Ω	350±3	Ω	350±3	Ω
Resistencia de Aislamiento	5000	MΩ	5000	MΩ	5000	MΩ(50V)	5000	MΩ(50V)
Voltaje de Excitación Recomendado Voltaje de Excitación Máximo	12 18	VDC V	10	VDC	10 15	V	5 12	V
Sobre carga segura	150	%	150	%FS	150	%RO	150	%RO
Sobre carga última	200	%			200	%RO	200	%RO
Material	Alloy Steel Stainles Steel		Alloy Steel	40CrNiMo	alloy steel		alloy steel	

arena, cemento o agua. Además se destacan el *Error combinado*, el *Creep* y el *Zero Temperature Coefficient*, que son las características principales para definir la calidad de una celda de carga. Las definiciones de estas y otras propiedades se encuentran en el Apéndice A.

Si bien una celda de carga con capacidad máxima $E_{max} = 500[kg]$ es la adecuada para la tensión de diseño definida como $T = 300[kg]$. Se importa la celda de carga con capacidad $E_{max} = 1000[kg]$.

Esto implica que el rango de trabajo de la celda se encontrará muy por debajo de su capacidad nominal. En estos casos cobra impotancia el *intervalo mínimo de verificación* v_{min}.

Como es posible ver en la tabla 4.11, la capacidad máxima E_{max} se relaciona con el *intervalo mínimo de verificación* v_{min} como

$$v_{min} = \frac{E_{max}}{5000} \tag{4.3.23}$$

Luego, para una capacidad de $1000[kg]$, $v_{min} = 0,2[kg]$. Este valor es importante pues

sirve para calcular el Rango Mínimo de Medición, o MMR por sus siglas en inglés:

$$MMR = v_{min} n_{max} \tag{4.3.24}$$

de esta forma, para la celda adquirida de $1000[kg]$ se tiene un $MMR = 400[kg]$. Notar que para una celda de $500[kg]$ se tiene un $MMR = 200[kg]$.

Cápsula de protección del transductor

Considerando que el transductor está ubicado inmediatamente debajo de la polea central por la que pasa la cuerda mojada. Se desarrolla un concepto de cámara protectora que permite la movilidad del transductor en su eje vertical. En la figura 4.28 se muestra un boceto inicial del desarrollo de este concepto.

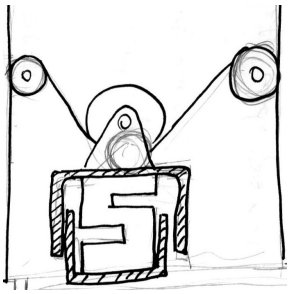


Figura 4.28:
Concepto cápsula

4.4. Evaluación

Para la evaluación del funcionamiento del tensómetro se realizaron procedimientos alternativos producto del cierre de la Universidad por el COVID-19. A continuación se exponen estos procedimientos y se proponen protocolos de calibración y pruebas en terreno con la intensión de servir de insumo para la continuidad del proyecto y futuros memoristas.

4.4.1. Factor de Calibración

El Factor de Calibración (FC), no es más que un factor de conversión que transforma a *kilogramos*, la data proveniente de la celda de carga. Esto se logra mediante la comunicación con el módulo HX711, que actúa como interfaz entre el transductor de fuerza y la placa Arduino UNO (ver sección 5.2.3). De esta forma, es de suma importancia obtener el FC adecuado, pues este es propio para cada celda de carga.

El FC se obtiene cargando al microcontrolador un programa de calibración que utiliza como *input* el voltaje entregado por la celda bajo dos condiciones de carga: primero sin carga y luego se aplica una carga conocida.

Para las pruebas realizadas, se calibra la celda de forma casera, aplicando una carga conocida en compresión de 90 [kg], correspondiente al peso corporal de quien escribe. De esta forma, el factor de calibración obtenido y utilizado para las pruebas en terreno es

$$FC = -4160$$

Notar que este método de calibración es fiable sólo si el voltaje de la celda varía linealmente con la carga aplicada en todo el rango de medición. En la práctica esto no es así, en especial si se tiene en cuenta que la calibración fue realizada a compresión y el diseño del tensómetro somete la celda a tracción. Luego, es necesario revisar el factor de calibración a lo largo de todo el rango de medición.

Es por esto que para futuras investigaciones se propone calibrar la celda de carga con la ayuda de la máquina de tracción del laboratorio de *Tecnología Mecánica de la UTFSM*.

Propuesta de Protocolo para obtener FC

1. Realizar conexiones entre *Celda de Carga–Módulo HX711–Arduino–Computador portátil* según esquema de la figura 4.29.
2. Montar celda de carga en máquina de ensayo a tracción.
3. Cargar programa de calibración en placa Arduino.
4. Correr programa y seguir instrucciones del mismo.
5. Repetir el programa para condiciones de carga en todo el rango de medición, se recomienda realizar mediciones cada 50 [kg].
6. Registrar todos los valores de FC entregados por el programa de calibración y graficarlos en un plano *FC vs. Carga Aplicada [kg]*.
7. Realizar una regresión lineal con los datos obtenidos y estudiar el error.

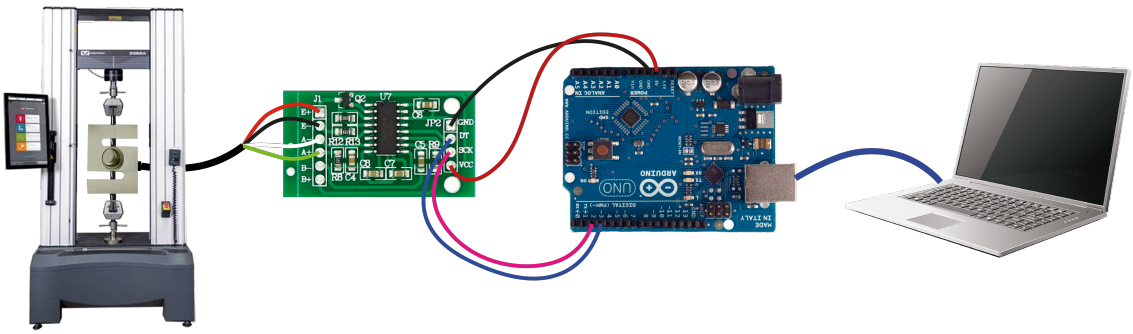


Figura 4.29: Esquema de instalación para estudio del *Factor de Calibración* en maquina de ensayo a tracción.

4.4.2. Pruebas en Terreno

Las pruebas en terreno también debieron ser adaptadas al contexto. Producto de la pandemia no fue posible reunir al equipo en el Canal de Pruebas de Punta Curaumilla, por lo que el montaje del tensómetro a la roca para sondeo de oleaje tuvo que ser pospuesto. En su lugar, se fija el tensómetro a un árbol y la cuerda a una camioneta, tal como se ve en la figura 4.30.

El experimento realizado utiliza la pendiente del terreno de pruebas y el peso de la camioneta para simular el empuje de la ola. A continuación se explica el procedimiento seguido durante las pruebas:

1. Se Fija el tensómetro desde la base utilizando eslinga de amarre alrededor del árbol.
2. Se posiciona camioneta en el mismo eje del tensómetro.
3. Se amarra la cuerda a la parte trasera de la camioneta.
4. Se conectan el transductor de fuerza y el sensor de temperatura y humedad al circuito.
5. Se corrobora la carga de batería con Voltímetro.
6. Se formatea tarjeta SD.
7. Se conecta arduino a computador portátil para monitorear la medición desde la pantalla (este paso puede obviarse prestando atención a los avisos del LED).
8. Se conecta tarjeta SD y encender el tensómetro.
9. Se espera que tensómetro comience a medir y luego se presiona el pulsador para comenzar a guardar la información en la tarjeta SD.
10. Se libera el freno de la camioneta y se deja caer suavemente hasta que todo el peso de la misma esté soportado por la cuerda. Esto es importante para tener una noción de cuánto es el peso de la camioneta.
11. Desde esta posición se marca un punto cero de referencia en el piso.
12. Se retrocede la camioneta $1[m]$ aproximadamente, se marca la posición en el piso y se deja rodar libremente. Esto se repite cinco veces
13. Para la última prueba se aumenta la distancia a $1,5[m]$ aproximadamente.



Figura 4.30: Pruebas en Terreno: Tensómetro fijado a árbol con eslinga de amarre y cuerda anclada a camioneta en pendiente.

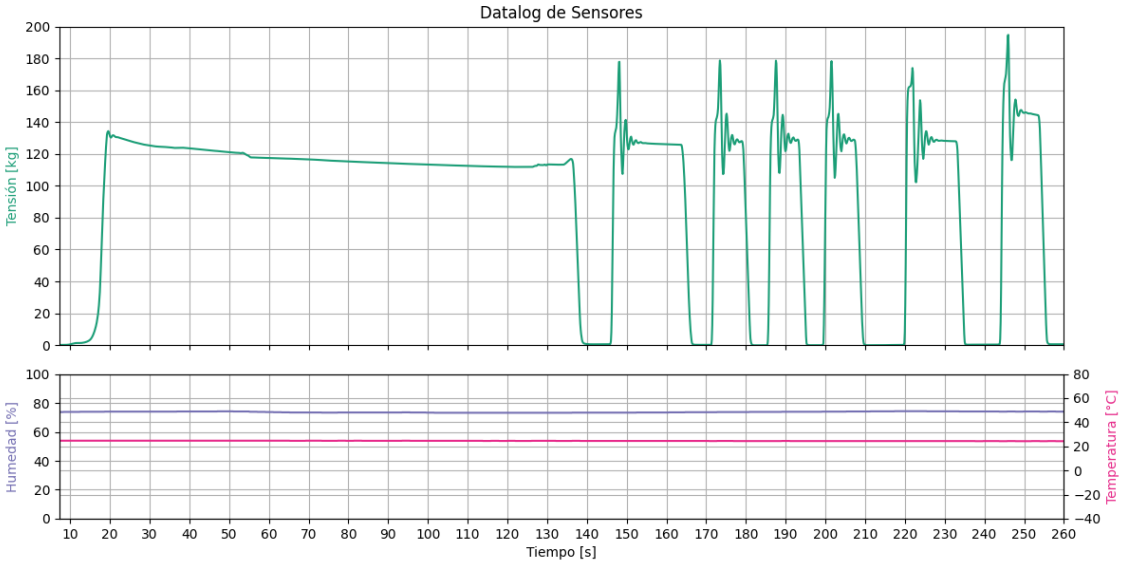


Figura 4.31: Gráficos de Tensión $[kg]$, Temperatura $[°]$ y Humedad $[\,\%]$ construidos con la data recolectada por el tensómetro.

Durante las pruebas, se graban a la tarjeta SD un promedio de $8{,}9$ líneas de data cada segundo. Lo que significó un total de 2381 líneas escritas en el formato descrito en la sección 4.2.1.

Los resultados de la medición se grafican en la figura 4.31. En ella se observan siete *montes*. El primero se debe al punto *10* del procedimiento descrito. Los cinco picos siguientes corresponden al punto *12*. Y finalente el último pico describe lo ocurrido en el punto *13*.

En la tabla 4.12 se incluyen los valores máximos y mínimos registrados durante la experiencia.

Cuadro 4.12: Pruebas en Terreno: valores máximos y mínimos medidos para Tensión de la Cuerda, Temperatura y Humedad.

Parámetro	Mínimo medido	Máximo medido
Tensión $[kg]$	$-0{,}16$	$194{,}88$
Temperatura $[°C]$	$24{,}3$	$24{,}7$
Humedad $[\,\%]$	73	$74{,}3$

Capítulo 5

Prototipo Final

Este capítulo entrega, por una parte, información general sobre el funcionamiento del dispositivo, y por otra, información específica de las piezas y subsistemas del mismo. Los componentes se describen desde un enfoque funcional, sus dimensiones pueden revisarse en los planos presentados en el apéndice B

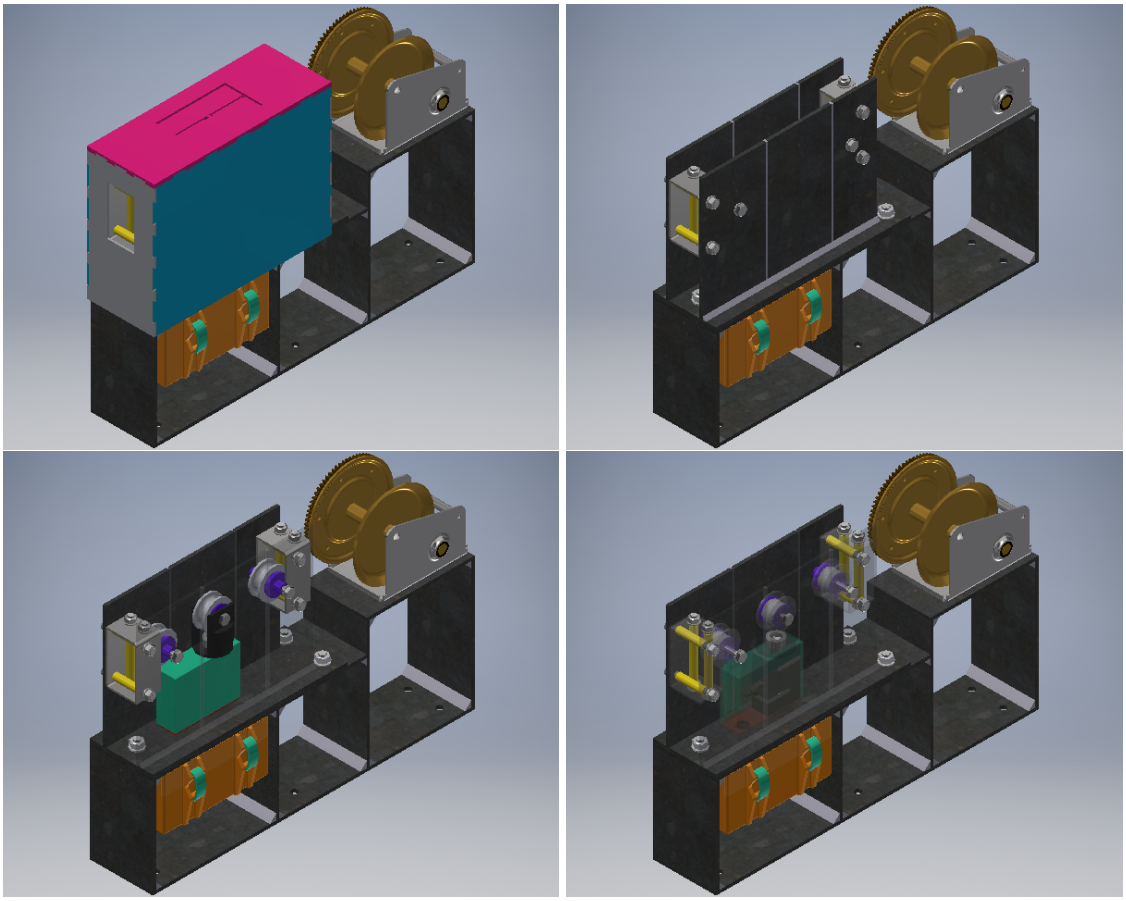


Figura 5.1: Vista isométrica del modelo CAD del dispositivo con distintos grados de transparencia.

5.1. Elementos Estructurales y de Protección

5.1.1. Base del Dispositivo: 300.200.000

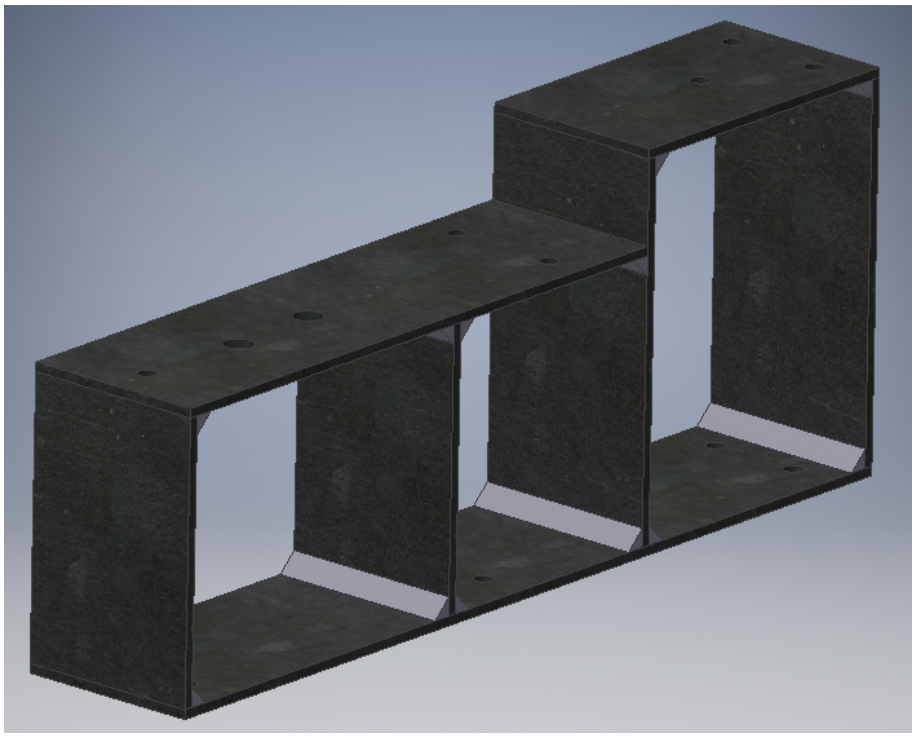


Figura 5.2: Base del Dispositivo

La base del dispositivo se monta directamente sobre la roca y se construye en base a pletinas de acero *Cintac A270ES* de $5[mm]$ de espesor.

Este elemento se constituye de tres niveles, cada uno encargado de soportar una estructura diferente. En el nivel superior se monta el *Winche*, en el intermedio el *Cuerpo del Tensómetro*, y en el inferior la *Caja Electrónica*.

5.1.2. Cuerpo del Tensómetro: 100.000.000

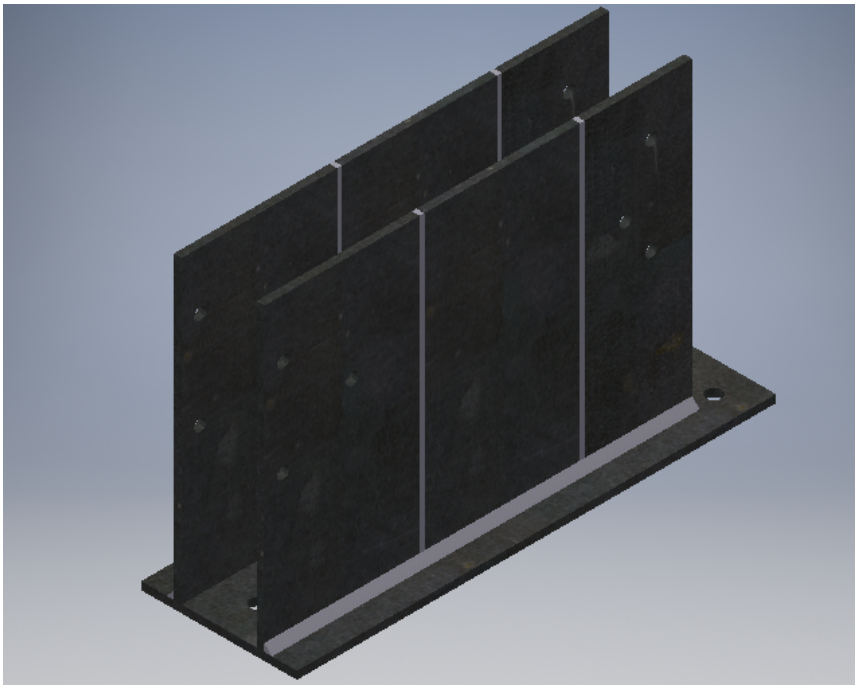


Figura 5.3: Bocetos para distintos tipos de celda celda y su configuración

Es el elemento que soporta el sistema de medición en función de la geometría descrita en la sección 4.3.1. Es decir, sobre él se montan las poleas P_1 y P_2 con sus respectivas guías. Además, en su interior se monta el *Transductor de Fuerza* (dentro de su cápsula) que, a su vez, está unido a la polea central. El cuerpo se contruye, al igual que la base, de pletinas de acero *Cintac A270ES* de $5[mm]$ de espesor.

5.1.3. Poleas

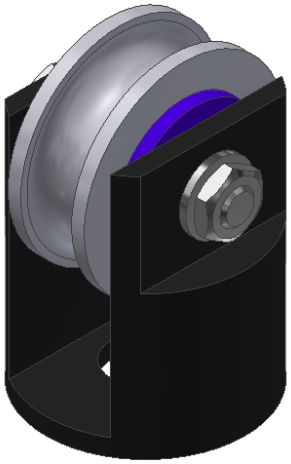


Figura 5.4: Modelo 3d en vista isométrica del conjunto de la polea central.

El tensómetro cuenta con 3 poleas denominadas:

1. P_1 conecta con el dispositivo acuático
2. P_2 conecta con el winche
3. P_c, la Polea Central, conecta con la celda de carga por medio de una horquilla soporte.

Estas se encuentran a la misma altura y espaciadas a $88[mm]$ para conseguir un ángulo de envoltura de $30°$ como se explica en la sección 4.3.1.

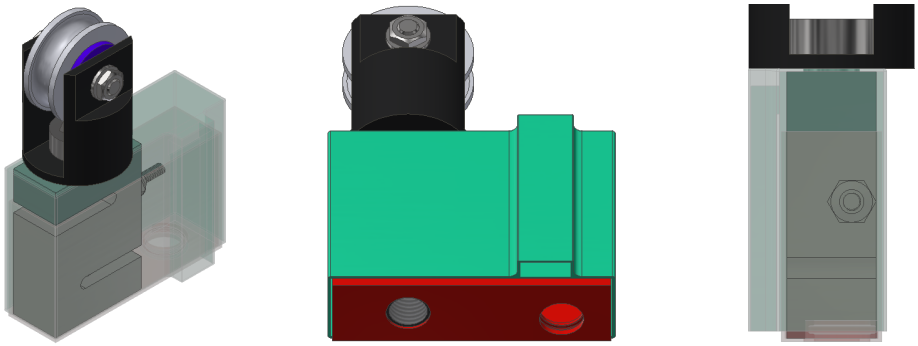
Las poleas se constituyen de 3 componentes principales: cuerpo, rodamientos y eje. La figura **??** muestra el modelo CAD del conjunto de la polea central donde se observan con claridad el cuerpo de la polea y la horquilla-soporte.

Como se explica en la sección 4.3.5, el cuerpo de la polea se mecaniza a partir de un plástico de ingeniería llamado *Technyl*, cuya ficha técnica se presenta en el apéndice D.

A su vez, los rodamientos son rígidos de bolas, modelo *W 638-2RS1*, y se utilizan 2 por polea. Su ficha técnica se incluye en el apéndice C.

En cuanto a los ejes, se instalan los fabricados a partir de una barra roscada de acero inoxidable. La alternativa en base a pernos ASTM también queda disponible considerando que ambas opciones tienen sus ventajas y desventajas expuestas en la sección 4.3.3.

5.1.4. Cápsula del Transductor



(a) Conjunto central con cápsula transparentada

(b) Vista isométrica inferior del conjunto central.

(c) Detalle de canaleta para cable del panel solar

Figura 5.5: Distintas vistas del conjunto central muestran cápsula del transductor.

La cápsula del transductor es un compartimiento cuya función es proteger la celda de carga del agua que ingresa al cuerpo del tensómetro por medio de la cuerda. Está diseñada para permitir la elongación y contracción vertical del transductor. Dentro de ella se alberga también un sensor de temperatura y humedad para monitorear las condiciones de trabajo de la celda.

El hermetismo de la cápsula no es total, pues debe permitir la comunicación de la celda con otros sistemas y estructuras:

Por arriba se conecta con la polea central que tiene contacto directo con la cuerda mojada. (Ver figura 5.5a).

