



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**



**DISEÑO ESTRUCTURAL DE BOYA OCEANOGRÁFICA PARA EL CENTRO  
OCEANOGRÁFICO DEL PACÍFICO SUR DE LA UNIVERSIDAD DE  
CONCEPCIÓN (COPAS/COASTAL).**

POR

**Richard Antonio Fernández Melgarejo**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Aeroespacial.

Profesor Guía:  
Doctor Carlos Medina Muñoz.

Julio 2023  
Concepción (Chile)

© 2023 Richard Antonio Fernández Melgarejo

© 2023 Richard Antonio Fernández Melgarejo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



**Quiero expresar mis agradecimientos a todas las personas que han sido parte y apoyo para mí en este largo camino, en especial a mi familia y a la familia Manriquez-Márquez.**

*Esta memoria está dedicada a las personas que como yo tenían proyecciones ocultas y que tan solo les falta un empujón para arriesgarse.*

## Resumen

Las boyas desempeñan una función fundamental para diferentes objetivos, tales como el estudio climático, tácticos, comercial, etc., resistiendo condiciones adversas y proporcionando una función precisa. Este proyecto se centra en el diseño estructural de una boya oceanográfica para el Centro Oceanográfico del Pacífico Sur de la Universidad de Concepción, COPAS, quien actualmente adquiere boyas a un costo muy elevado en mercados internacionales. Por esta razón, surge la necesidad de fabricar boyas locales. El objetivo principal es diseñar boyas eficientes y duraderas que mantengan seguros los dispositivos eléctricos y electrónicos del COPAS.

Este proyecto prevé crear una boya resistente a cargas del ambiente marino, resistir corrosión y salinidad, asegurarse de que sea flotable y adaptable a las necesidades del cliente. Se utiliza una metodología que incluye definir requisitos y especificaciones, seleccionar materiales adecuados, diseñar la geometría y distribución de pesos, analizar cargas y diseñar sistemas de anclaje y fondeo. En consecuencia, se pretende mantener o incrementar la durabilidad, flotabilidad y seguridad de la boya a diseñar, además de la personalización y el desarme, con el fin de simplificar el transporte a las zonas de anclaje.

Los resultados obtenidos en este informe revelan un diseño que cumple con los objetivos propuestos, lo que brinda la capacidad de soportar cargas significativas propias del lugar de instalación, además de la selección de materiales que se realizó los que podrán resistir la corrosión y salinidad del ambiente marino. La estimación de flotabilidad garantiza la permanencia de la boya en la superficie del agua, incluso con equipos adicionales con una reserva de flotabilidad de 9811 N. El análisis de estabilidad garantiza mediciones precisas y seguras, dado que el ángulo máximo de inclinación que la boya alcanzara en la zona costera de Talcahuano y Dichato es de 20°.

En conclusión, el proyecto representa una solución innovadora para el COPAS, permitiéndoles obtener mediciones precisas y verídicas sin preocuparse por la corrosión, flotabilidad y estabilidad de boyas extranjeras de gran costo. Este proyecto ofrece una solución con una boya duradera y adaptable, cumpliendo las exigencias del COPAS, con un costo total de \$11,575,753 CLP, un 77% más económico que las boyas importadas.

**Palabras clave: boya oceanográfica, flotabilidad, estabilidad, COPAS.**

## Abstract

The Buoys play a fundamental role in different objectives, such as climate research, tactical applications, commercial purposes, etc., enduring adverse conditions and providing precise functionality. This project focuses on the structural design of an oceanographic buoy for the South Pacific Oceanographic Center (COPAS) at the University of Concepción. Currently, COPAS acquires buoys at a very high cost from international markets. Therefore, there is a need to manufacture local buoys. The main goal is to design efficient and durable buoys that will keep COPAS's electrical and electronic devices safe.

This project aims to create a buoy capable of withstanding marine environmental loads, corrosion, and salinity, ensuring its buoyancy and adaptability to the client's needs. The methodology includes defining requirements and specifications, selecting appropriate materials, designing the buoy's geometry and weight distribution, analysing loads, and designing anchoring and mooring systems. Consequently, the objective is to maintain or increase the buoy's durability, buoyancy, and safety, as well as customization and disassembly to simplify transportation to anchoring locations.

The results obtained in this report reveal a design that meets the proposed objectives, providing the capacity to withstand significant loads at the installation site, as well as the selection of materials capable of resisting corrosion and marine salinity. The buoyancy estimation ensures the buoy's presence on the water's surface, even with additional equipment, with a reserve buoyancy of 9811 N. The stability analysis guarantees accurate and secure measurements, given that the maximum tilt angle the buoy will reach in the coastal area of Talcahuano and Dichato is 20°.

In summary, this project represents an innovative solution for COPAS, enabling them to obtain precise and reliable measurements without worrying about the corrosion, buoyancy, and stability issues of expensive foreign buoys. This project offers a cost-effective solution with a durable and adaptable buoy that meets COPAS's requirements, with a total cost of \$11,575,753 CLP, 77% cheaper than imported buoys.

**Keywords: Oceanographic buoy, buoyancy, stability, COPAS.**

## Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Lista de Tablas .....	v
Lista de Figuras .....	vi
Glosario .....	viii
<b>1 CAPÍTULO 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción del problema.....	1
1.3 Objetivo principal .....	1
1.4 Objetivos específicos.....	1
1.5 Metodología.....	2
1.6 Planificación .....	3
<b>2 CAPÍTULO 2: Marco Teórico .....</b>	<b>4</b>
2.1 Introducción.....	4
2.2 Tipos de boyas .....	4
2.3 Diseño estructural de las boyas. ....	5
2.4 Sistema de anclaje .....	11
2.5 Consideraciones ambientales.....	11
2.6 Normativas y regulaciones: .....	12
<b>3 CAPÍTULO 3: Estado del Arte .....</b>	<b>14</b>
3.1 Introducción.....	14
3.2 Comparativas .....	14
<b>4 CAPÍTULO 4: Selección de materiales. ....</b>	<b>17</b>
4.1 Introducción.....	17
4.2 Material para flotador.....	17
4.3 Material para estructura superior e inferior al flotador.....	20
4.4 Recubrimientos.....	23
4.5 Sistemas de seguridad anticorrosivos .....	24
4.6 Resumen estudio de materiales.....	25
<b>5 CAPÍTULO 5: Desarrollo teórico de flotabilidad y estabilidad. ....</b>	<b>26</b>
5.1 Consideraciones de diseño.....	26
5.2 Propuesta de diseño .....	26
5.3 Estudio de flotabilidad.....	30

5.4 Estudio de cargas externas.....	33
5.5 Estudio de estabilidad sin fuerzas externas. ....	38
5.6 Estudio de estabilidad con fuerzas externas .....	41
6 CAPÍTULO 6: Diseño boya oceanográfica. ....	45
6.1 Partes principales de la boya .....	45
6.2 Estudio unión apernada de Torre-Flotador y Espacio de sensores,.....	48
6