La base de la cápsula cuenta con dos orificios: uno para el perno de fijación del transductor, y otro para conectar la cápsula con la caja eléctrica ubicada en el nivel inferior de la *base* (Ver figura 5.5b). Esta conexión se logra por medio de una tubería de pvc de $16[mm]$ sellada con orrines de goma.

Por el costado cuenta con una entrada para el cable cable de energía proveniente del panel solar este detalle se muestra en la figura 5.5c.

5.1.5. Guías

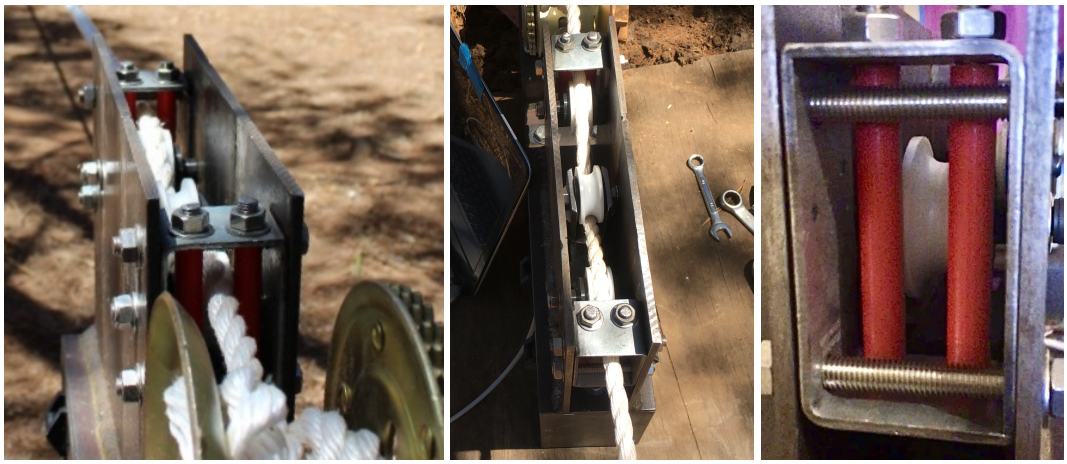


Figura 5.6: Guías instaladas y en funcionamiento desde distintos ángulos.

Son los elementos encargados de *encausar* la cuerda hacia la polea, evitando que se desmonte del arreglo de medición, además de evitar deterioro por roce excesivo. La primera se ubica a la *entrada* del *Cuerpo del Tensómetro* entre la polea P_1 y el dispositivo acuático; y la segunda se encuentra a la *salida*, entre la polea P_2 y el *Winche*. Las guías están compuestas por dos componentes principales: el marco y los bujes guía.

El Marco cumple la función de soportar y unificar el sistema de medición en una sola pieza fácil de extraer, para facilitar su mantenimiento. Ambos marcos (entrada y salida), se montan al *cuerpo del tensómetro*, y fueron fabricados a partir de dos ángulos de acero galvanizado soldados sin adición de material con electrodo de tungsteno (TIG).

Los Bujes Guía direccionan la cuerda hacia el sistema de poleas al estar alineados con este. Cada guía utiliza dos pares que delimitan el movimiento de la cuerda de forma horizontal y vertical. Son fabricados a partir de ejes roscados M8 de acero inoxidable 304; recubiertos de un cilindro de libre movimiento fabricado mediante impresión 3D.

Cabe mencionar que los bues horizontales también cumplen la función de elemento de fijación.

5.1.6. Caja Electrónica

Su función es albergar y proteger todo el sistema electrónico descrito en la sección 5.2. Fue diseñada con software CAD y fabricada mediante impresión 3D. Consta de dos elementos principales, una tapa superior y otra inferior.

- La superior va unida a la estructura *base del dispositivo* con el mismo perno de fijación de la celda de carga. Además conecta con la cápsula del transductor por medio de una tubería de pvc sellada con orrines.
- La inferior es la que alberga la electrónica, y *cuelga* de la tapa superior por medio de cuatro ganchos que cierran la caja.

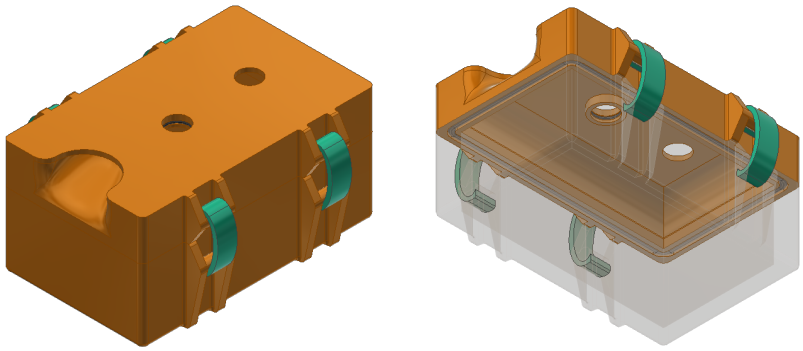


Figura 5.7: Dos vistas del modelo CAD de la Caja Electrónica

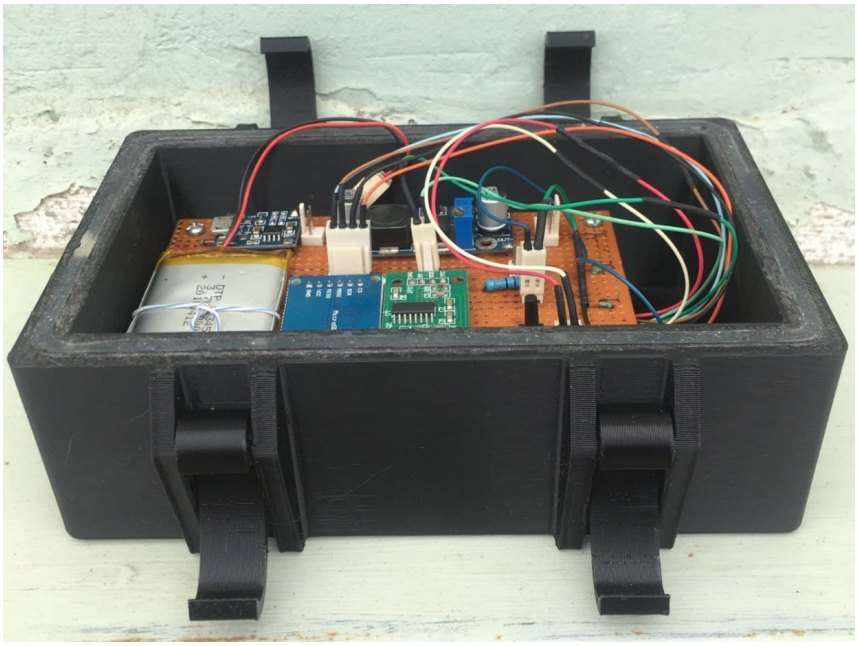


Figura 5.8: Tapa inferior de la caja con circuito en su interior.

5.2. Sistema Electrónico

En esta sección se describe el funcionamiento del sistema electrónico de medición, y los subsistemas que lo conforman.

En la figura 5.10 se puede observar la esquemática de conexiones, esta imágen se complemente con la tabla 5.1 que enlista las conexiones entre los pines de cada módulo.

El resultado final del circuito construido se puede observar en la figura 5.9.

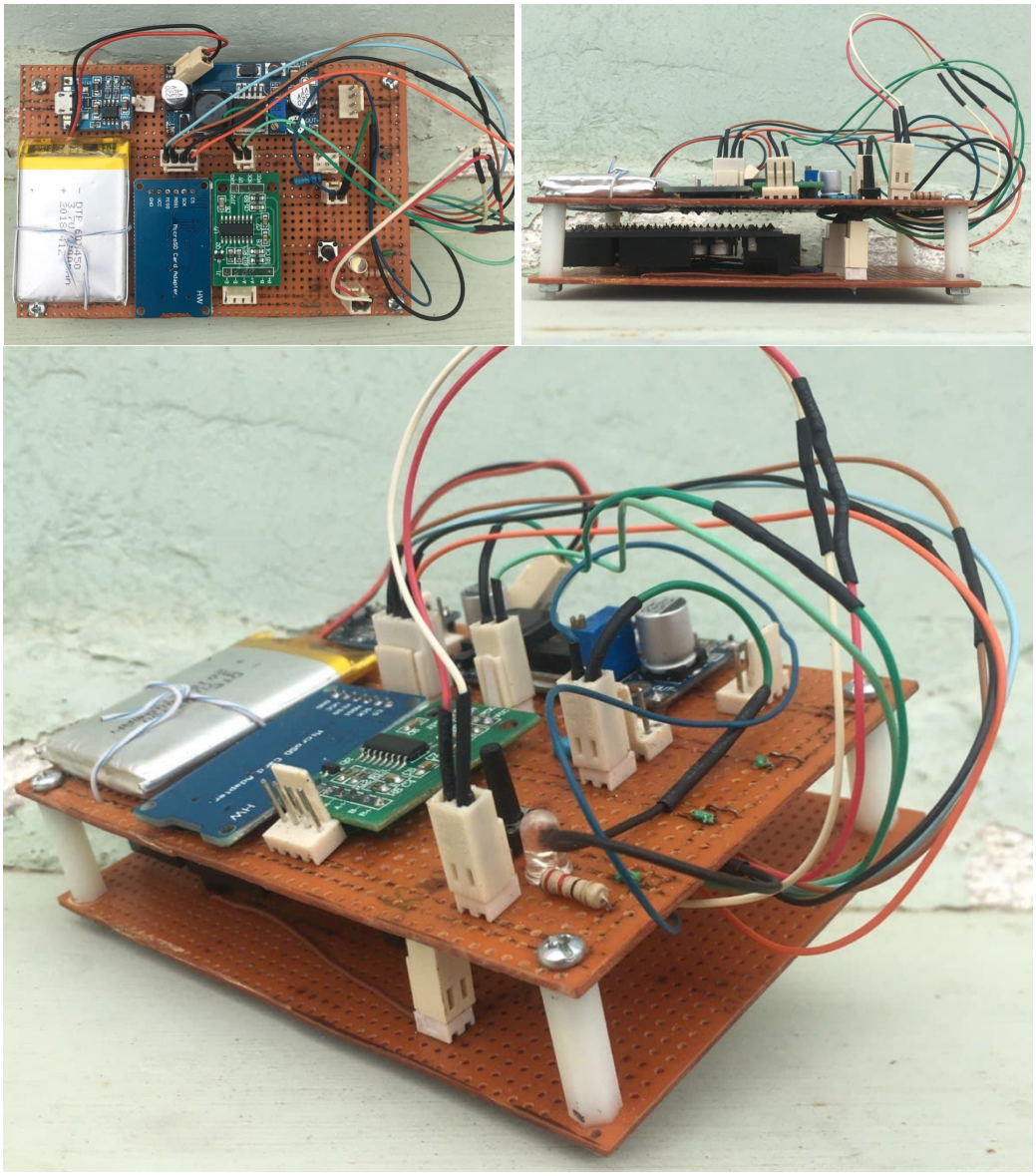


Figura 5.9: Tres vistas del circuito en su estado final.

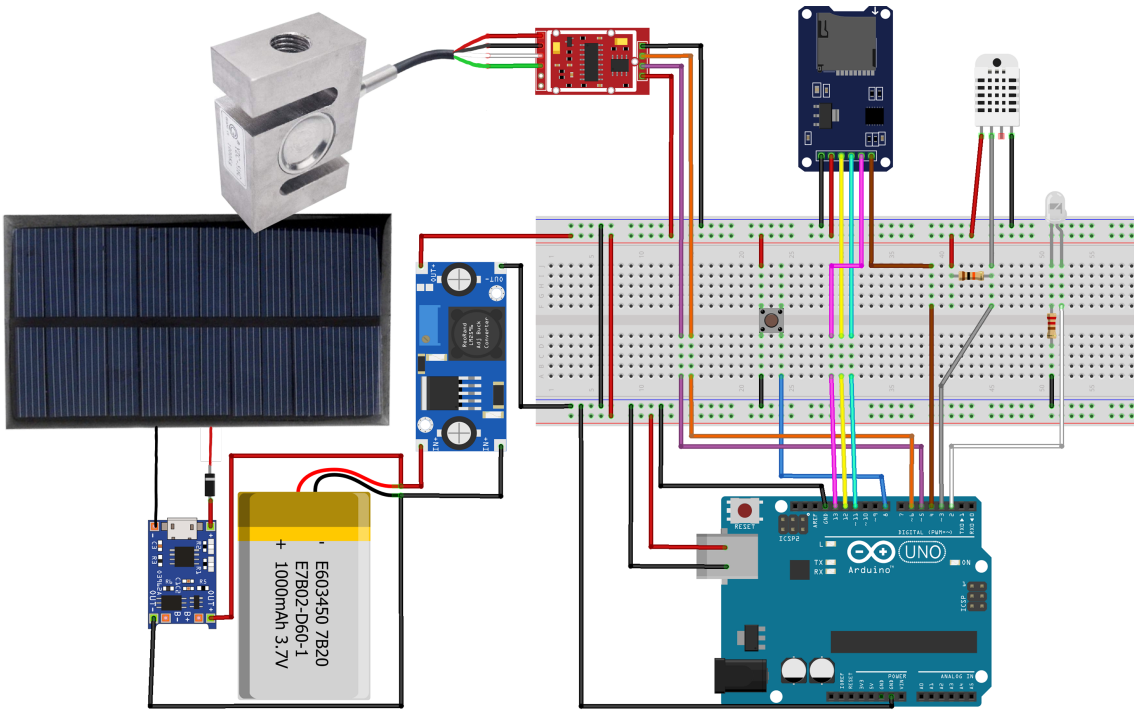


Figura 5.10: Esquema de conexiones del circuito electrónico.

Cuadro 5.1: Tabla de conexiones

HX711	DT SCK	∼6 ∼5	Arduino
HX711	A+ A- E+ E-	Blanco Verde Rojo Negro	Celda de Carga
DHT22	Dout	∼3	Arduino
Puerto micro SD	CS MOSI MISO SCK	4 ∼11 12 13	Arduino
	LED	2	Arduino
	Botón	8	Arduino

5.2.1. Subsistema de Energización

Como ya se ha mencionado antes, la autonomía energética del dispositivo se logra a partir de la captura y almacenamiento de energía solar. Esto por medio de una celda fotovoltaica que entrega energía a una batería que aporta un voltaje constante de $3{,}7[V]$ que luego es amplificado hasta $5[V]$ que es el voltaje de funcionamiento todos los componentes del sistema.

Panel Solar

El modelo utilizado corresponde a un panel solar policristalino ampliamente utilizado para prácticas electrónicas, o para alimantar circuitos de bajo consumo. Sus características técnicas se presentan en la tabla 5.2, así como una imagen de referencia en la figura 5.11. Este elemento se selecciona en función de los criterios presentados en al sección 4.2.1.

Cuadro 5.2: Características técnicas panel fotovoltaico policristalino

Voltaje nominal de salida	$6[VDC]$
Corriente nominal de salida	$165[mA]$
Potencia	$1[W]$
Tamaño	110 x 60 x $3[mm]$



Figura 5.11: Imagen referencial del panel fotovoltaico policristalino.

Cargador Batería

Para cargar la batería se utiliza el módulo TP4056 de la figura 5.12.

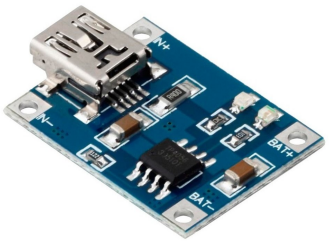


Figura 5.12: Cargador de Batería TP4056

- Voltaje de entrada: $4{,}5 - 5{,}5[V]$
- Corriente máxima e carga: $1000[mA]$
- Voltaje de corte de carga (cut-off): $4{,}2 \pm 1[V]$
- Protección contra sobre descarga: $2{,}5[V]$
- Protección de sobreccorriente: $3[A]$
- Temperatura de Operación: $-10°C$ a $85°C$
- Dimensiones: $17{,}2[mm]$ x $27{,}55[mm]$
- Interfaz entrada: Puerto micro USB o pines IN$+$ IN$-$

Batería

Se utiliza una batería de Ion de Litio o LiPo como la de la figura 5.13 con circuito incorporado de protección contra sobre carga y descarga.



Figura 5.13: Imágen referencial Batería

- Salida Nominal: $1000[mAh]$ a $3{,}7[V]$
- Temperatura de Operación: $-35°C$ a $60°C$
- Dimensiones $6[mm]$ x $34[mm]$ x $52[mm]$
- Peso: $22[g]$
- Tasa de auto descarga: $< 8[\,\%/mes]$

Regulador de Voltaje Step-Up

El circuito LM25577 se utiliza para incrementar el voltaje entregado por la batería de 3.7[V] a 5[V].

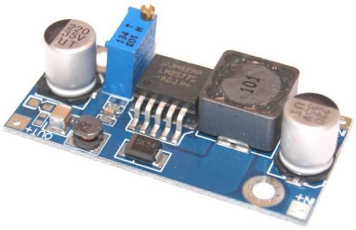


Figura 5.14: Regulador de voltaje Step-Up LM2577

- Rango de voltaje de salida: 4 a $35[V]$.
- Corriente máxima de salida: $3[A]$ (Disipación es necesaria).
- Eficiencia de conversión: $92\,\%$.
- Frecuencia de switcheo: $50[kHz]$
- Temperatura de operación: $-40°C$ a $85°C$ (hasta $10[W]$).
- Regulación de carga: $\pm 0{,}5\,\%$.
- Regulación de voltaje: $\pm 0{,}5\,\%$.

5.2.2. Subsistema de Sensores

Sensor de Temperatura y Humedad



Figura 5.15: Sensor de Temperatura y Humedad DHT22

El DHT22 es un sensor de bajo costo, capaz de medir temperatura (T) y humedad relativa (RH). Posee una interfaz serial propietaria, por lo que requiere de sólo un pin para comunicarse con un microcontrolador.

- Voltaje de de excitación nominal : $3 - 5[V]$
- Corriente máxima: $2{,}5[mA]$
- Rango medición RH: $0 - 100\,\%$
- Precisión RH: $2 - 5\,\%$
- Rango medición T: -40 a $80°C$
- Precisión T: $\pm 5°C$
- Frecuencia de muestreo: max $0{,}5[Hz]$

Transductor de Fuerza

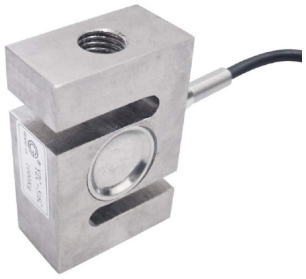


Figura 5.16: Celda de Carga YZC 516 C

Se utiliza un transductor de fuerza tipo S, modelo YZC 516 C como el de la figura 5.16. Se instala para medición a tracción, pero también puede utilizarse en compresión.

Si bien las características técnicas se presentan en detalle en la tabla 4.11, a grandes rasgos cabe mencionar que se trata de una celda clasificada como C2, que entrega un $0{,}03\,\%FS$ de error combinado, y una sensibilidad de $2 \pm 0{,}05[mV/V]$.

Su resistencia está clasificada como IP67, lo que implica una protección total contra el polvo, y una capacidad de ser sumergida hasta $1[m]$ en agua. Esto no se cumple para agua salada.

Ampliamente utilizada para pesaje en correas y silos. También para testeo de materiales y máquinas.

5.2.3. Subsistema de Control y Almacenamiento Información

Este subsistema es el encargado de recibir e interpretar la data proveniente de los sensores. Luego la ordena en un formato de fácil acceso y análisis, y la guardar en una memoria SD extraíble y transportable.

A continuación se describen cada uno de los componentes y su principal función.

Arduino UNO

La descripción técnica de la placa Arduino UNO ya fue presentada en la sección 2.2.2. Específicamente para este subsistema, se desempeña como nodo central del flujo de información, entendiendo esta como *datos* u *órdenes*: todos los componentes se conectan directamente al microcontrolador.



Figura 5.17: Arduino UNO

La data proveniente de los sensores es recibida, ordenada y empaquetada para ser guardada en un archivo llamado "DATALOG.TXT" que se escribe en la memoria SD. Y las señales envíadas por el usuario por medio del botón pulsador, son recibidas e interpretadas para desencadenar acciones. El estado de estas acciones se comunica de vuelta al usuario por medio del LED.

Conversor análogo-digital HX711

Como se explica en la sección 2.1.5, la señal proveniente de la celda de carga, debe ser tratada para poder ser utilizada. El módulo HX711 es un conversor análogo-digital (ADC) de 24-bit, diseñado para ser la interfaz necesaria para sensores de puente como ocurre en el caso del tensómetro.

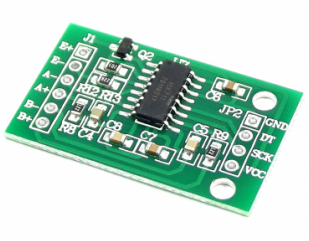


Figura 5.18: Módulo HX711

El módulo cuenta con dos canales de ganancia programable de bajo ruido. Se utiliza el *canal A* programado para una ganancia de 128. Esta es la opción por defecto y que corresponde para un voltaje diferencial de entrada de $\pm 20[mV]$, con una uente de $5[V]$ conectada al pin de alimentación.

Puerto micro SD

Este dispositivo permite guardar la info proveniente de los sensores en una tarjeta micro SD. El módulo utiliza el estándar de comunicación Bus SPI (Serial Peripheral Interface), compatible con Arduino.



Figura 5.19: Puerto Micro SD

- Voltaje de trabajo: $4{,}5 - 5{,}5[V]$ DC.
- Consumo de corriente: $0{,}2 - 200[mA]$.
- Voltaje de interfaz de datos: $3{,}3 - 5[V]$ DC.
- Soporta tarjetas micro SD básicas de hasta $2[GB]$, y SDHC de hasta $32[GB]$.

Pulsador



Figura 5.20: Botón pulsador de 4 pines.

El botón pulsador se programa para activar la escritura de datos en la tarjeta SD. Esta función se incluye considerando que la lectura comienza automáticamente, de esta forma, incorporar un mando para decidir el momento de escritura permite versatilidad al momento de realizar distintos experimentos de medición.

Un factor a tener en cuenta es que es necesario incorporar una resistencia *pull-up* o *pull-down*. Así el voltaje en el pin de entrada queda determinado cuando el pulsador está abierto. Para efectos prácticos no hay diferencia entre usar una configuración u otra. Pero este circuito utiliza una resistencia tipo *pull-up*, pues la placa arduino cuenta con una incorporada programable.

Luz LED



Figura 5.21: Led Blanco

El LED blanco parpadea a distintas frecuencias para comunicar si la información está siendo leída, guardada, o si hay errores de conexión. Una vez que el programa está corriendo y se activa el pulsador, el LED parpadea rápidamente indicando la info está siendo guardada en la tarjeta SD. Tras volver a accionar el pulsador, la luz deja de parpadear, lo que indica sólo lectura y no escritura.

- Voltaje: $3{,}2 - 3{,}3[V]$
- Corriente: $20[mA]$
- Dimensión: $5[mm]$

Capítulo 6

Conclusiones

Se logra diseñar y construir un sistema de medición de tensión instantánea de cuerdas para aplicaciones en ambiente marino. El sistema es completamente autónomo energéticamente y compatible con el diseño propuesto anteriormente para el *Wasserdrachen*.

El dispositivo cumple con los requerimientos de bajo costo y fácil programación. Se utilizan tecnologías opensource en base a Arduino UNO con la intención de seguir la línea de difusión científica-tecnológica-sustentable del proyecto CERTES.

Se aporta a la bibliografía en función de los objetivos macro del proyecto CERTES, sentando bases teóricas sobre dispositivos de medición de oleaje, microcontroladores y sensores de puente.

La implementación del dispositivo no se logra del todo por complicaciones producto de la emergencia sanitaria. No se realiza la instalación definitiva en el *Canal de pruebas de Punta Curaumilla*. En su lugar se realizan pruebas en tierra firme utilizando una camioneta para simular el impuje de las olas. Estas pruebas resultan en gráficas suaves y continuas de 1) la tensión de la cuerda en el tiempo, y 2) la temperatura y la humedad relativa dentro de la cápsula del transductor. Se describe en detalle el experimento en la sección 4.4.2.

Se definen un rango de trabajo de $0 - 300[kg]$ y como resultado de las pruebas, se registra una frecuencia de muestreo de $8{,}9$ líneas de data por segundo. Por otro lado, si bien se define un protocolo de calibración (véase 4.4.1), este no se lleva a cabo producto del cierre de la universidad, por lo que no se define la resolución de la máquina.

Por el mismo motivo, es necesaria la utilización de recursos externos a la universidad para imprimir piezas en 3D y mecanizar la horquilla de la polea central.

Quedan inconclusas la implementación de la carcaza de protección general del dispositivo y junto a ella el panel solar que carga la batería. Notar que estos implementos sólo son necesarios para pruebas de larga duración. Además, la capa de pintura

anticorrosiva no fue aplicada a ninguna de las piezas metálicas que lo requieren.

Finalmente, es importante dejar en claro que bajo ningún punto de vista este proyecto busca ser una solución inmediata al problema de medición y sondeo de oleaje en borde costero. Es más, aún hace falta mucha investigación para encontrar una correlación entre la tensión de la cuerda y el estado dinámico del dispositivo acuático que se implemente.

A pesar de esto, proponer alternativas como esta, de bajo costo, y en base a software y hardware libre, termina siendo un incentivo a que distintos sectores de la sociedad se hagan partícipes de problemas como este. Por lo tanto es un aporte al objetivo general del proyecto CERTES que entiende la educación como la herramienta más relevante para reestructurar la sociedad de forma permanente.



Figura 6.1: Colección de imágenes del día de las pruebas finales

Apéndice A

Términos y definiciones relativos a Celdas de Carga

Esta apéndice define la terminología y parámetros de rendimiento relativos a las especificaciones ingenieriles propias de una celda de carga. Esto, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones a la hora de adquirir una, mediante el conocimiento del lenguaje utilizado en la industria.

Los términos desarrollados a continuación, son un compilado obtenido de dos fuentes:

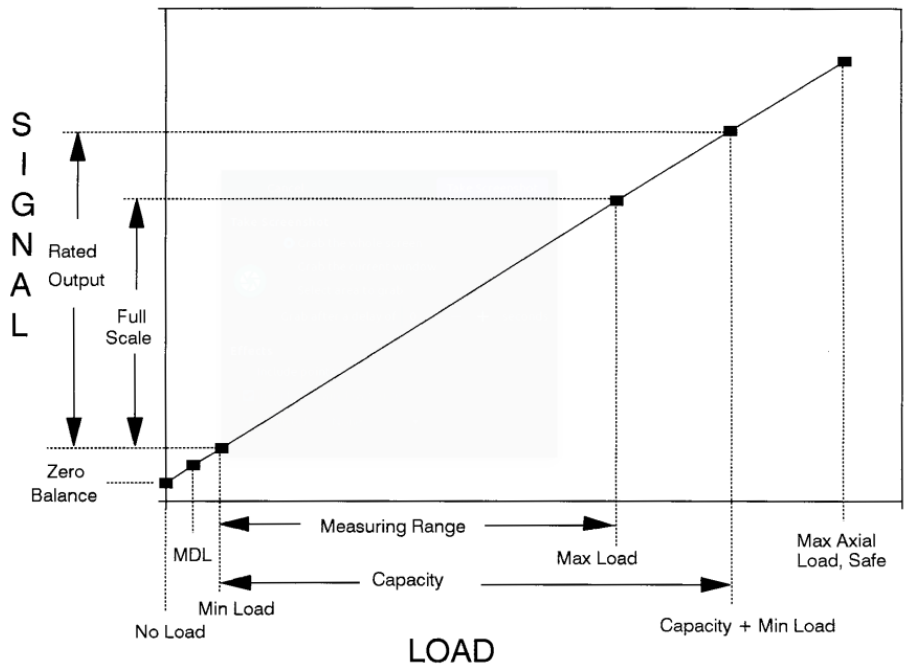


Figura A.1: Ilustración de algunos de los términos más importantes para celdas de carga

1. El Apéndice “Load Cells Terms and Definitions” desarrollado por la marca “Interface - Force Measurement Solutions” en base a las definiciones encontradas en el “Load Cell Terminology an Test Procedure Recommendations”, Tercera Edición, 1985, Scale Manufacturers Association, y en el OIML International Recommendation R60, Edición de 1991.
2. El Apéndice "Load Cell Terminology"del documento "Load Cell Appication and Test Guideline, 2010"desarrollado por la "Scale Manufacturers Association".

Para facilitar la lectura, los términos se clasifican en *Relativos a Precisión*, *Relativos a Carga* y *Relativos a Señal*, además están ordenados por orden alfabético según su nombre original en inglés y se muestra en paréntesis la traducción propuesta. Los conceptos cuya definición está presente en la lista son resaltados con mayúsculas. En la figura A.1 se ilustra la relación entre algunos de los términos más importantes.

A.1. Términos relativos a precisión

Accuracy : (Precisión) La desviación de un resultado con respecto de la carga aplicada real, representada como un ratio de esa carga aplicada.

Accuracy Class : (Clase de Precisión) Una clasificación de CELDAS DE CARGA en función de sus requerimientos de desempeño.

Ambient Conditions : (Condiciones Ambientales) Las condiciones (humedad, presión, temperatura, etc.) del medio que rodea la CELDA DE CARGA.

Ambient Temperature : (Temperatura Ambiente) La temperatura del medio que rodea la CELDA DE CARGA.

Barometric Sensitivity : (Sensibilidad Barométrica) El cambio en el ZERO OUTPUT debido a cambios en la presión barométrica. Normalmente expresado en unidades de %RO/atm.

Calibration Curve : (Curva de Calibración) Curva característica del OUTPUT de una celda de carga relativa a una carga aplicada real.

Combined Error : (Error Combinado) (efecto combinado de la NO-LINEARIDAD, HISTÉRESIS y el EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL RO) La desviación máxima de la curva de calibración con respecto a la línea recta dibujada entre la

salida con carga cero y un punto equivalente al 75 % del RO bajo Se expresa como porcentaje del RO.

Creep : El cambio que se observa en la SEÑAL de la celda, al ser sometida a una carga constante a través del tiempo, y bajo condiciones ambientales y otras variables también constantes. Normalmente se expresa como porcentaje de la carga aplicada durante un intervalo de tiempo específico. Es común que la magnitud de la carga aplicada para caracterización sea igual a la CAPACIDAD MÁXIMA o cercana a esta.

Creep Return : (Retorno del Creep) La diferencia entre la *Señal de la Celda* inmediatamente después de retirar una carga que ha sido aplicada en una prueba de creep, y la señal antes de la aplicación de esta carga. Normalmente se expresa como porcentaje de la carga aplicada durante un intervalo de tiempo específico.

Hysteresis : (Histéresis) La máxima diferencia algebraica entre las lecturas de SALIDA para la misma carga aplicada; una descendiendo desde la CARGA NOMINAL, otra desde el punto de el cero. Normalmente se expresa como porcentaje del FS o del RO. Es común realizar la medición a un 40-60 %FS para caracterización.

Load Cell Verification Interval (v) : El intervalo de verificación, expresado en unidades de masa, usado en la prueba para clasificar la celda según exactitud.

Minimum Verification Interval (v_{min}) : El intervalo de verificación más pequeño en que puede dividirse el rango de medición de la celda de carga. O el menor valor de una cantidad (masa) que puede ser aplicado a una celda de carga sin exceder el máximo error permisible. Se especifíca como E_{max}/γ, donde γ es un factor entregado por el proveedor.

Maximum Number of Load Cell Verification Intervals (n_{max}) : El número máximo de intervalos en que puede dividirse el RANGO DE MEDICIÓN de la celda de carga, de modo que el resultado de la medición no se vea afectado por un error que exceda el ERROR MÁXIMO PERMISIBLE.

Non-Linearity : (No Linearidad) La desviación máxima de la CURVA DE CALIBRACIÓN con respecto a la línea recta que se dibuja entre los puntos de CARGA MÍNIMA y a un 75 % de la CAPACIDAD NOMINAL. Se expresa como porcentaje del RO, y se mide sólo con carga creciente.

Non-Repeatability : (No Repetibilidad) La diferencia máxima entre los outputs leídos para cargas repetidas bajo condiciones idénticas. Normalmente se expresa como porcentaje del RO.

Resolution : (Resolución) El cambio más pequeño en la carga que produce un cambio detectable en la señal.

Static Error Band (SEB) : Es la banda que comprende la desviación máxima entre la CURVA DE CALIBRACIÓN, y la línea recta que une los puntos de CARGA MÍNIMA y el 75 % del RO. Incluye los efectos de NO LINEALIDAD, HISTÉRESIS y el no retorno a carga mínima. Normalmente se expresa como porcentaje del FS.

Standard Test Conditions : Son las condiciones ambientales bajo las cuales deberían realizarse las mediciones, para evitar discrepancias entre distintos observadores en distintos momentos y lugares. Estas condiciones son: Temperatura: $20° \pm 2°\mathrm{C}(68° \pm 3{,}6°\mathrm{F})$ Humedad Relativa: $< 90\,\%$ Barometric Pressure: $98 \pm 10[\mathrm{kPa}](29 \pm 3[\mathrm{inHg}])$

Symmetry Error : La diferencia algebraica entre el RO en tensión y el promedio de los valores absolutos de RO en tensión y RO en compresión. Normalmente se expresa como %RO

Temperature Effect on Rated Output : (Efecto de la temperatura en la salida) El cambio en la SALIDA debido a un cambio en la TEMPERATURA AMBIENTE. Normalmente se expresa como porcentaje del RO por $°C$.

Temperature Effect on Zero : (Efecto de la temperatura en el Cero) el cambio en el MDL debido al cambio en la Temperatura Ambiente. Normalmente se expresa como porcentaje del RO.

Temperature Range, Compensated : (Rango de Temperatura Compensado) El rango de temperatura en el que la Celda de Carga está compensada para mantener el Output y el Balance del Cero dentro de los limites especificados.

Temperature Range, Operating : (Rango de temperatura de operación) el rango de Temperatura Ambiente en el que la Celda de Carga operará sin cambios desfavorables permanentes a sus características de desempeño.

Warm Up Period o Stabilization Period : Periodo de tiempo en que la celda de carga alcanza y mantiene un valor de salida estable del Cero, con todas las condiciones ambientales y otras variables permaneciendo constantes.

Zero Float, Zero Dead Band, Toggle : El cambio en el Cero producto de un ciclo completo de cargas de tensión y compresión idénticas. Normalmente se expresa como porcentaje del FS, donde usualmente se considera FS = Capacidad Máxima.

Zero Stability : (Estabilidad del Cero) El grado en el cual el Balance del Cero se mantiene a lo largo de un periodo de tiempo determinado, manteniendo constantes las condiciones ambientales, historial de carga, y otras variables.

A.2. Términos relativos a carga

Adverse Loading Conditions : (Condiciones Adversas de Carga) Factores físicos indeseables que pueden resultar en MOMENTOS DE CARGA, CARGAS ANGULARES, CARGAS LATERALES u otras entradas extrañas.

Angular Load, Concetric : (Carga Angular Concéntrica) Una carga aplicada de forma concéntrica al EJE PRIMARIO en el punto de aplicación de la carga, y con cierto ángulo con respecto a dicho eje.

Angular Load, Eccentric : (Carga Angular Excéntrica): Una carga aplicada de forma excéntrica al EJE PRIMARIO en el punto de aplicación de la carga, y con cierto ángulo con respecto a dicho eje.

Axial Load : (Carga Axial) Carga aplicada a lo largo del EJE PRIMARIO.

Deflection : (Deflección) El desplazamiento a lo largo del EJE PRIMARIO de la CELDA DE CARGA entre las condiciones de NO-LOAD.

Eccentric Load : (Carga Excéntrica) Cualquier carga aplicada de forma paralela pero no concéntrica al EJE PRIMARIO.

Load Cell : (Celda de Carga) Un transductor de fuerza que mide fuerza o peso convirtiendo la cantidad medida en otra cantidad medible (SEÑAL). En otras palabras, un dispositivo que produce una SALIDA proporcional a una carga de fuerza aplicada.

Maximum Capacity (E_{max}) : (Capacidad Máxima) El valor de la cantidad máxima que puede aplicarse a una CELDA DE CARGA sin exceder el error máximo permisible.

Maximum Load, Safe : (Máxima Carga Segura) La máxima carga que puede ser aplicada sobre la celda, sin producir un cambio permanente en las características de desempeño más allá de las especificadas. Normalmente se expresa en unidades de porcentaje del E_{max}.

Maximum Load (D_{max}) : (Carga Máxima) El valor de la cantidad máxima que puede aplicarse a una celda de carga durante una prueba o aplicación específica. Este valor no debiese ser mayor que E_{max}.

Maximum Load, Ultimate : (Carga Última) La máxima carga que puede ser aplicada sin producir una falla estructural. Normalmente se expresa como porcentaje del E_{max}.

Measuring Range : (Rango de Medición) El rango de valores que puede tomar la cantidad medida sin que el resultado de la medición no se vea afectado por un error mayor al máximo permisible.

Minimum Dead Load (MDL o E_{min}) : El menor valor que puede tomar una cantidad aplicada a una celda de carga sin exceder el MÁXIMO ERROR PERMISIBLE. Comunmente es igual o cercano a la condicion NO LOAD en aplicaciones en modo simple, y es necesariamente igual a la condición de NO LOAD para aplicaciones en modo doble.

Minimum Load (D_{min}) : (Carga Mínima) El menor valor que puede tomar una cantidad aplicada a una celda durante prueba o aplicación específica. No puede ser menor a E_{min}.

Natural Frequency : (Frecuencia Natural) La frecuencia de oscilación libre bajo condición sin carga.

No Load : Es la condición de la Celda de Carga con orientación física normal, sin fuerzas aplicadas, ni accesorios o receptores de carga anclados.

Primary Axis : (Eje Primario) El eje a lo largo del cual la Celda de Carga está diseñada para ser cargada.

Rated Capacity (RC) : (Capacidad Nominal) La CARGA MÁXIMA (aplicada en el EJE PRIMARIO) que la CELDA DE CARGA está diseñada para medir dentro de sus especificaciones.

Side Load : (Carga Lateral) Cualquier carga en el punto de aplicación de CARGA AXIAL que actúe a 90° del EJE PRIMARIO.

A.3. Términos relativos a señal

Excitation Voltage : (Voltaje de Excitación) El voltaje aplicado y medido en los terminales de excitación de la CELDA DE CARGA.

Full Scale (FS) : (Escala Completa) La SALIDA correspondiente a la CARGA MÁXIMA en cualquier aplicación o prueba específica.

Input Resistance : (Resistencia de Entrada) La resistencia del circuito de la CELDA DE CARGA medido en los terminales de excitación sin carga aplicada y los terminales de salida abiertos. Expresada en [Ω].

Insulation Resistance : (Resistencia de Aislamiento) La resistencia a corriente continua, medida entre el circuito de la celda y la estructura de la misma. Normalmente se mide a 50 VDC y se expresa en [$M\Omega$].

Output : (Salida) La diferencia algebraica entre la SEÑAL con carga aplicada y la SEÑAL a CARGA MÍNIMA

Output Resistance : (Resistencia de Salida) La resistencia del circuito de la CELDA DE CARGA medida en los terminales de SEÑAL sin carga aplicada y con los terminales de excitación abiertos.

Rated Output (RO o Span) : El OUTPUT correspondiente a la CAPACIDAD NOMINAL. Es igual a la diferencia algebraica entre la SEÑAL a (CARGA MÍNIMA + CAPACIDAD MÁXIMA) y la SEÑAL a CARGA MÍNIMA.

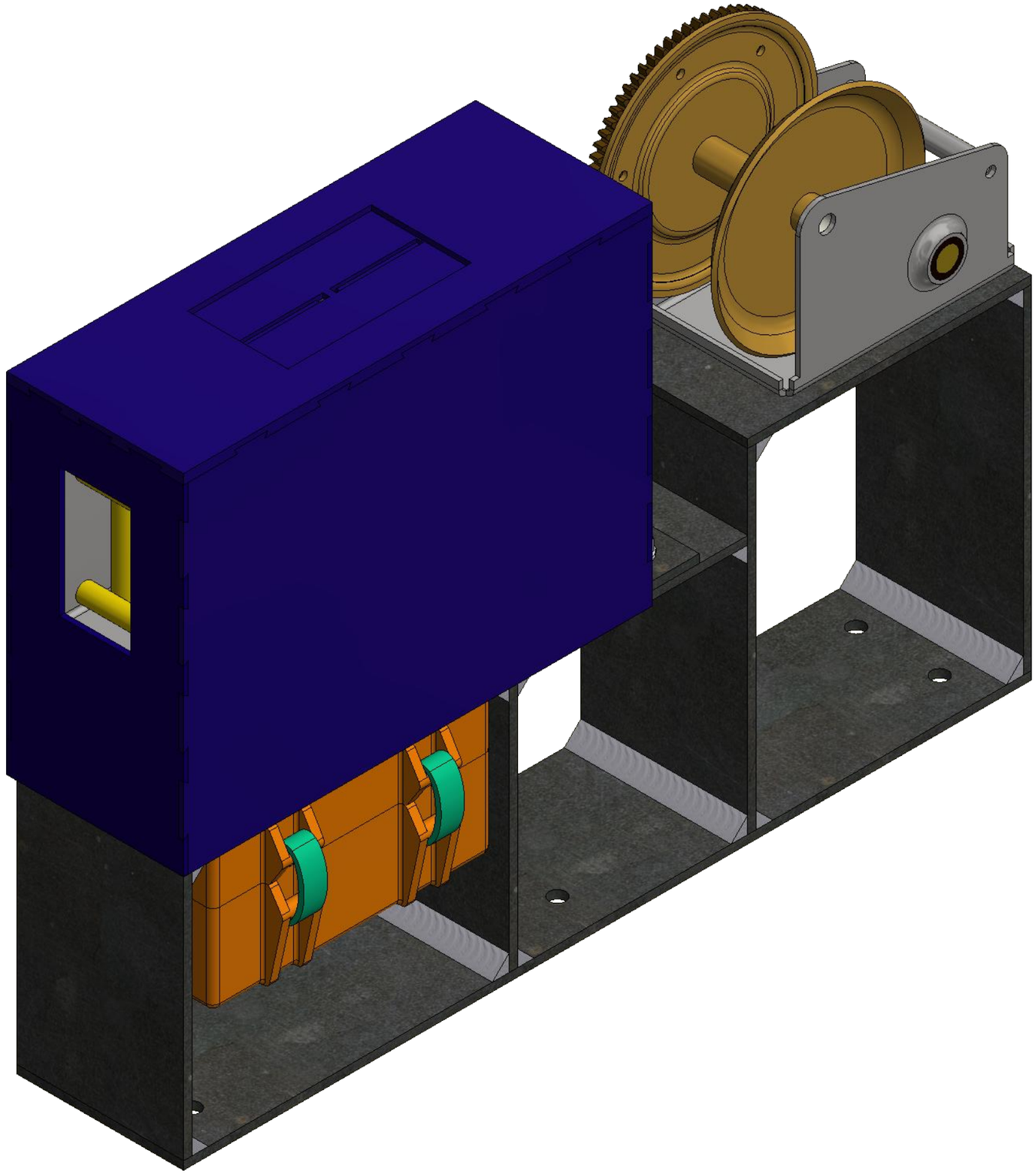
Shunt Calibration : Simulación eléctrica del Output, que se produce al conectar resistencias de derivación de valores conocidos en puntos convenientes del circuito

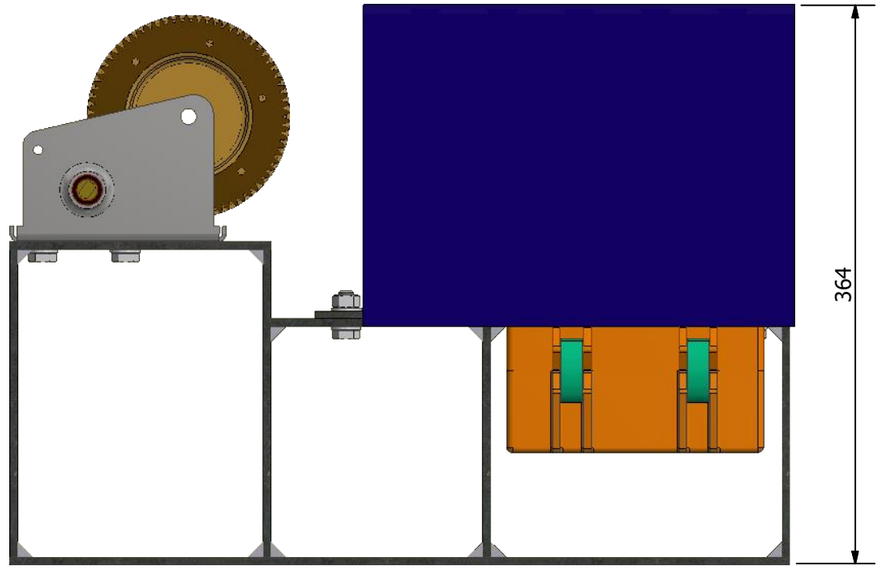
Signal : (Señal) El nivel absoluto de una cantidad medible en la que es convertida una entrada de fuerza.

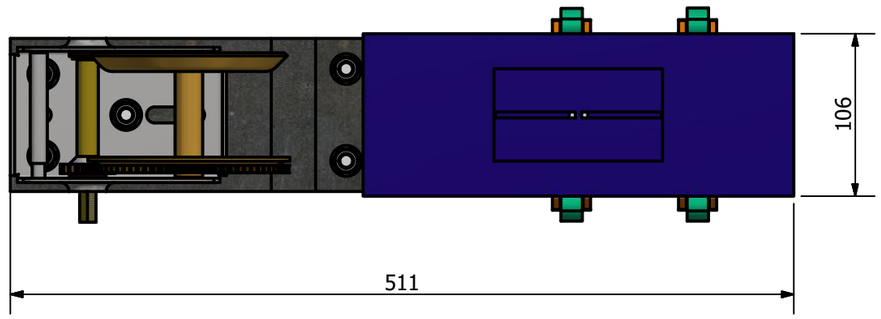
Zero Ouput o Zero Balance o Zero Load Output : (Cero) La Señal de la Celda de Carga en la condición sin carga (NO LOAD).

Apéndice B

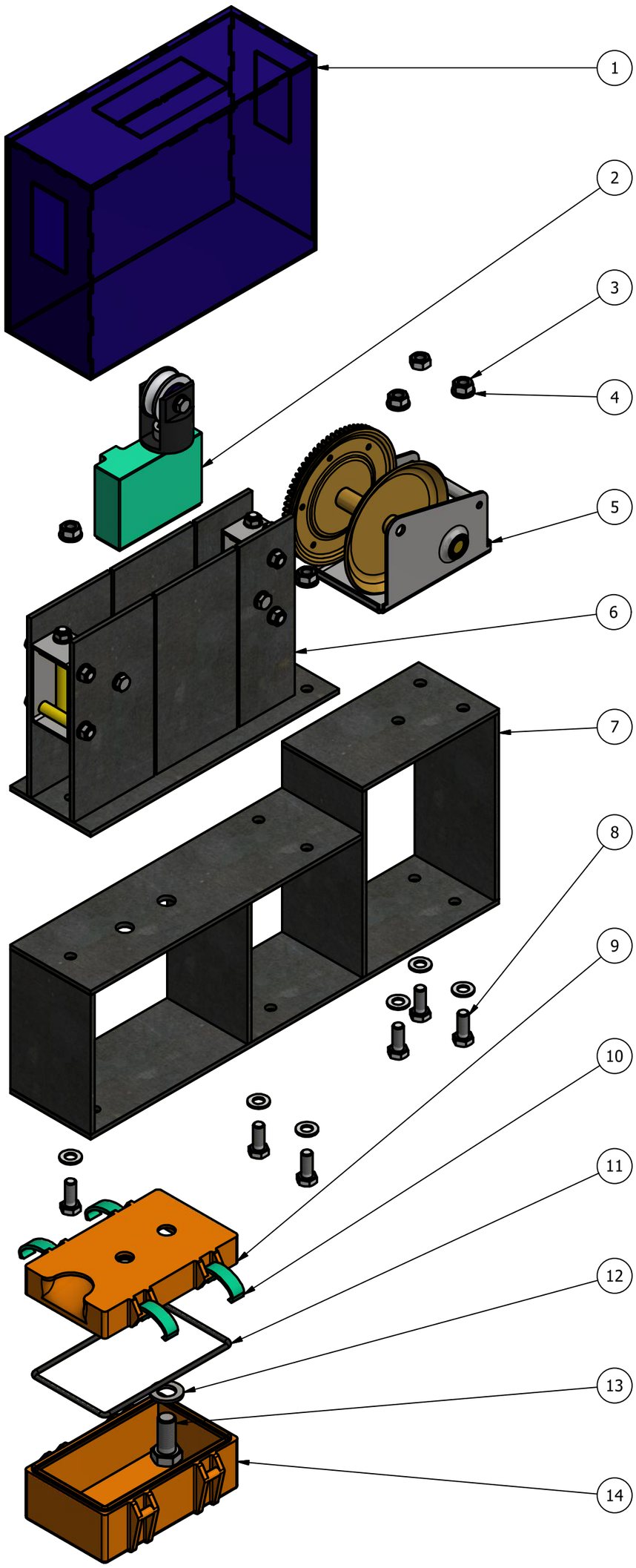
Planos Constructivos del Tensómetro





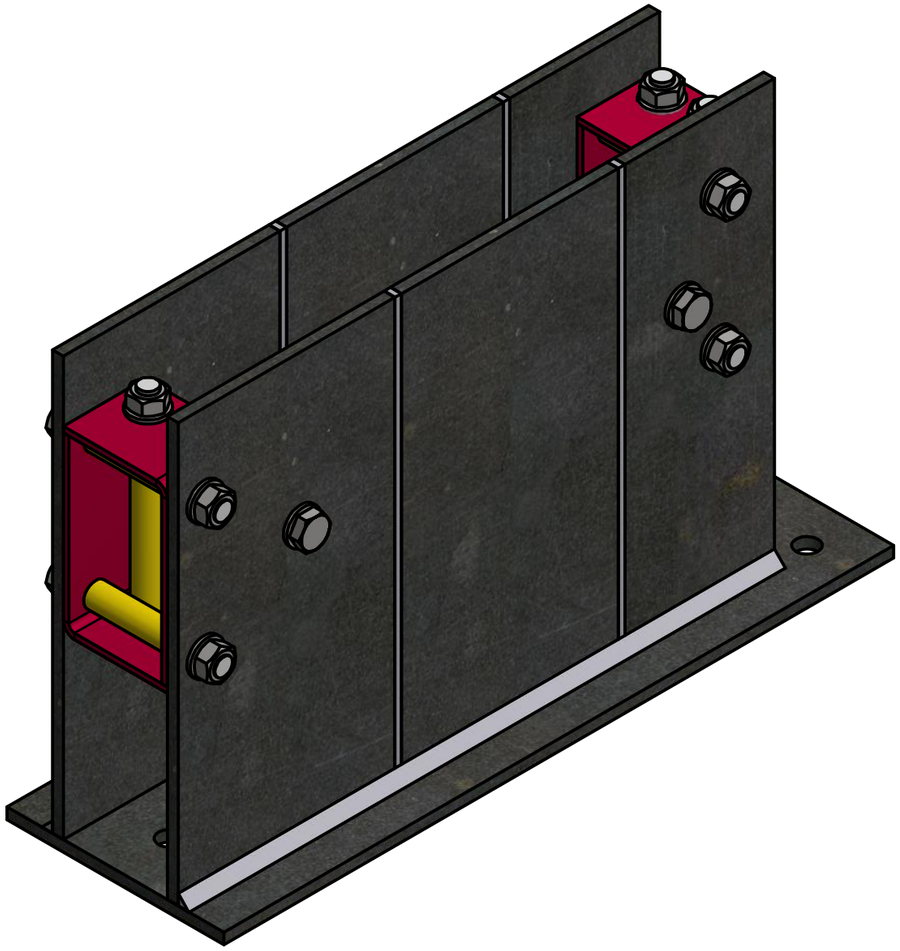


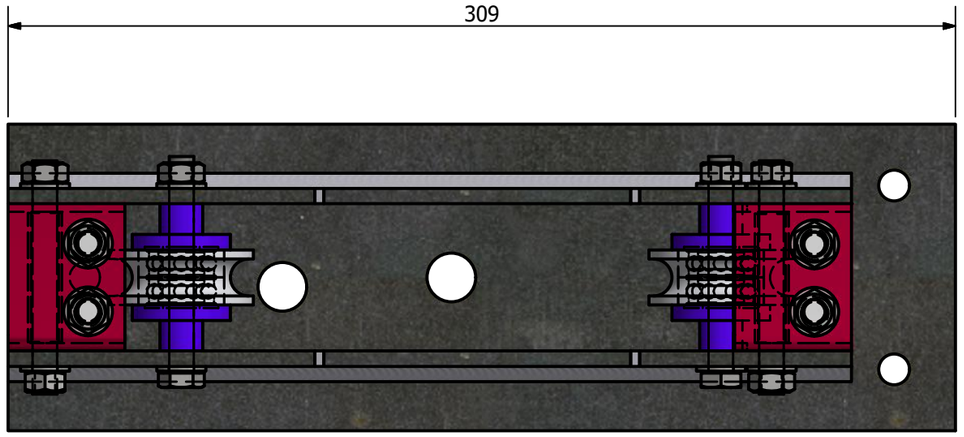
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 000.000.000 Escala 1 / 2	Página 1/21	Tensómetro Vista general

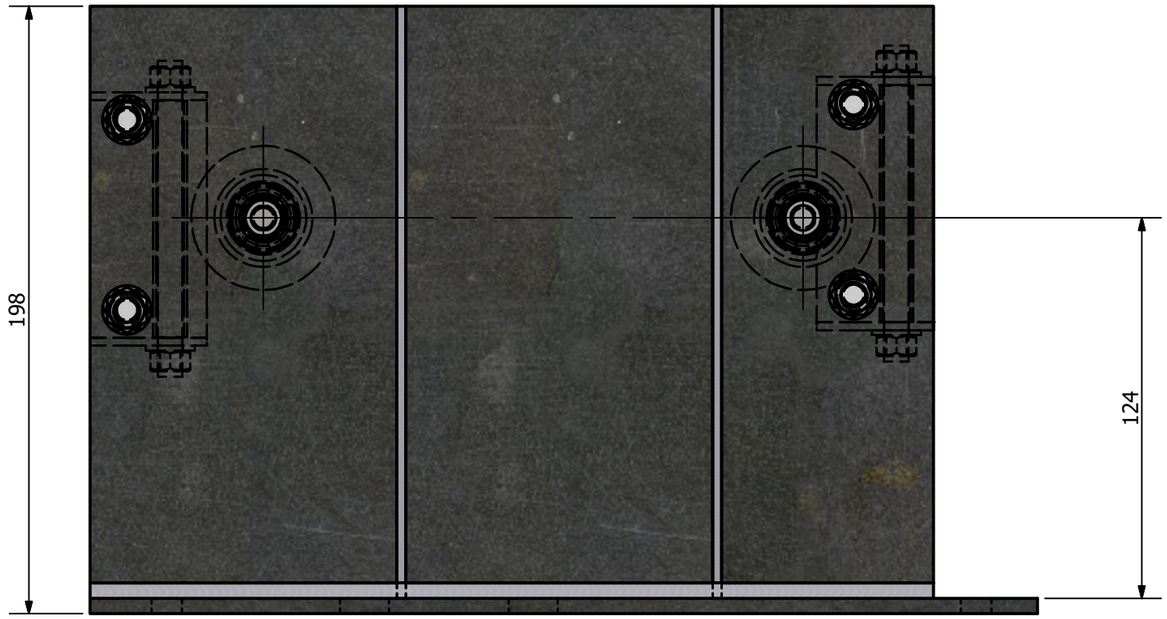


Lista de Partes			
Item	Cdad.	Rótulo	Descripción
1	1	400.100.000	Caja Protección
2	1	100.200.000	Conjunto Celda de Carga y Polea Central
3	6	ISO 4032 - M10	Tuerca base
4	12	ISO 7089 - 10 - 140 HV	Golilla base
5	1	200.000.000	Winche
6	1	100.000.000	Conjunto Cuerpo, Guías y Poleas
7	1	300.200.000	Base
8	6	ISO 4017 - M10 x 25	Perno base
9	1	400.200.100	Tapa superior caja eléctrica
10	4	400.200.300	Pestillo caja eléctrica
11	1	400.200.400	Goma sello caja eléctrica
12	1	ISO 7089 - 16	Golilla celda base
13	1	ISO 4017 - M16 x 35	Perno fijación central
14	1	400.200.000	Tapa inferior caja eléctrica

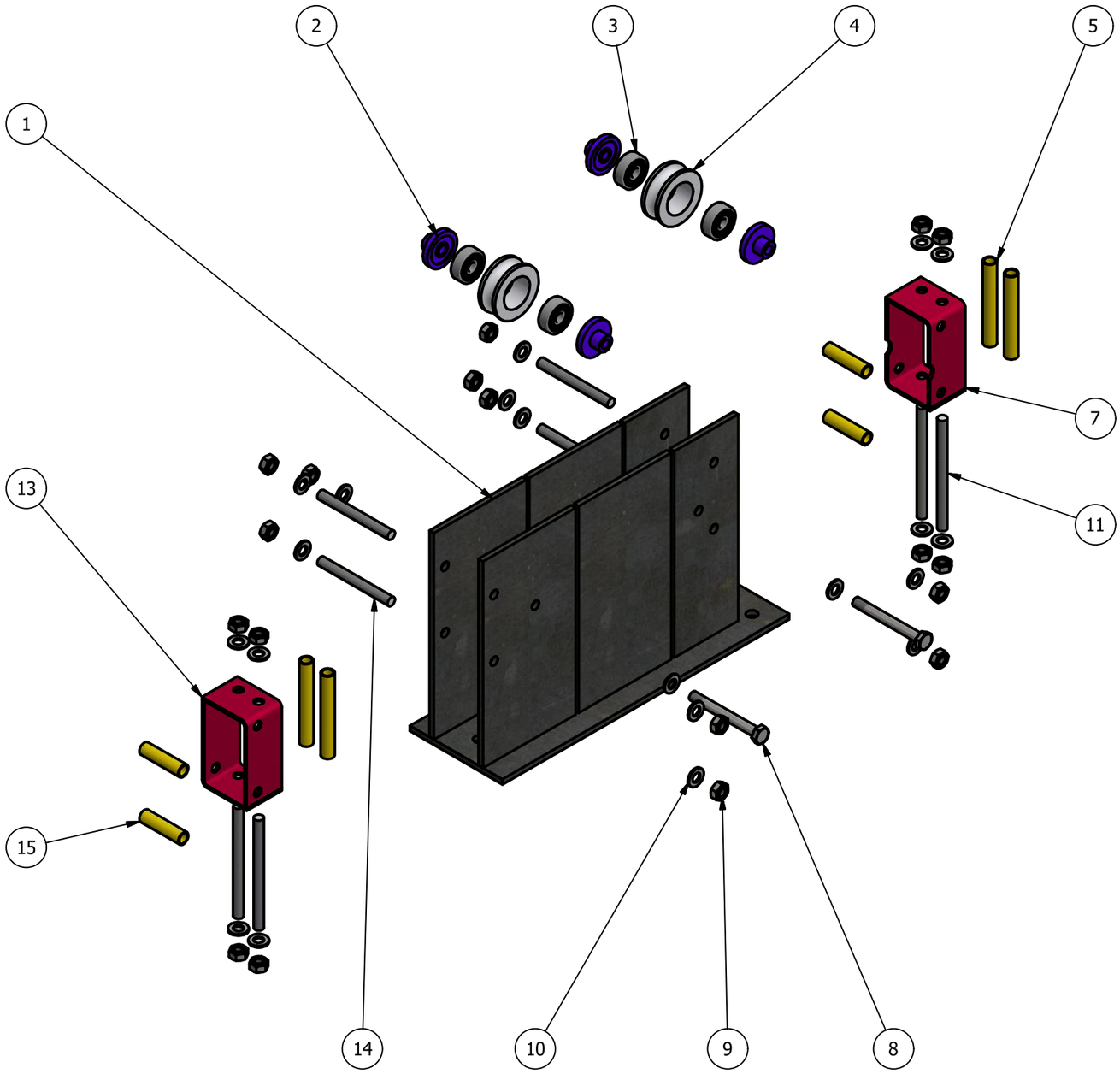
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 000.000.000 Escala 1 / 4	Página 2/21	Tensómetro Despiece general





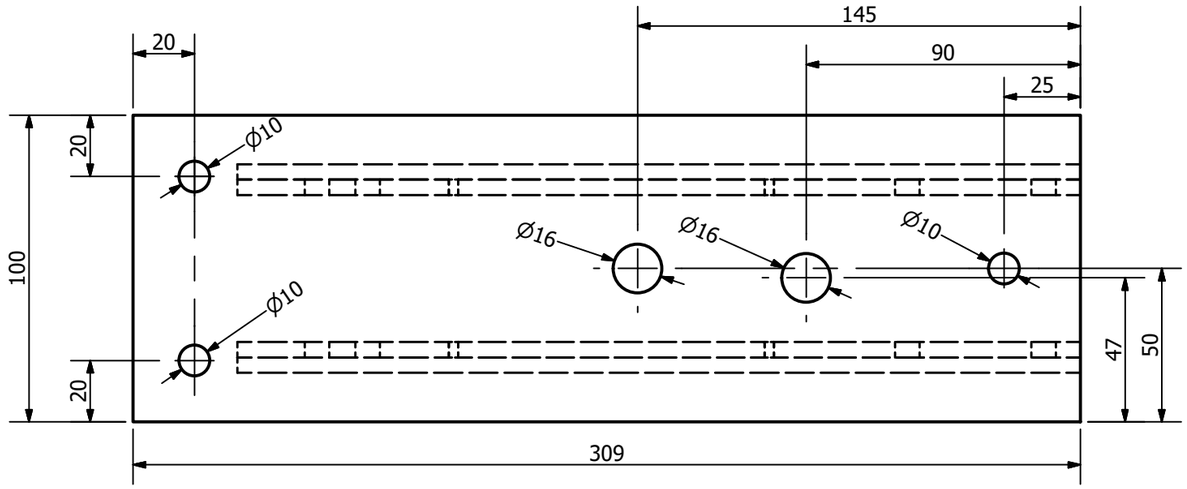


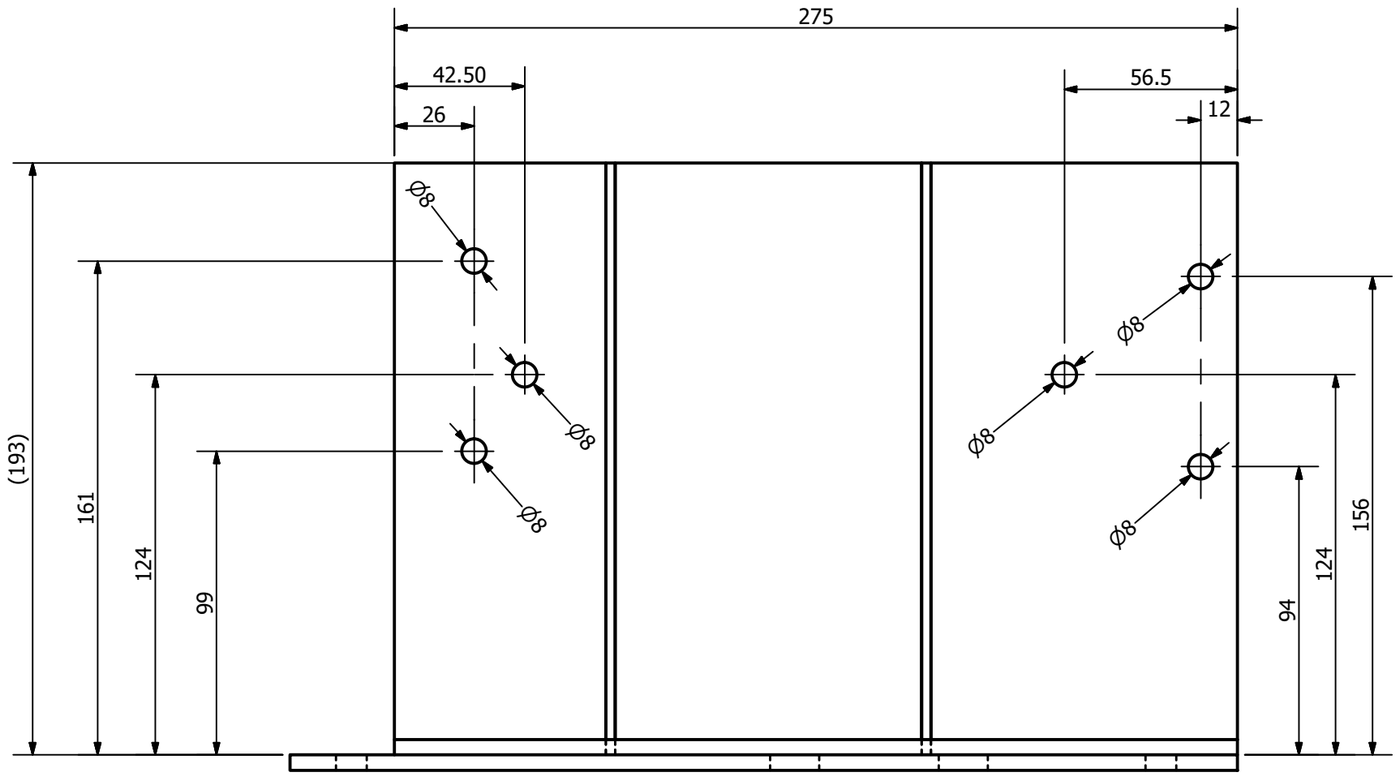
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 100.000.000 Escala 1 / 2 | Página 3/21	Conjunto Cuerpo Vista general	MEC utfsm

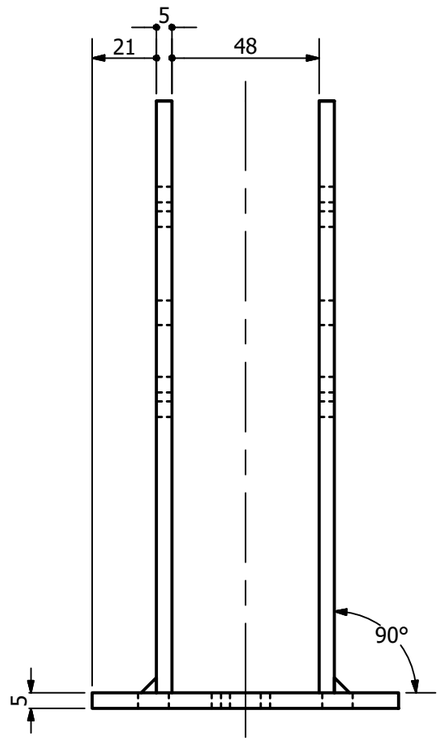


Lista de Partes			
Item	Cdad.	Rótulo	Descripción
1	1	100.100.000	Cuerpo del Tensómetro
2	4	100.300.200	Espaciador para poleas 1 y 2
3	4	W 638-2RS1	Rodamiento de bolas
4	2	100.300.000	Polea
5	4	100.400.310	Buje guía vertical
7	1	100.400.200	Marco guía de salida
8	2	ISO 4014 - M8 x 80	Perno-Eje poleas 1 y 2
9	18	ISO 4032 - M8	Tuerca M8 para ejes
10	20	ISO 7089 - 8 - 140 HV	Golilla M8 para ejes
11	4	100.400.300	Eje guía vertical
13	1	100.400.100	Marco guía de entrada
14	4	100.400.400	Eje guía horizontal
15	4	100.400.410	Buje guía horizontal

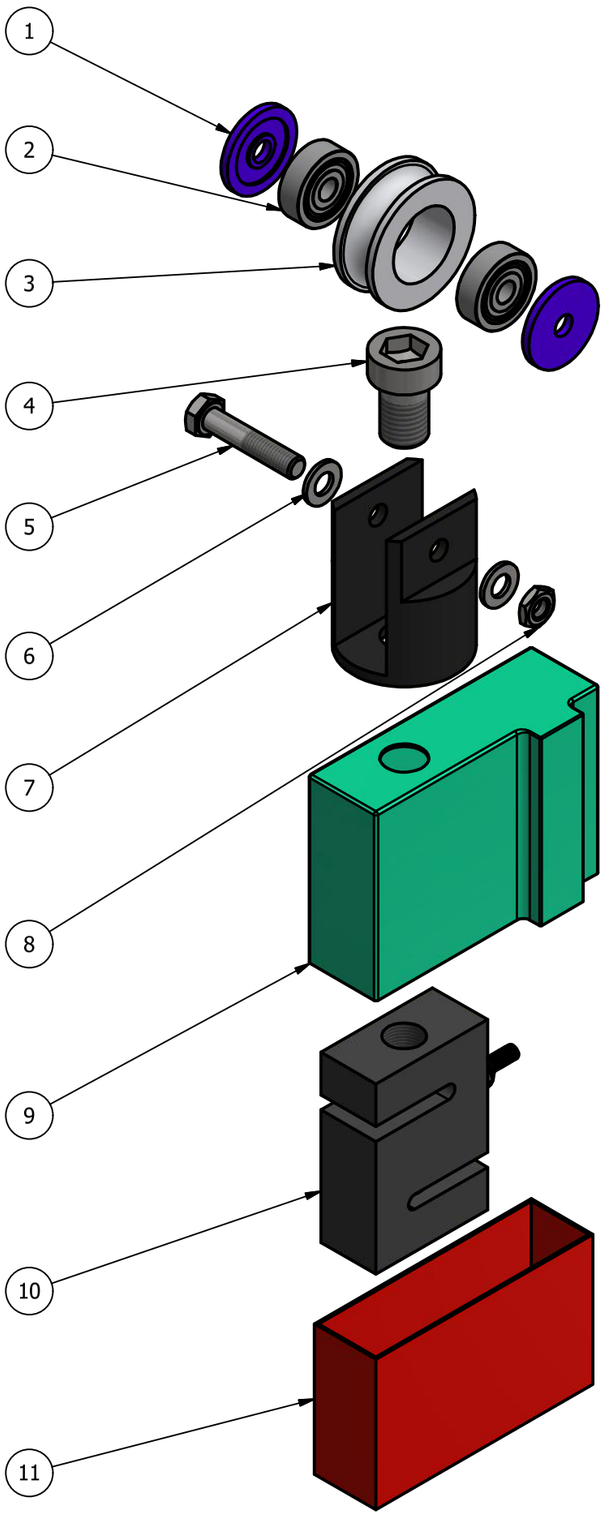
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 100.000.000 Escala 1 / 4 | Página 4/21	Conjunto Cuerpo Despiece	MEC utfsm

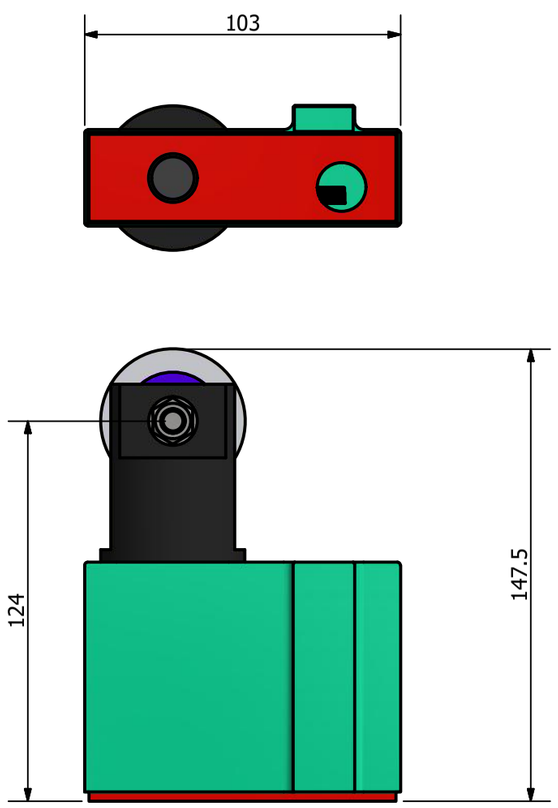






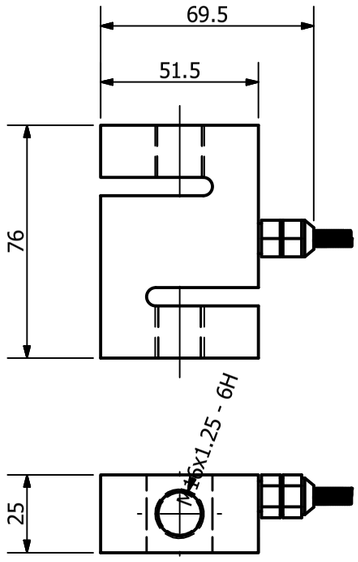
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 100.100.000 Escala 1 / 2	Página 5/21	Cuerpo del Tensómetro



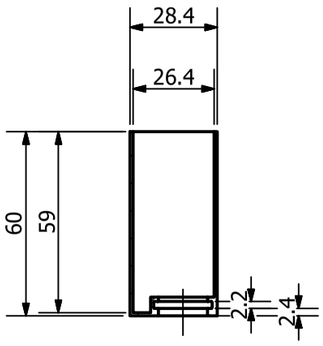


Lista de Partes			
Item	Cdad.	Rótulo	Descripción
1	2	100.300.100	Espaciador polea central
2	2	W 638-2RS1	Rodamiento de bolas
3	1	100.300.000	Polea
4	1	CNS 4557 - M16 x 25	Perno fijación interfaz polea central
5	1	ISO 4014 - M8 x 40	Perno-eje polea central
6	2	ISO 7089 - 8 - 140 HV	Golilla M8 para ejes
7	1	100.200.400	Interfaz polea central
8	1	ISO 4035 - M8	Tuerca M8 para eje polea central
9	1	100.200.100	Tapa de la Cápsula del Transductor
10	1	100.200.000	Celda de Carga
11	1	100.200.200	Base de la Cápsula del Transductor

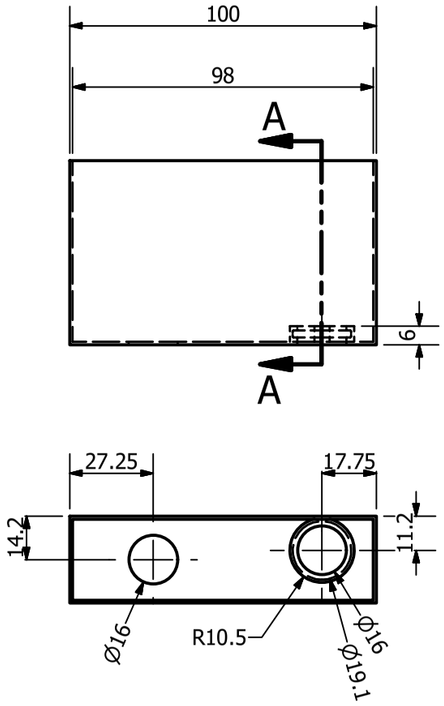
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 100.200.000 Escala 1 / 2	Página 6/21	Conjunto Celda Vista general y despiece



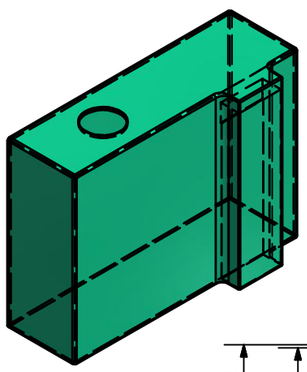
100.200.100

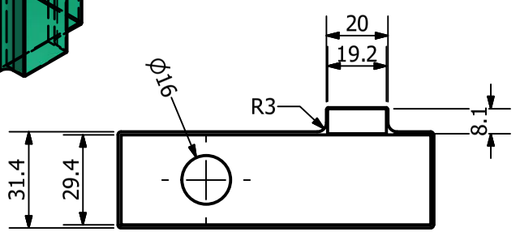


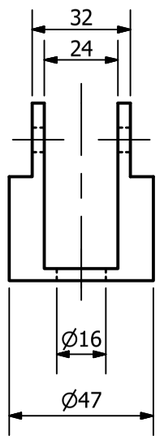
Sección A-A
Escala 1 / 2

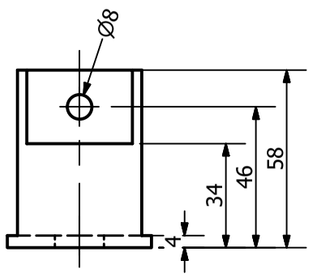


100.200.200

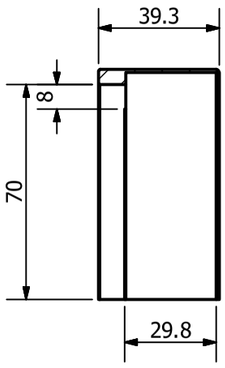




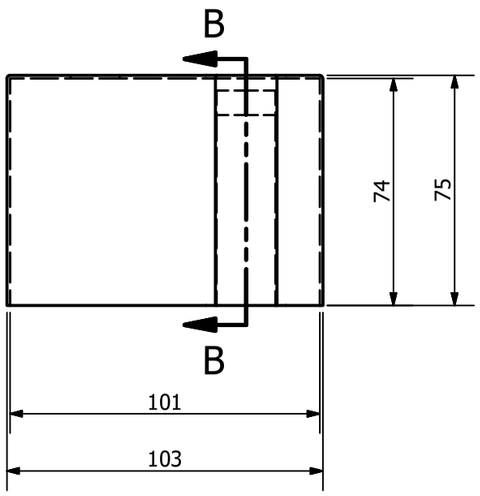




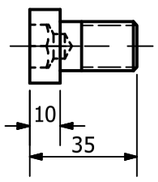
100.200.400



Sección B-B
Escala 1 / 2

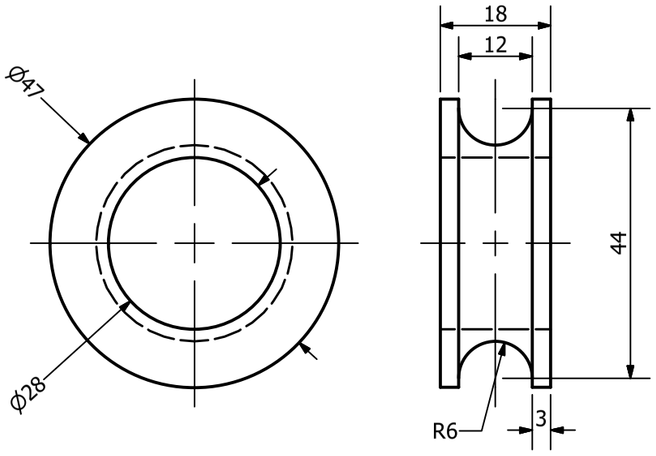


100.200.300

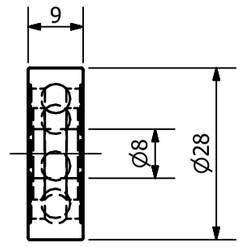


CNS 4556 M16x25

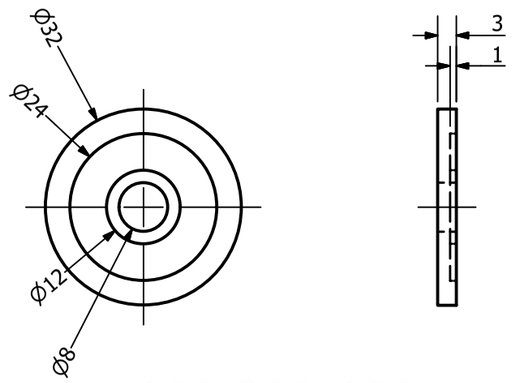
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial			
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 100.200.000		Conjunto Celda Piezas	
	Escala 1 / 2	Página 7/21		



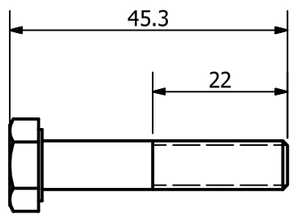
100.300.000
Polea



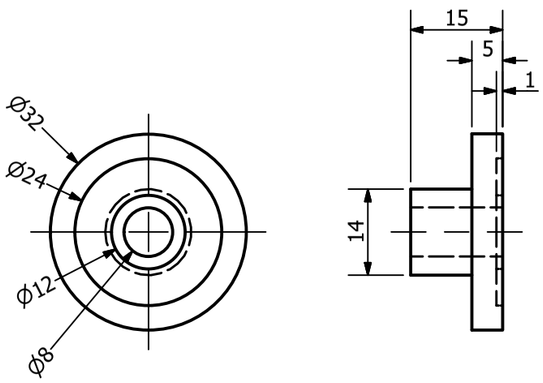
W 638-2RS1
Rodamiento



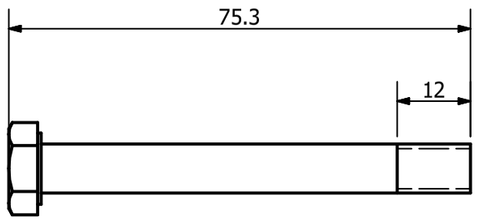
100.300.100
Espaciador polea central



ISO 4014 - M8x40
Perno eje polea central

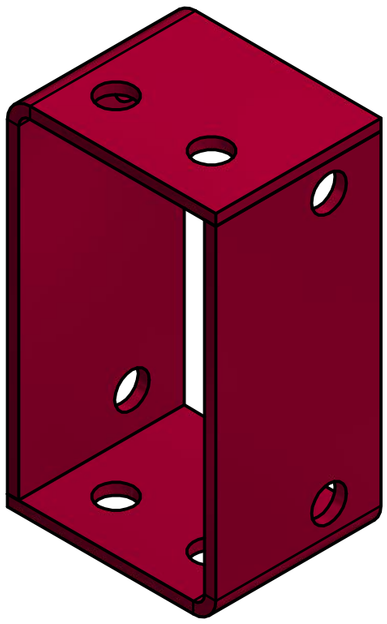


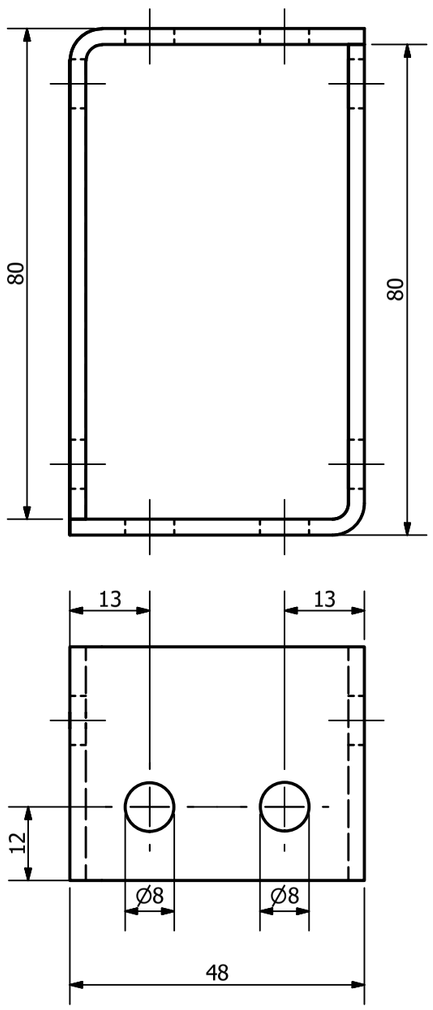
100.300.200
Espaciador poleas secundarias

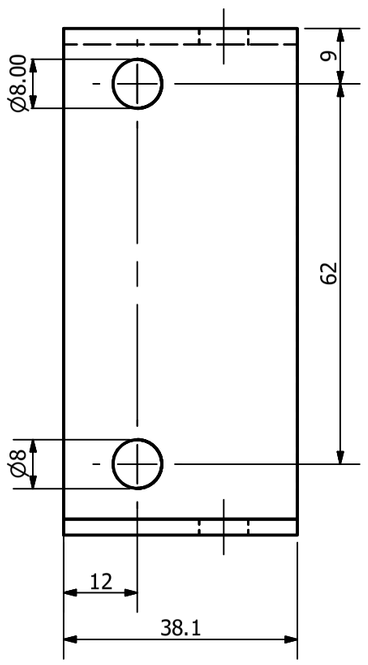


ISO 4014 - M8x80
Perno eje poleas secundarias

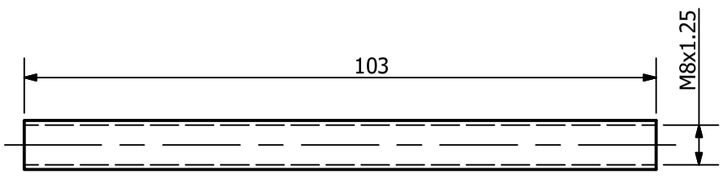
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 100.300.000 Escala 1 : 1	Página 8/21	Piezas de poleas



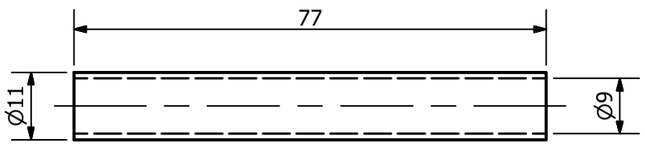




100.400.100
Marco guía de entrada

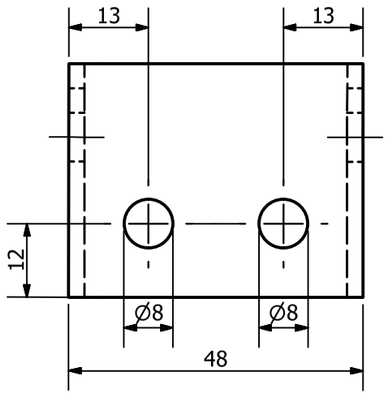


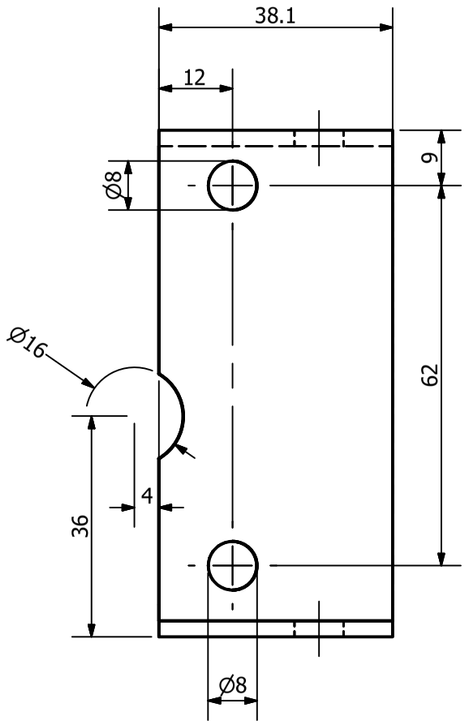
100.400.300
Eje guía vertical

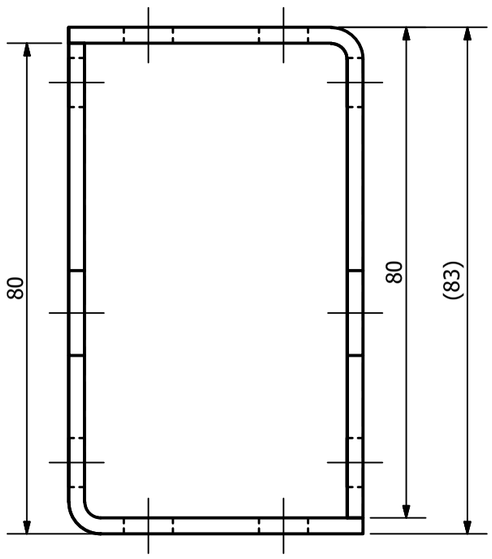


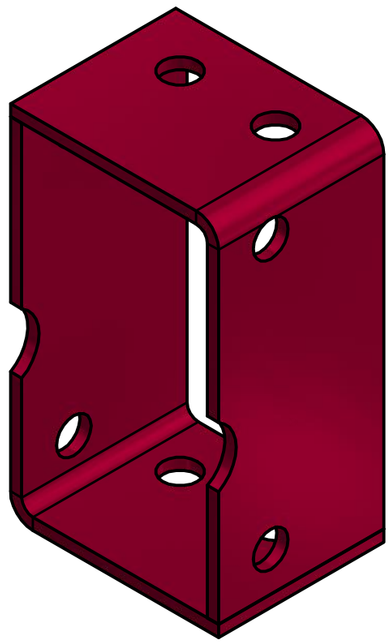
100.400.310
buje guía vertical

Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial			
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 100.400.100		Marco guía de entrada y guías verticales	MEC utfsm
	Escala 1 : 1	Página 9/21		



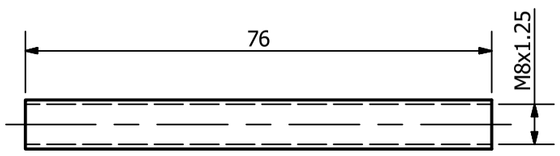






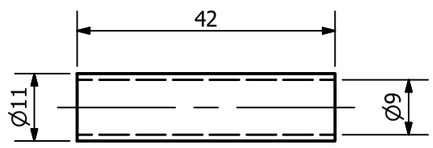
100.400.200

Marco guía de salida



100.400.400

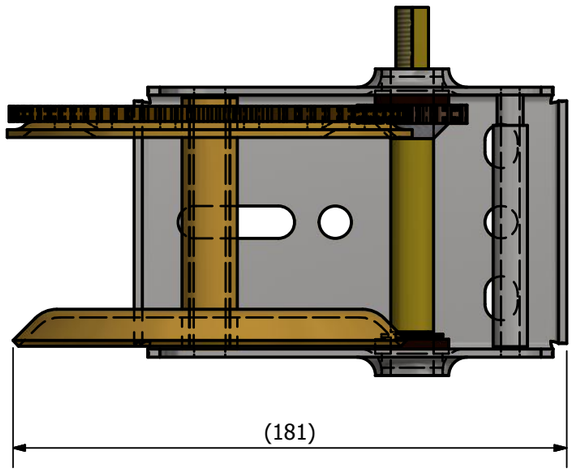
Eje guía horizontal

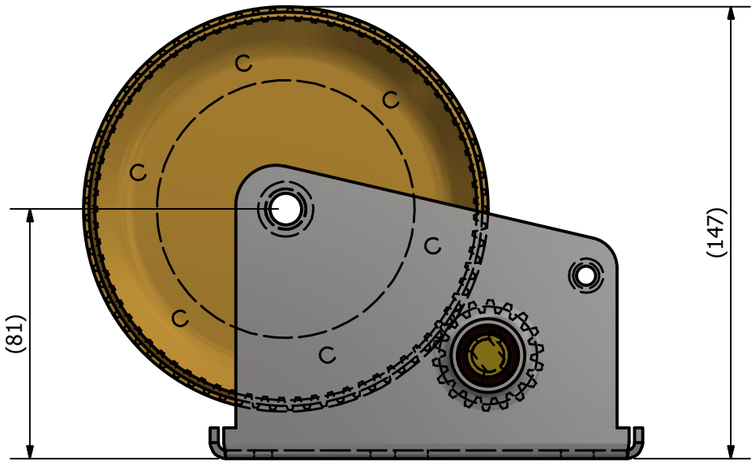


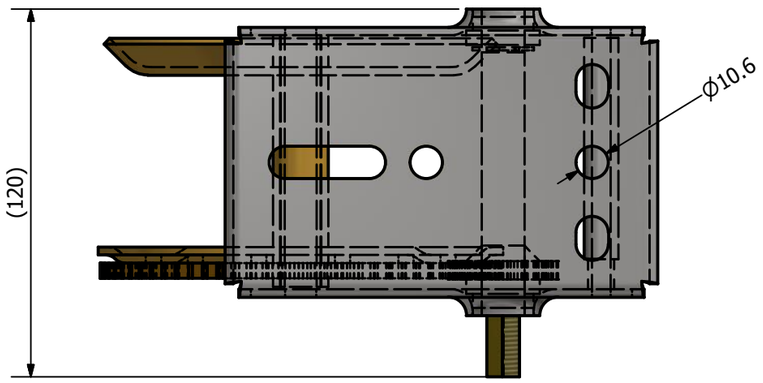
100.400.410

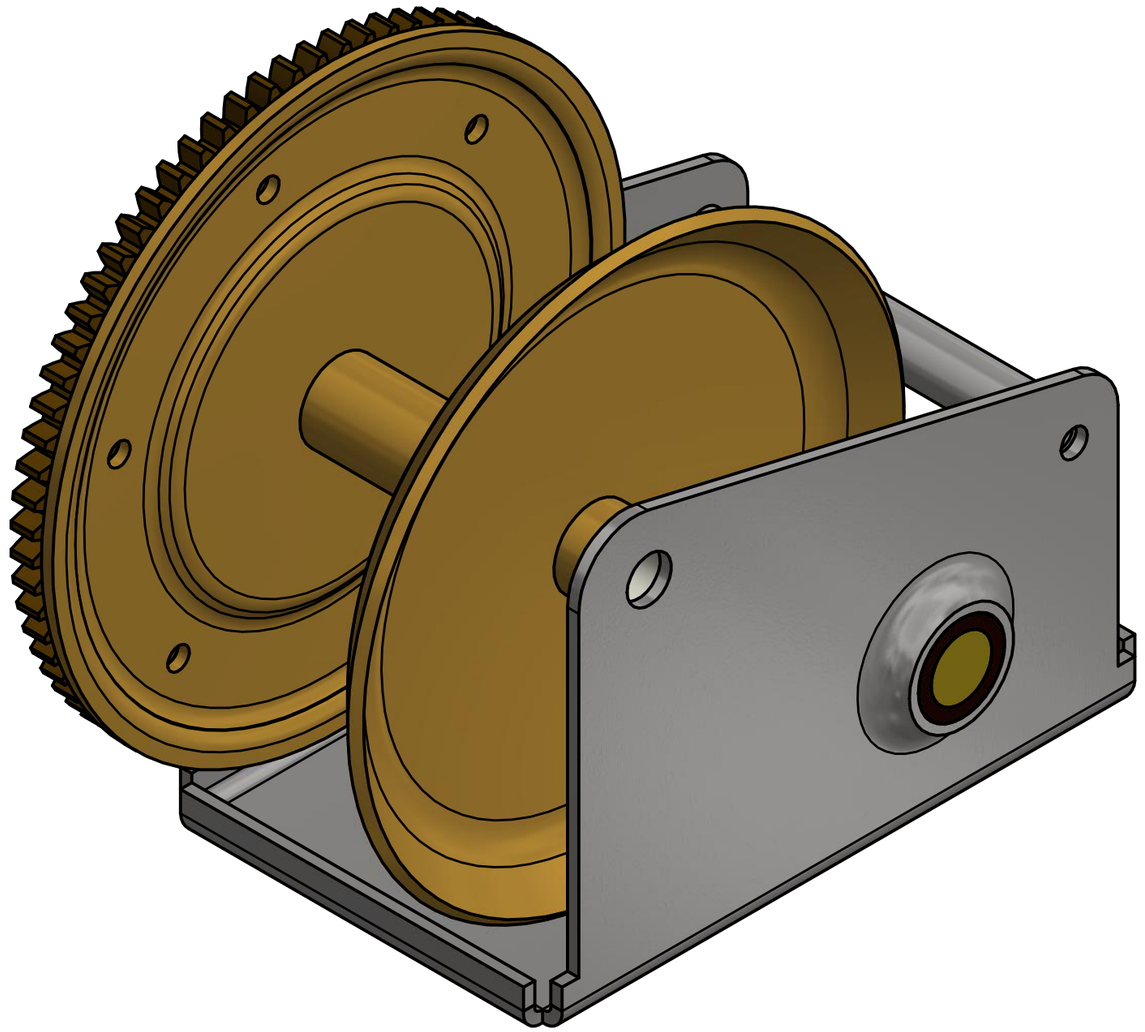
buje guía horizontal

Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 100.400.200 Escala 1 : 1	Página 10/21	Marco guía de salida y guías horizontales

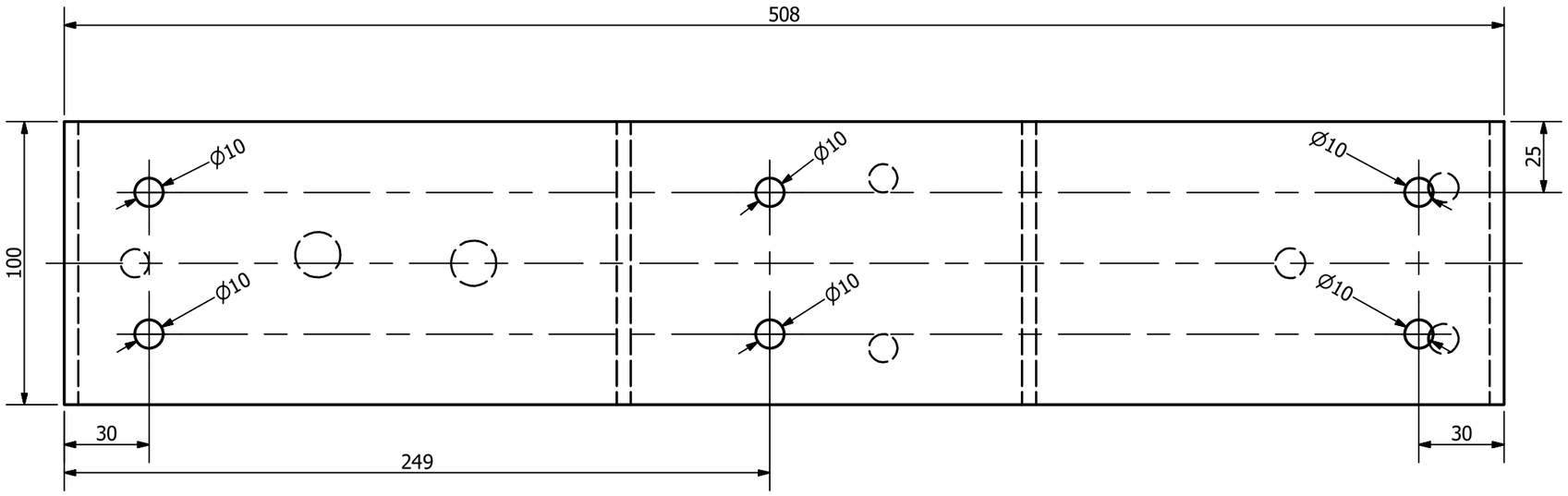


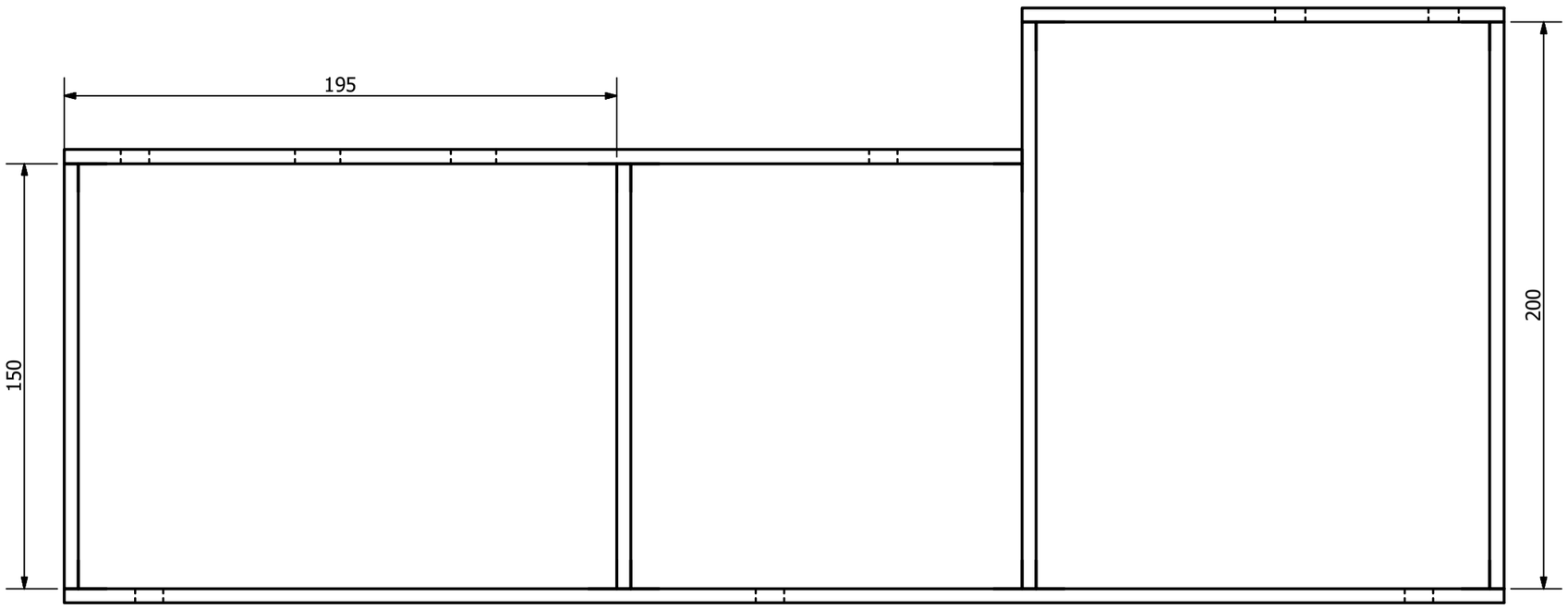


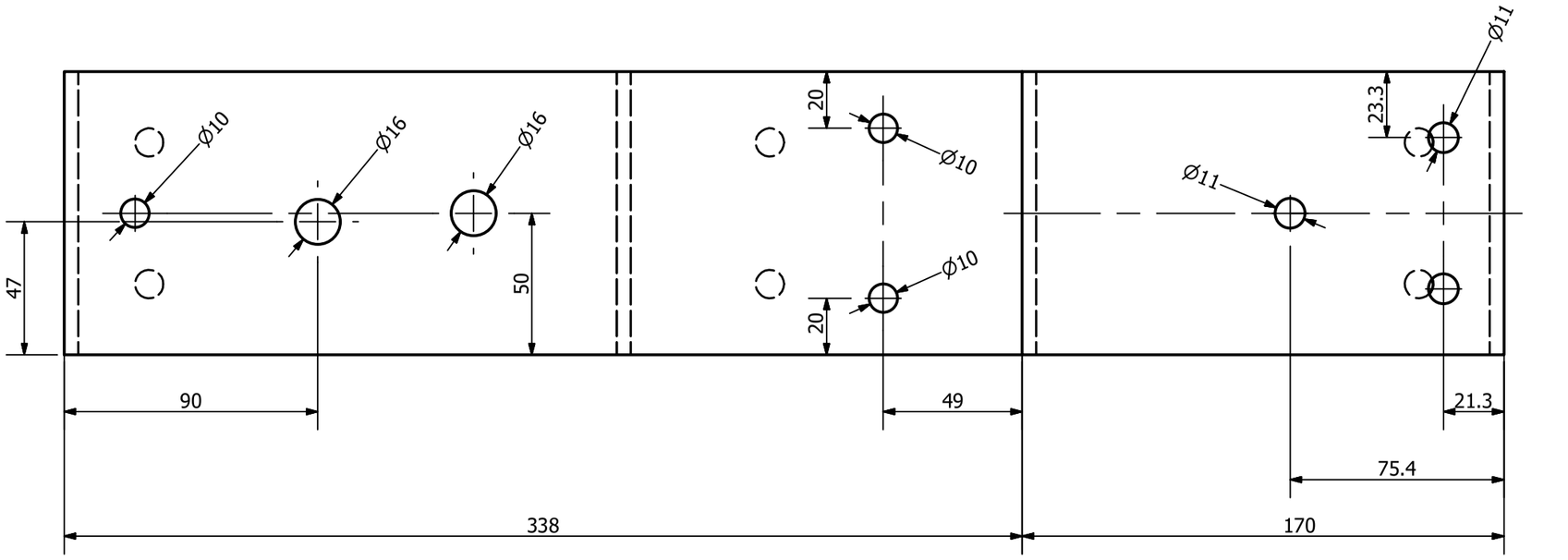




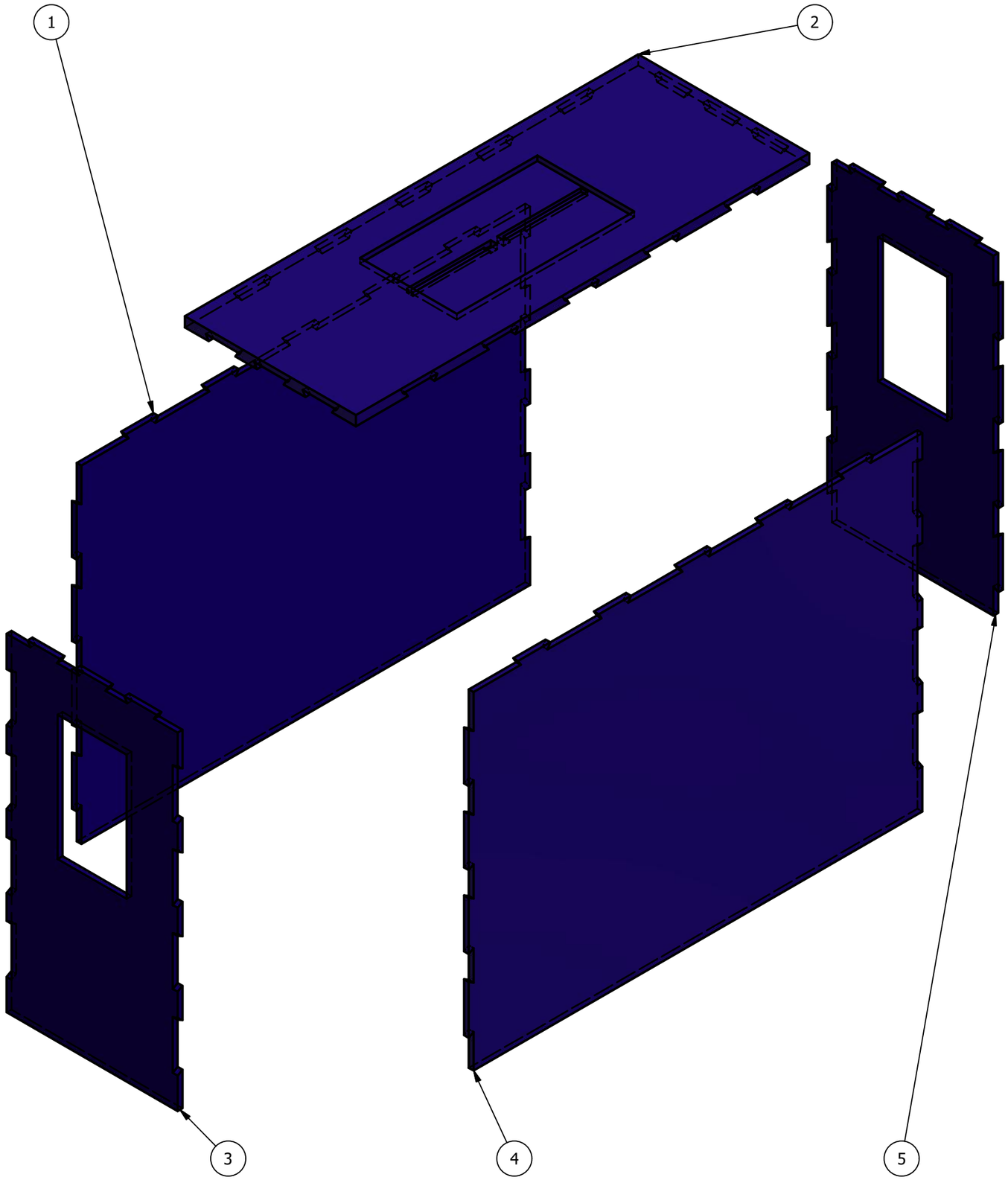
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 200.000.000 Escala 1 / 2	Página 11/21	Winche

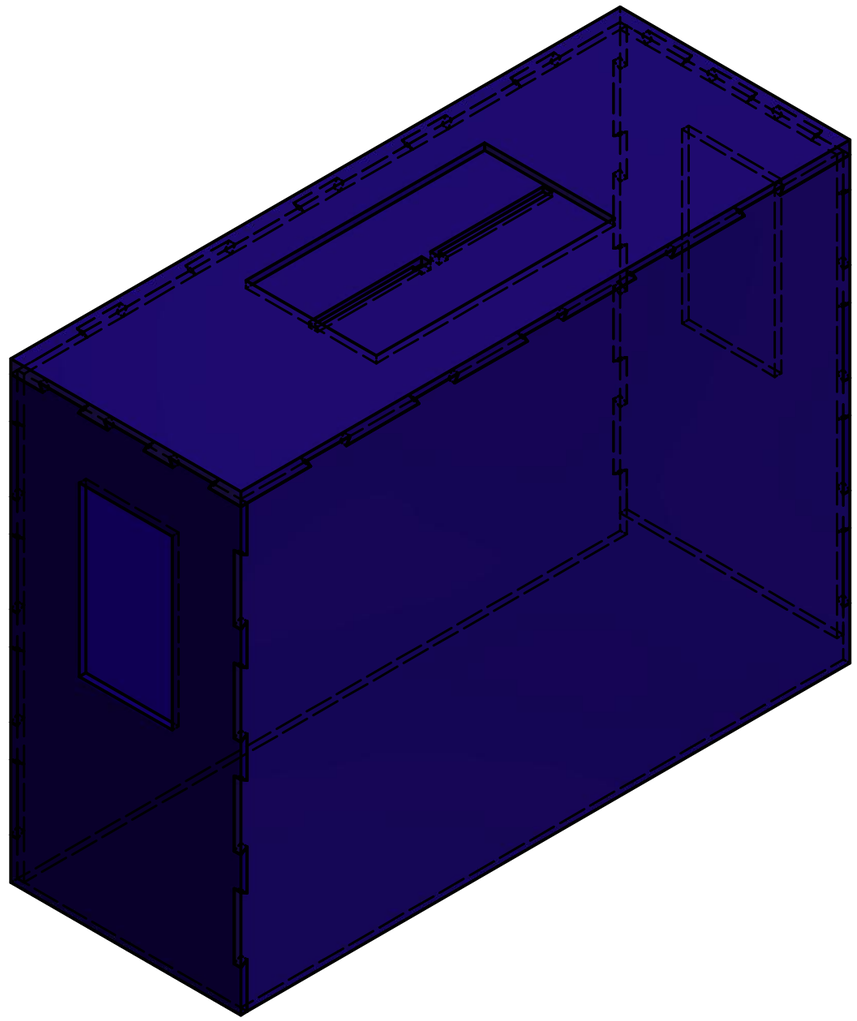






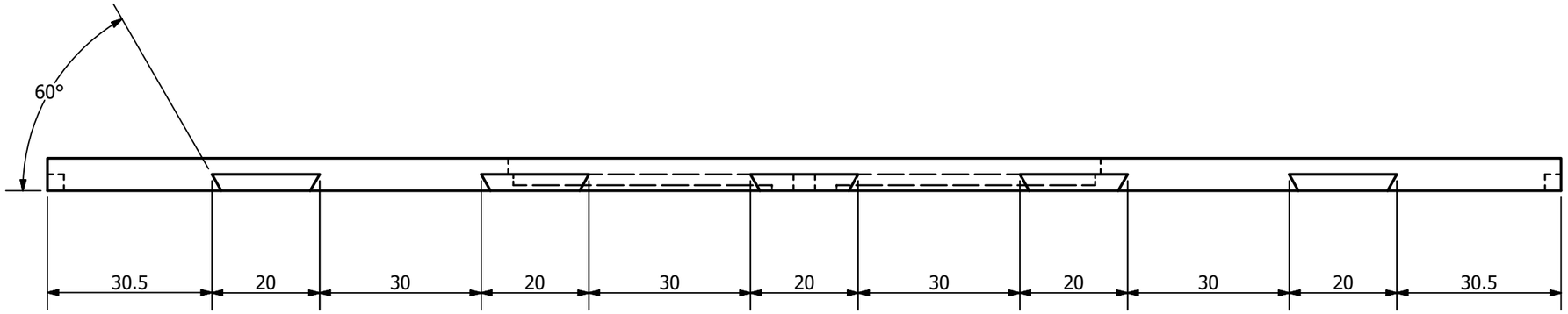
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial			
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 300.200.000		Base del Tensómetro	MEC utfsm
	Escala 1 / 2	Página 12/21		

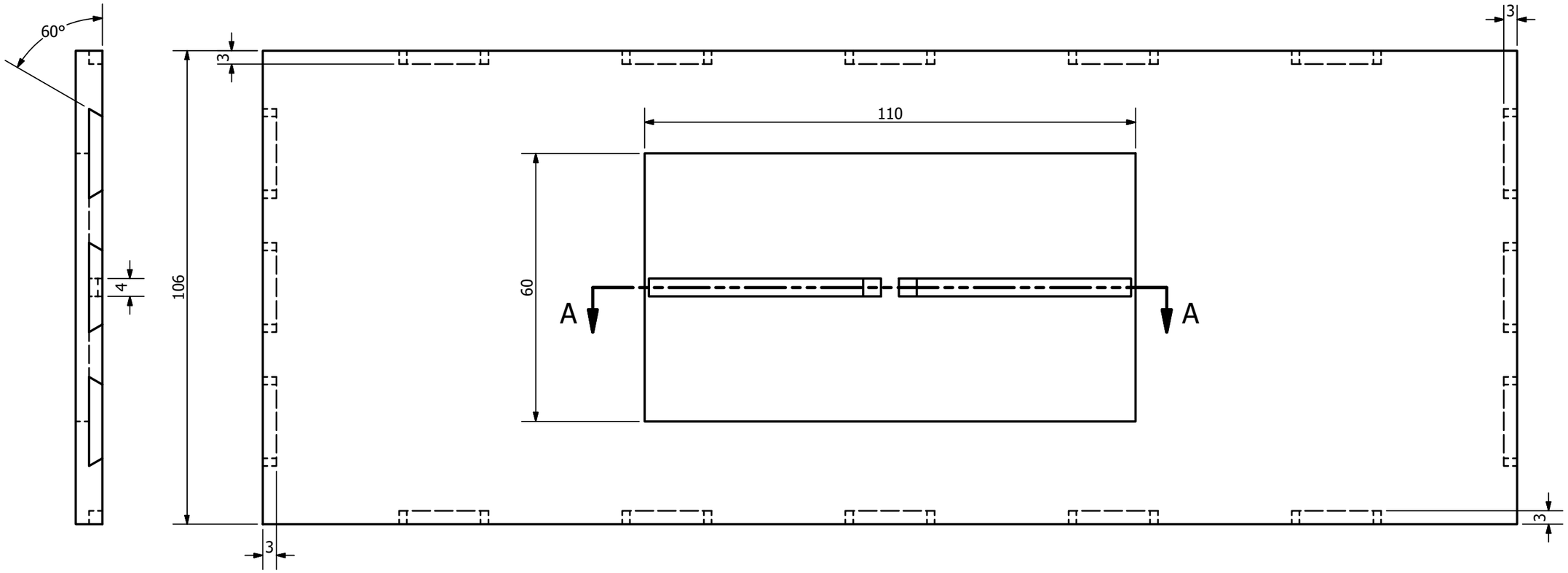




Lista de Partes			
Item	Cdad.	Rótulo	Descripción
1	1	400.100.500	Tapa lateral izquierda
2	1	400.100.100	Tapa superior
3	1	400.100.200	Tapa frontal
4	1	400.100.400	Tapa lateral derecha
5	1	400.100.300	Tapa trasera

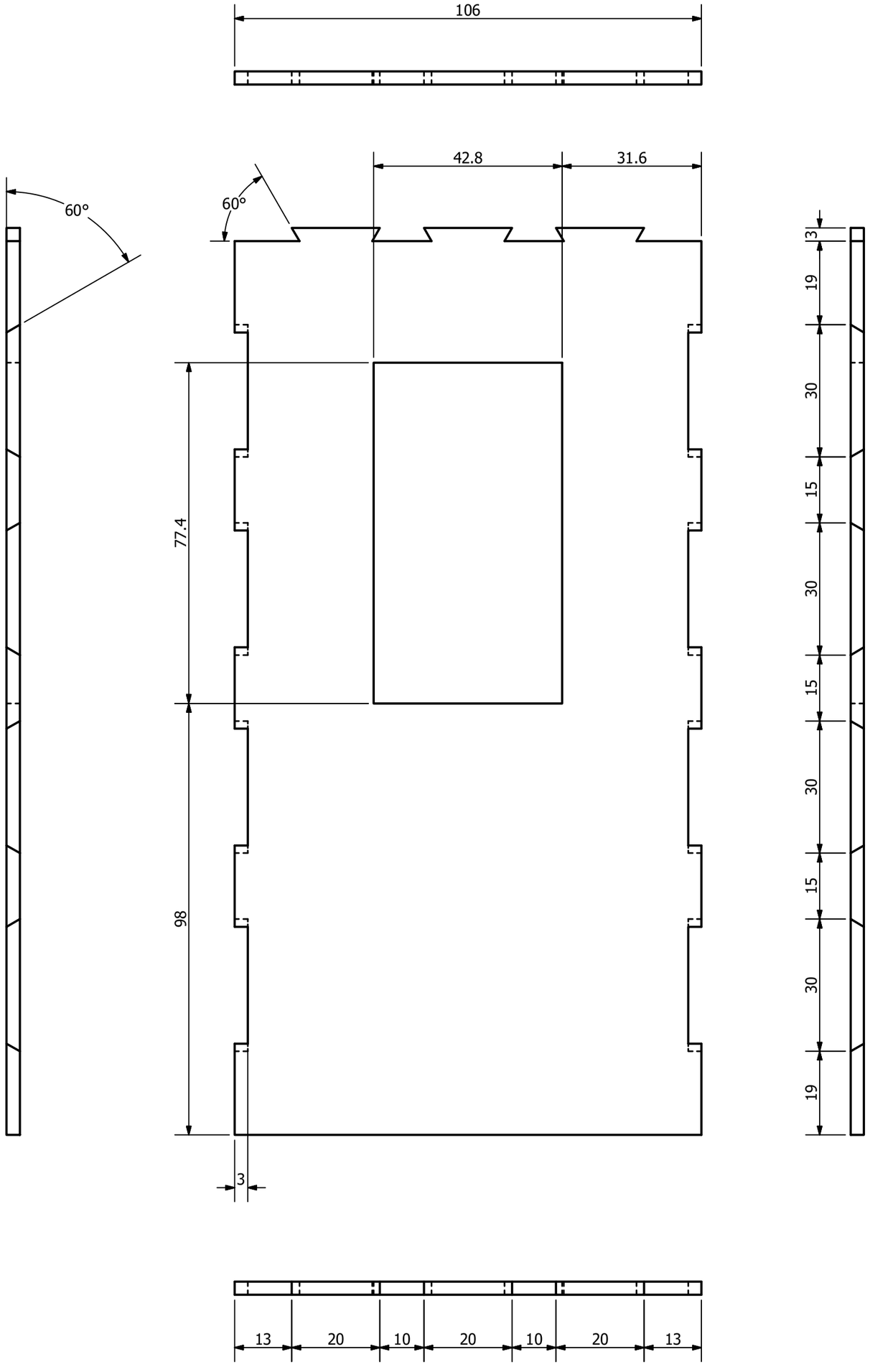
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 400.100.000 Escala 1 / 2	Página 13/21	Carcaza de Protección General



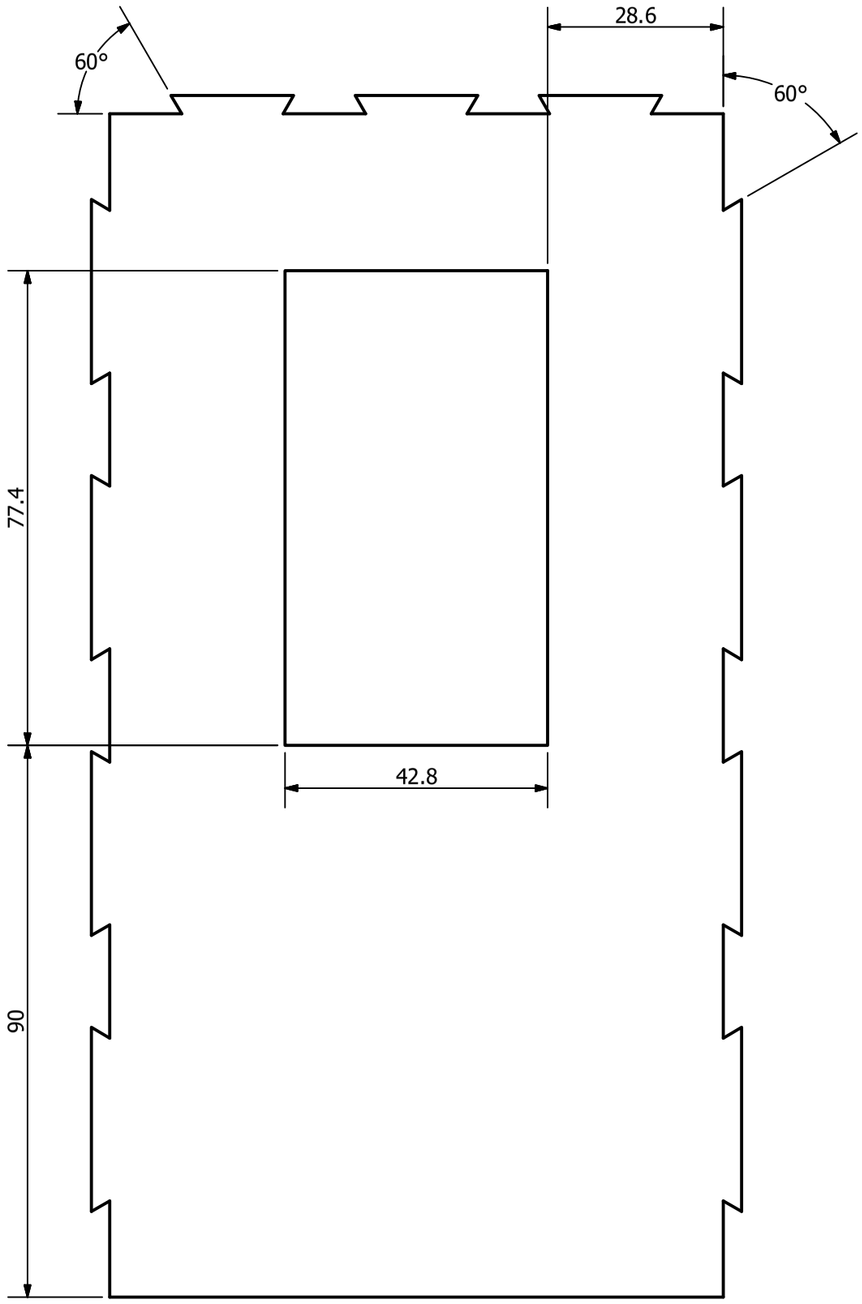


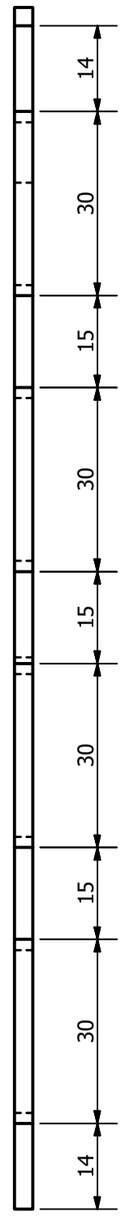
SECTION A-A
SCALE 2 : 1

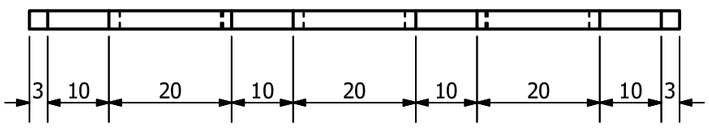
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 400.100.100 Escala 1 : 1	Página 14/21	Tapa superior



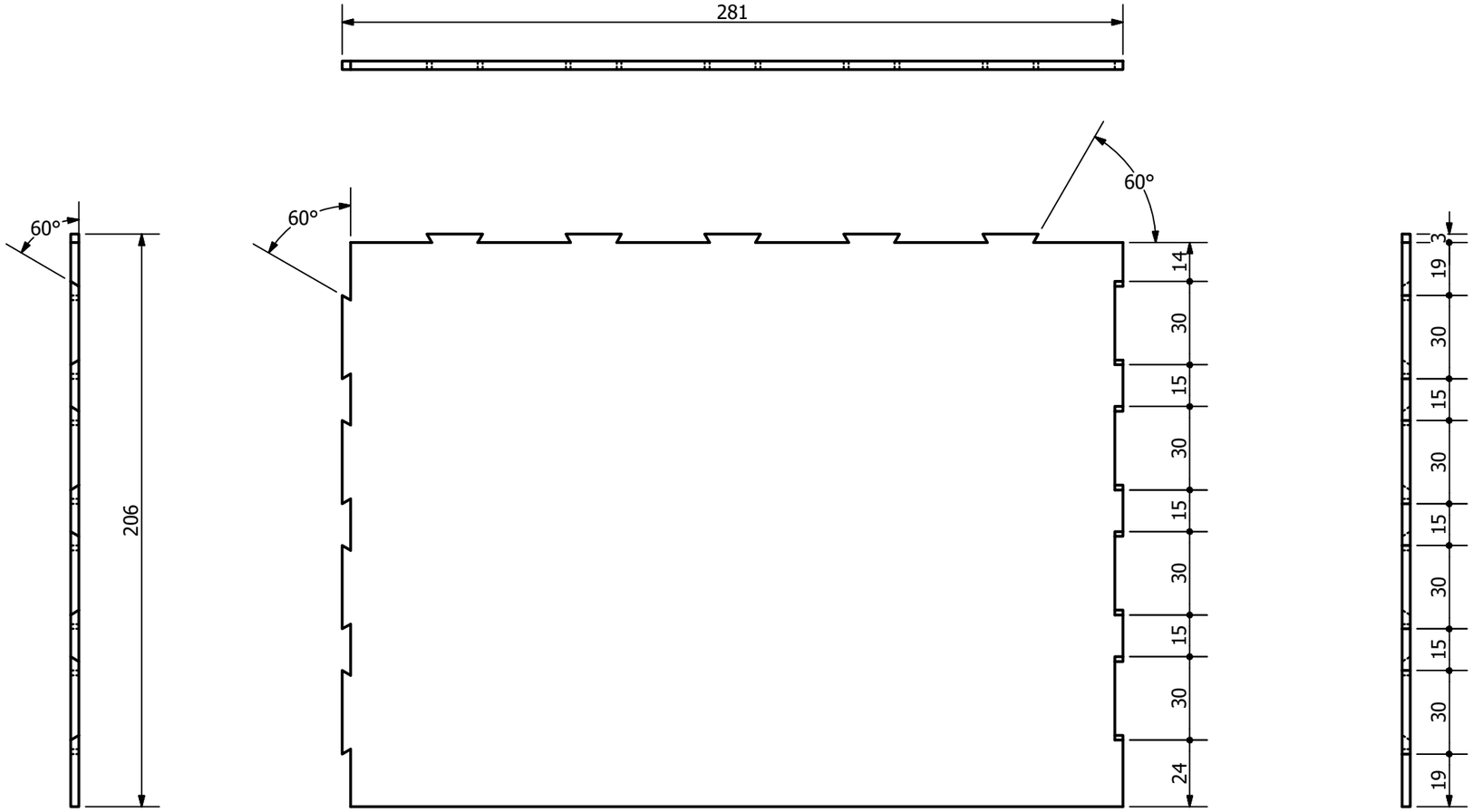
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial			
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 400.100.200		Tapa frontal	MEC utfsm
	Escala 1 : 1	Página 15/21		

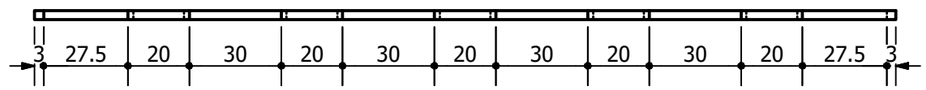




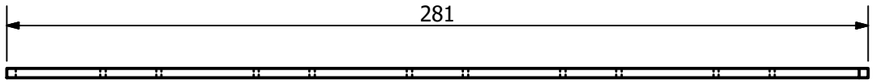


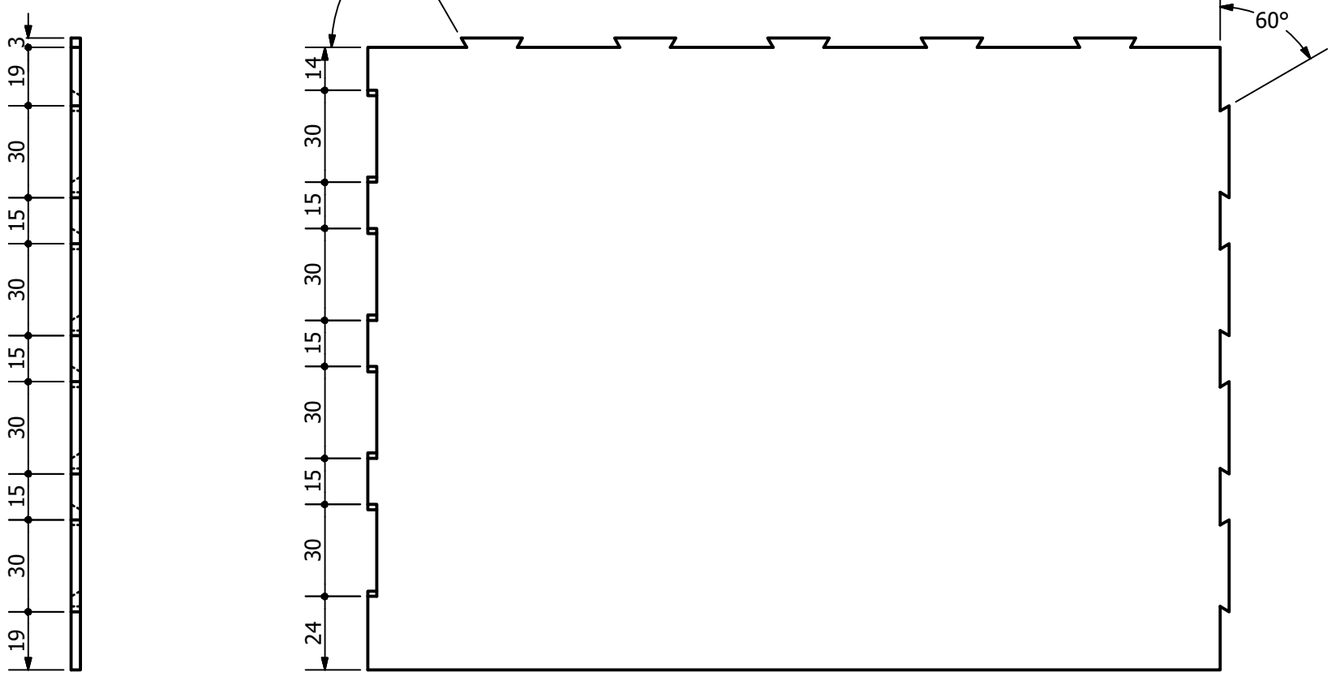
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 400.100.300 Escala 1 : 1	Página 16/21	Tapa trasera

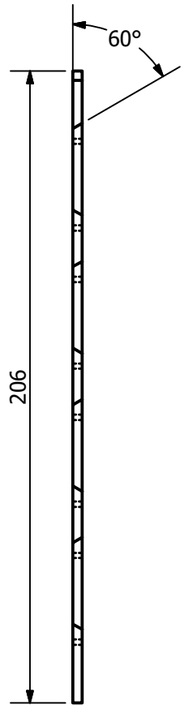


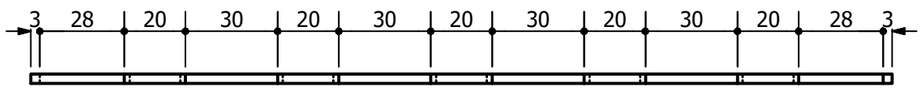


Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial			
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 400.100.400 Escala 1 / 2	Página 17/21	Tapa lateral derecha	MEC

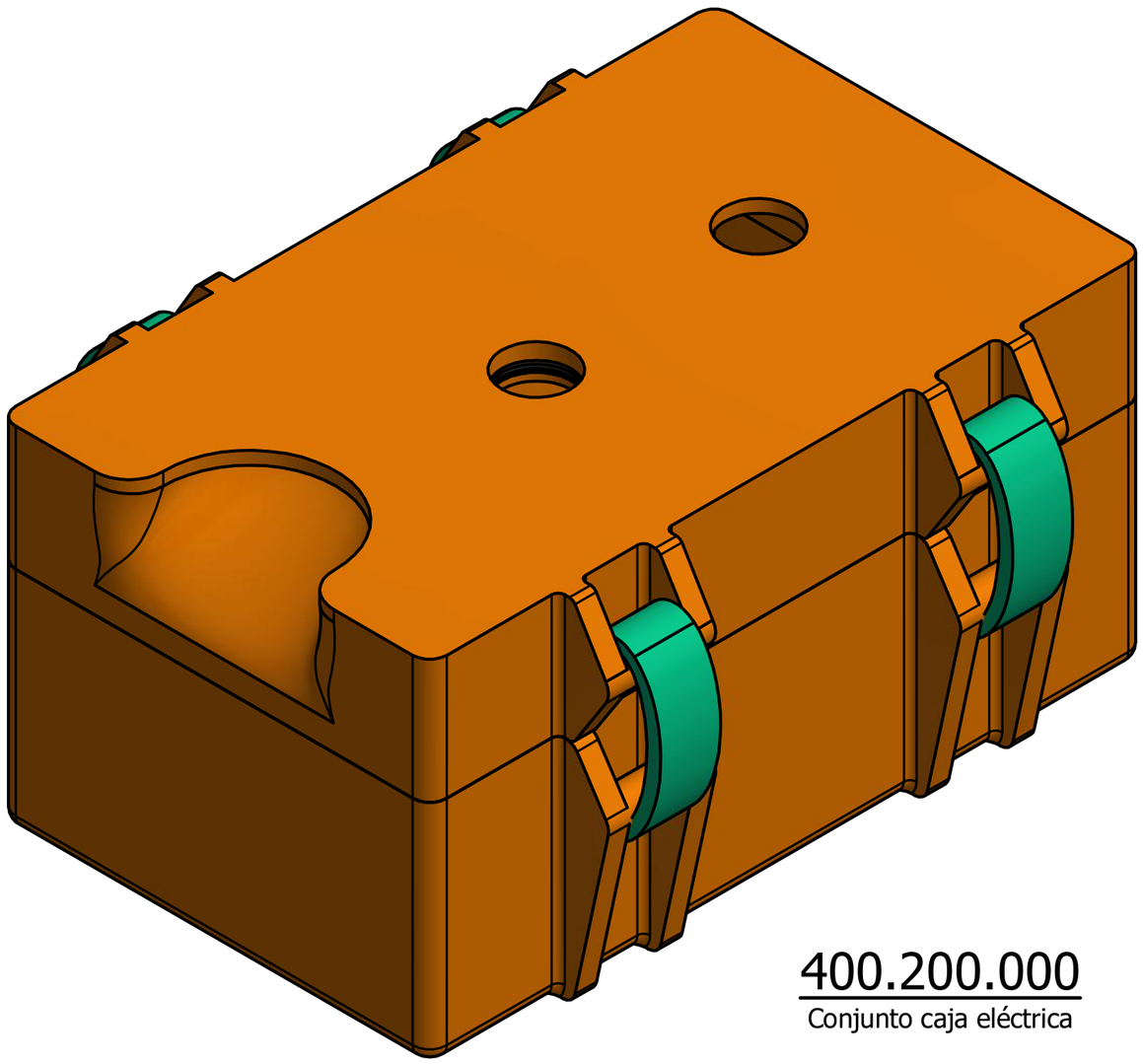




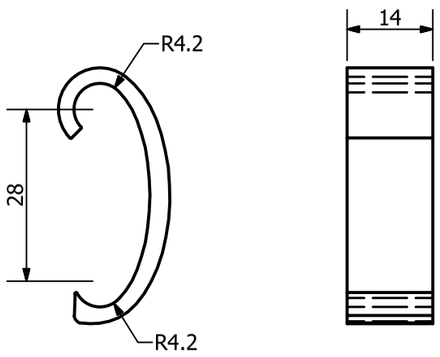




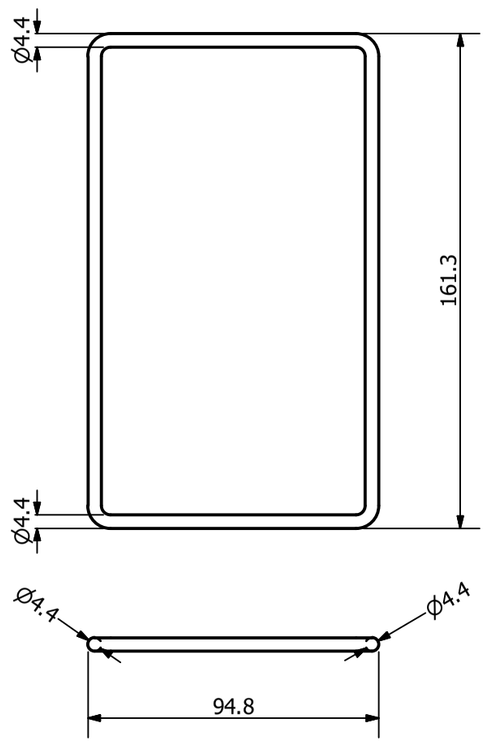
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 400.100.500 Escala 1 / 2	Página 18/21	Tapa lateral izquierda



400.200.000
Conjunto caja eléctrica

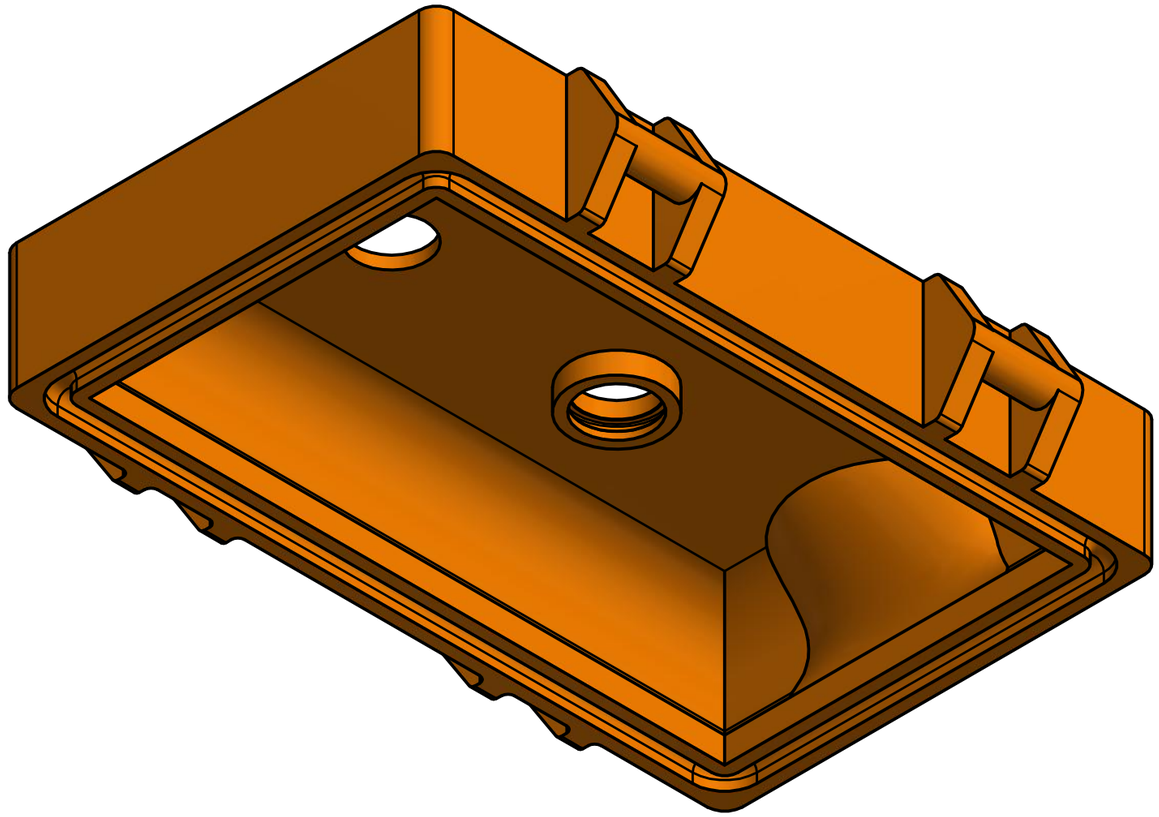


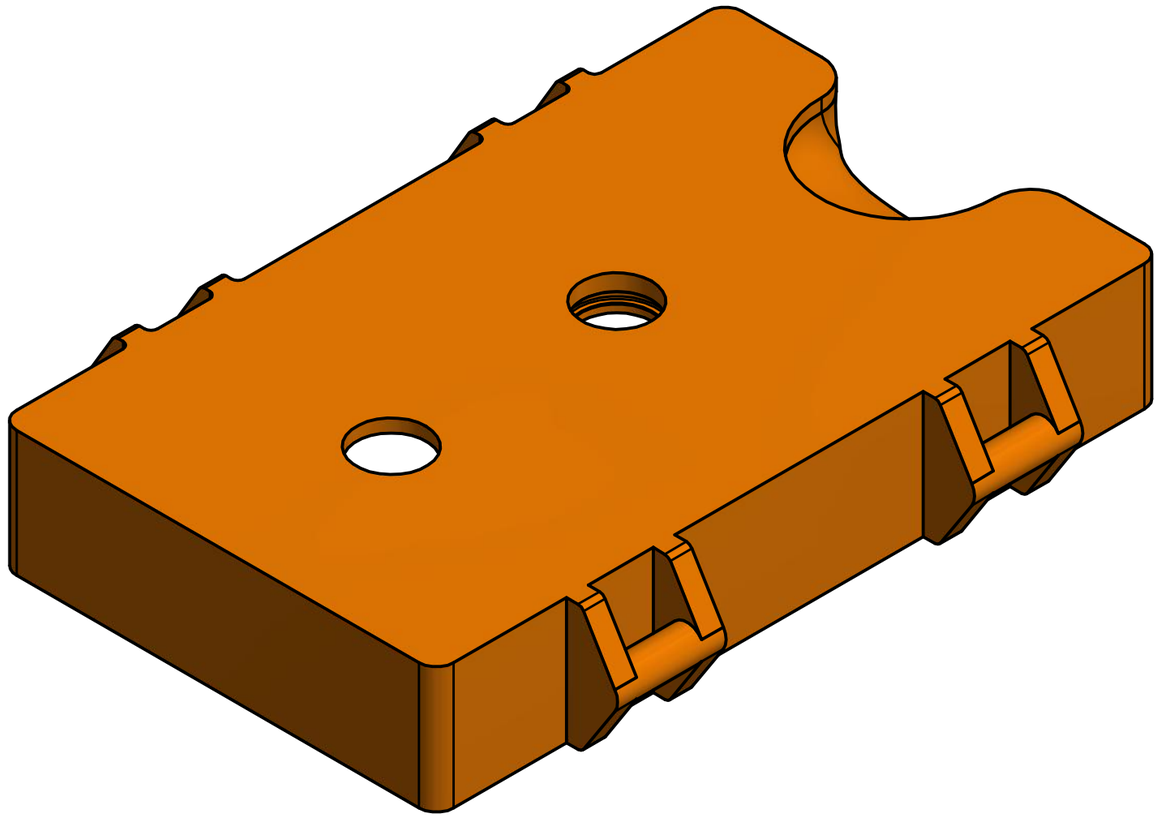
400.200.300
Pestillo de cierre caja eléctrica

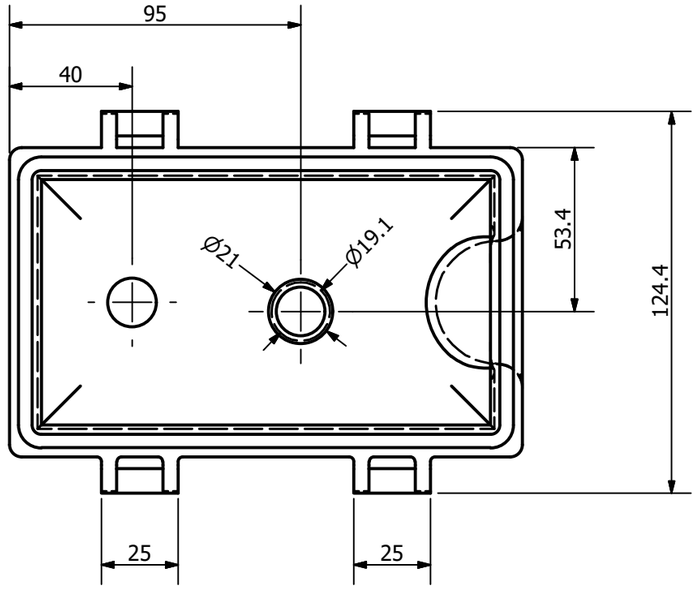


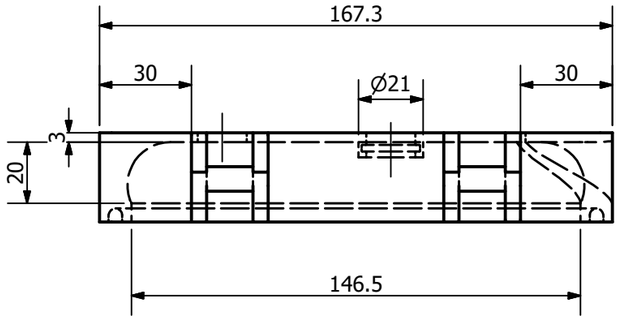
400.200.400
Goma sello caja eléctrica

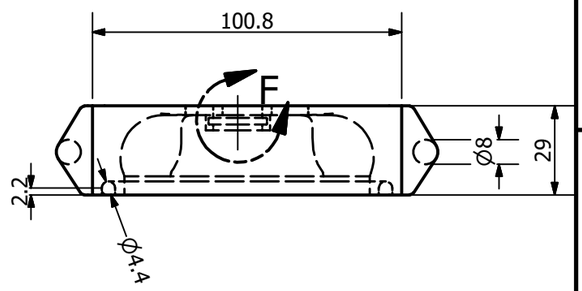
Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial			
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 400.200.000		Conjunto caja eléctrica	MEC utfsm
	Escala 1 : 1	Página 19/21		

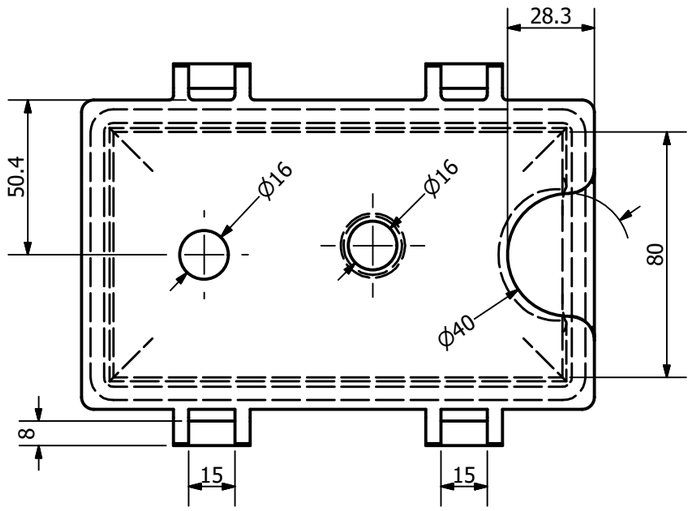


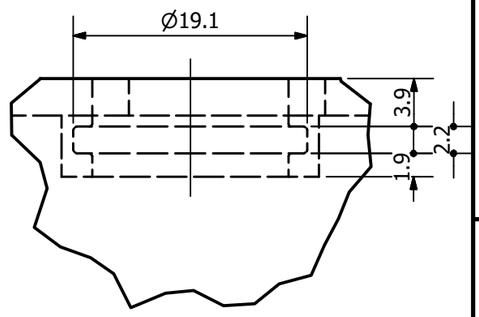






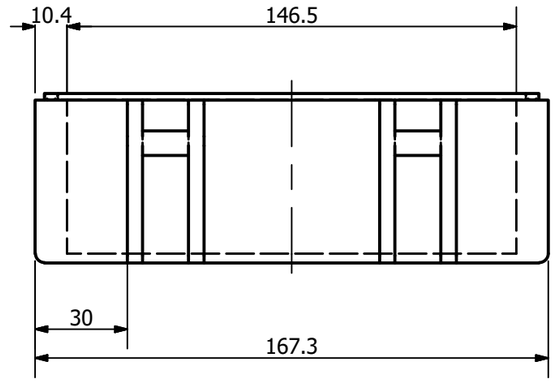


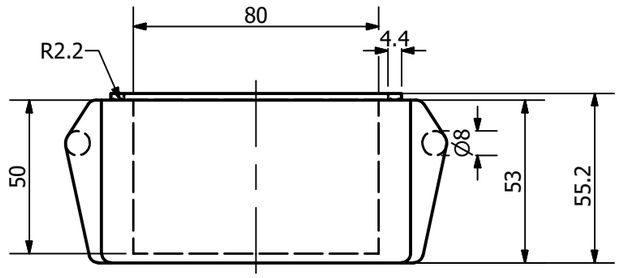


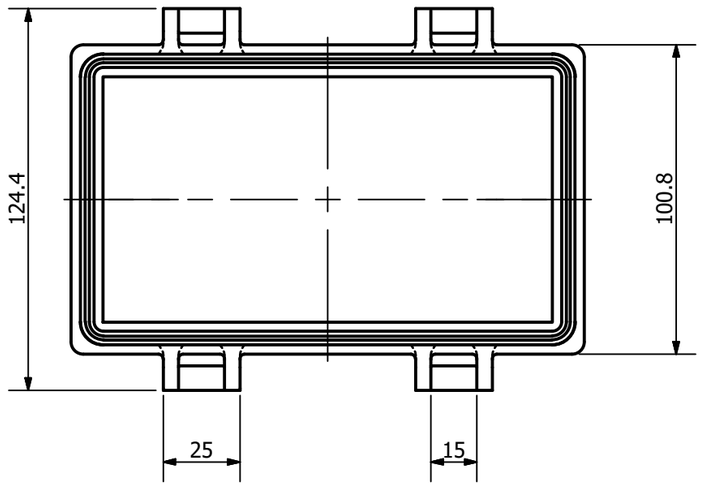


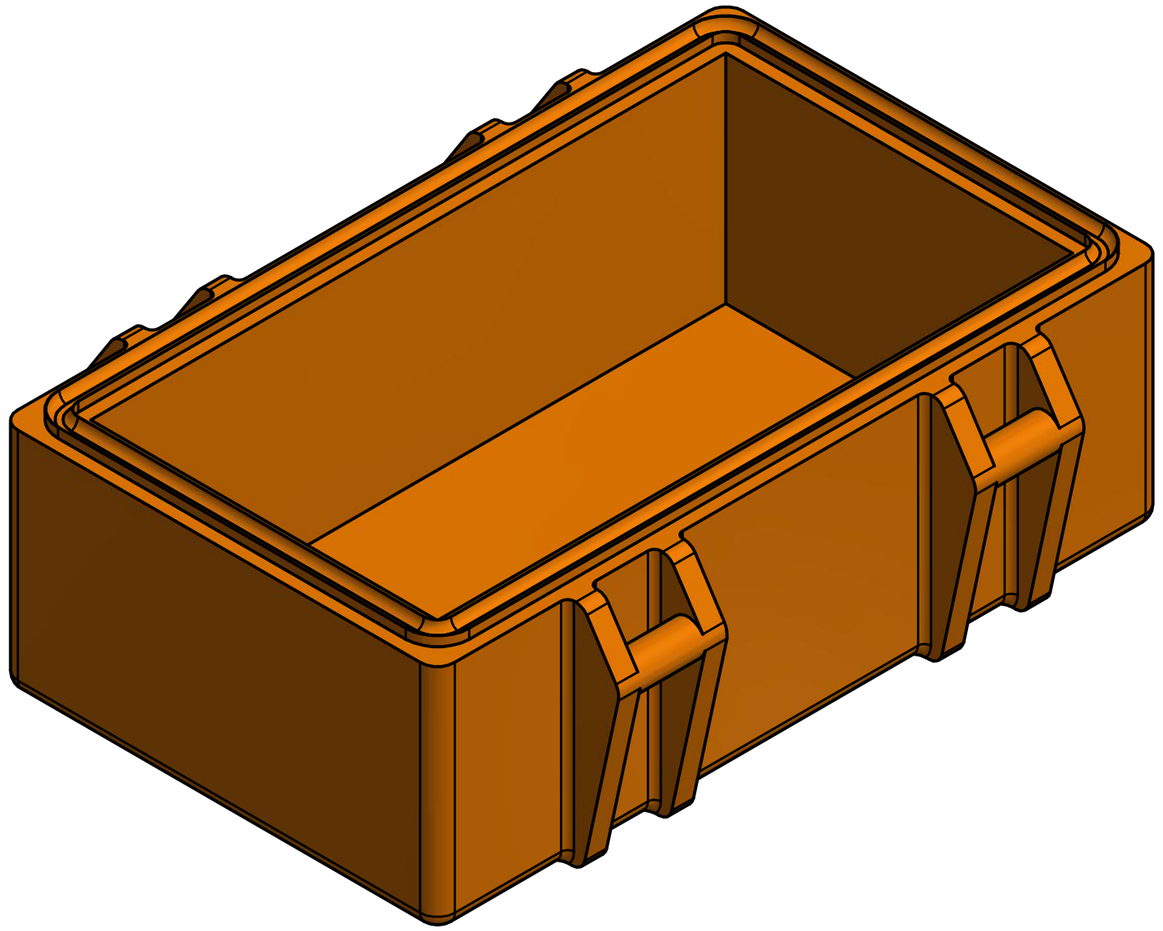
Detalle F
O-Ring
Escala 2 : 1

Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial		
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 400.200.100 Escala 1 / 2	Página 20/21	Caja Eléctrica Tapa Superior









Diseñado por Cristián González	Tensómetro Instantáneo de Cuerdas para Ambiente Marino Proyecto de título para optar al grado de Ingeniero Mecánico Industrial			
Revisado por Udo Rheinschmidt	Rótulo: 400.200.000		Caja Eléctrica Tapa Inferior	MEC UTFSM
	Escala 1 / 2	Página 21/21		

Apéndice C

Ficha Técnica Rodamientos



W 638-2RS1

Rodamientos rígidos de bolas

Datos de los rodamientos

Tolerancias,

Normal (métrica), P6, P5, Normal (en pulgadas),

Juego radial interno,

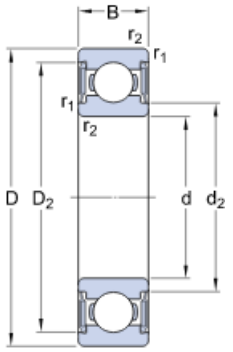
Pares de rodamientos apareados, Acero inoxidable d < 10 mm, Otros rodamientos

Interfaces del rodamiento

Tolerancias de los asientos para condiciones estándares,

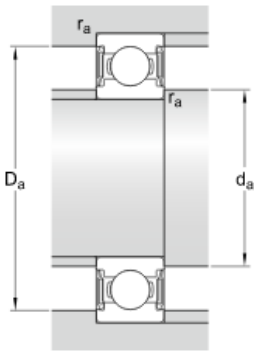
Tolerancias y ajustes resultantes

Especificación técnica



DIMENSIONES

d	8 mm
D	28 mm
B	9 mm
	≈ 13.9 mm
	≈ 22.38 mm
	min. 0.3 mm



DIMENSIONES DE LOS RESALTES

	min. 10 mm
	max. 13.8 mm
	max. 26 mm
	max. 0.3 mm

DATOS DEL CÁLCULO

Capacidad de carga dinámica básica	C	3.97 kN
Capacidad de carga estática básica		1.96 kN
Carga límite de fatiga		0.083 kN
Velocidad límite		19000 r/min
Factor de cálculo		0.035
Factor de cálculo		12.4

MASA

Rodamiento de masa	0.028 kg

Apéndice D

Ficha Técnica Technyl

TECHNYL

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

PROPIEDADES	NORMAS	UNIDADES	PA6	PA6 COLADO	PA66
FICHAS TÉRMICAS					
Densidad	DIN 53479	g/cm3	1,14	1,15	1,14
Recuperación de humedad ponderal	DIN 53475	%			
• en el agua a 23°C Eh 50			2,5	3	2,2
• en el agua a 23 °C hasta saturación			10	7	8,6
Punto de fusión	ASTM D 789	°C	212	220	255
Coeficiente de dilatación lineal	VDE 0304/1	10^{-5} X K^{-1}	12	10	11
Conductividad térmica a Eh 0	VDE 0304/1	W (k.M)	0,28	0,29	0,25
Temperatura de utilización admisible					
• en el aire por puntas bajo débiles cargas		°C	150	120 - 140	160
• en el aire en trabajo continuo		°C	90	80 – 120	100
• en el frío		°C	-40	-40	-30
Combustibilidad (índice límite de oxígeno)	ASTM D 2863	%	23,5	25	25,5
Combustibilidad UL 94					
• Espesor 1,6 mm			HB		V2
• Espesor 3,2 mm			HB		V2
Variaciones dimensionales lineales					
• de 0 a Eh 50		%	0,60		0,50
• de 0 a Eh 100		%	2,75		2,60
MECÁNICAS					
Esfuerzo al límite fluencia Eh 50					
(Resistencia a la tracción)	DIN 53455	daN/mm²	5	7-8	6,1
Módulo de elasticidad en tracción	DIN 53457	daN/mm²			
• Eh 0			285		350
• Eh 50				135	130
Módulo de elasticidad en flexión	DIN 53457	daN/mm²			
• Eh 0			300	320	310
• Eh 50			120	130	125
Esfuerzo de flexión para carga máxima	NF T 51-001	daN/mm²	4,4	5,0	5,2
Resistencia al choque sobre probetas entalladas					
Método Charpy - Eh 50	DIN 53 453	J/cm²	1,4		1,5
Indice de dureza Eh 50	NF T 51-024	daN/mm²	3,8		5,8
Dureza	ASTM D 785	Shore D	73	78	78
Valor del producto PV (P en daN/cm² - V en m/min)					
• en servicio continuo en seco			< 70		< 90
• en presencia de agua			<140		<180
• en presencia de aceite			<250		<320
Esfuerzo de compresión para una deformación de 1%	ASTM D 695-69	daN/mm²			
• Eh 0			2,8		3,1
• Eh 50			1,6		2,1
ELÉCTRICAS					
Relatividad transversal					
• Eh 50	DIN 53 482	Ω.cm	1.10^{12}	1.10^{12}	1.10^{13}
Rigidez dieléctrica	NF C 26-225	KV/mm	24,5	24,5	24,5
Factor de disipación dieléctrica tg δ a Eh 50	DIN 53483				
• 50 Hz			0,13		0,13
• 103 Hz			0,13		0,13
Permeabilidad relativa £ a Eh 50	DIN 53483				
• 50 Hz					7,7
• 103 Hz			9		5,9

PLASTIGEN
Soluciones en Polímeros

Casa Matriz: Camino Lo Boza 370, Pudahuel, Santiago +56 2 2332 3902
Sucursales: Santiago - Iquique - Antofagasta - Copiapó - Viña del Mar - Curicó - Concepción - Temuco - Puerto Montt
www.plastigen.cl

Bibliografía

Catastro del Recurso Energético Asociado a Oleaje para el Apoyo a la Evaluación de Proyectos de Generación de Energía Undimotriz. Inf. téc., HydroChile, el Instituto Nacional de Hidráulica (INH), la Pontifica Universidad Católica de Chile (PUC), la Universidad Técnica Federico Santamaría (UTFSM), la Universidad de Valparaíso (UV), PRDW Aldunate Vásquez y la Dirección de Proyectos de la Armada, 2014.

R. Bakhtyar, D. A. Barry, A. Yeganeh-Bakhtiary, y A. Ghaheri. Numerical simulation of surf-swash zone motions and turbulent flow. *Advances in Water Resources*, 32(2):250–263, 2009a. ISSN 03091708. doi:10.1016/j.advwatres.2008.11.004. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.11.004.

R. Bakhtyar, D. A. Barry, A. Yeganeh-Bakhtiary, y A. Ghaheri. Numerical simulation of surf-swash zone motions and turbulent flow. *Advances in Water Resources*, 32(2):250–263, 2009b. ISSN 03091708. doi:10.1016/j.advwatres.2008.11.004. URL https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.11.004.

R. Balaji, M.V. Ramana Murthy, y J. Satheeshkumar. Measurement of Surf Zone Hydrodynamics Along the Coastline of Pondicherry, India. En *Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018). Lecture Notes in Civil Engineering*, tomo 23. Springer Singapore, 2019. ISBN 978-981-13-3134-3. doi:10.1007/978-981-13-3134-3_3. URL https://doi.org/10.1007/978-981-13-3134-3{_}3.

Hernando Barragán. *Wiring : Prototyping Physical Interaction Design*. Tesis Doctoral, Interaction Design Institute Ivrea, Ivrea, Italia, 2004. URL http://people.interactionivrea.org/h.barragan/thesis/thesis{_}low{_}res.pdf.

J. A. Battjes. SURF-ZONE DYNAMICS. *Annual Reviews Fluid Mechanics*, 1988. URL https://doi.org/10.1146/annurev.fl.20.010188.001353.

J Beyá, M Álvarez, A Gallardo, H Hidalgo, C Aguirre, J Valdivia, C Parra, L Méndez, F Contreras, P Winckler, y M Molina. *Atlas de Oleaje de Chile*. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso, Valparaíso, 1 edón., 2016. ISBN 978-956-368-194-9.

Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. McGraw-Hill Interamericana, México, D.F., 8 edón. ISBN 978-0-07-312193-2.

Eliecer Cabrera Fernández. Bombeo de Agua de Mar con Energía Undimotriz. 2017.

Pablo Campos. Elaboración de un Plan de Mantenimiento Basado en la Norma SAE JA-1011 para Asegurar la Disponibilidad de Activos Críticos del Centro de Investigación de Energías Renovables. 2019.

Philipp Englisch. Design and Implementation of a wave- powered sea water pump on the shore- line of Chile. 2018.

Interface Force. Load Cell Terms and Definitions. URL https://iff-src7widtytnreyxilku.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2015/01/definitionen.pdf.

Scott C. James, Yushan Zhang, y Fearghal O'Donncha. A machine learning framework to forecast wave conditions. *Coastal Engineering*, 137(March):1–10, 2018. ISSN 03783839. doi:10.1016/j.coastaleng.2018.03.004. URL https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.03.004.

Kyowa. About Strain Gages. URL https://www.kyowa-ei.com/eng/file/download/technical/strain{_}gages/pdf{_}index{_}001{_}eng.pdf.

Magnus Larson, Susumu Kubota, y Li Erikson. Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: Field experiments and mathematical modeling. *Marine Geology*, 212(1-4):61–79, 2004. ISSN 00253227. doi:10.1016/j.margeo.2004.08.004. URL https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.08.004.

Sandro Longo, Marco Petti, y Inigo J. Losada. Turbulence in the swash and surf zones: A review. *Coastal Engineering*, 45(3-4):129–147, 2002. ISSN 03783839. doi:10.1016/S0378-3839(02)00031-5. URL https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00031-5.

National Institute of Standards and Technology. *Specification, Tolerances, and Other Technical Requirements for Weighing and Measuring Devices*. National Institute of Standards and Technology, nist handb ed$^{\acute{o}n}$., 2019. ISBN 0160512492. doi:10.6028.NIST.HB.44-2019. URL https://doi.org/10.6028.NIST.HB.44-2019.

National Instruments Corporation. Strain Gauges Measurement - A Tutorial. Inf. téc., 1995.

Renato Osorio Castro. Simulación a Gran Escala del Impacto de las Olas en el Borde Costero. 2016.

María del Carmen Palomino Monzón y José Luis. Almazán Garate. *Descripción, Medida y Análisis del Oleaje*. 2000. ISBN 84-7493-289-0. URL http://www.almazan-ingenieros.es/data/archivo/Descripcion,medidayanalisisdeloleaje.pdf.

Xiao Ping Pang, Ying Hu, Sheng Lin Tang, Zheng Xiang, Guilin Wu, Tanchumin Xu, y Xing Qiang Wang. Physical properties of high-strength bolt materials at elevated temperatures. *Results in Physics*, 13(February):102156, 2019. ISSN 22113797. doi:10.1016/j.rinp.2019.102156. URL https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102156.

Antonio Reyes. Diseño y Cosntrucción de Sistema de Desalinización por Método de Humidificación-Deshumidificación (HDH) Acoplado con Energía Solar. 2016.

Rice Lake Weighing Systems. *Manual de Celdas de Carga y Módulos de Pesaje: Una Amplia Guía a la Teoría de las Celdas de Caga, su Construcción e Instalación*. URL www.ricelake.com.

Germán Rodríguez Rodríguez. *Métodos de Análisis Espectral del Oleaje. Estudio Comparativo*. Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 1995. URL https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/1998/1/2459.pdf.

F. P. Shepard, K. O. Emery, y E. C. LaFond. Rip Currents: A Process of Geological Importance. *The Journal of Geology*, 49(4):337–369, 1941. URL https://www.jstor.org/stable/30063339.

C. E. Stringari, D. L. Harris, y H. E. Power. A novel machine learning algorithm for tracking remotely sensed waves in the surf zone. *Coastal Engineering*, 147:149–158, 2019. ISSN 03783839. doi:10.1016/j.coastaleng.2019.02.002.

The SWAN team. SWAN scientific and technical document version 41.31. Inf. téc., Delft University of Technology, Faculty of Civil Engeneering and Geoscience, Environmental Fluid Mechanics Section, Delft, The Netherlands, 2019. URL http://swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swantech.pdf.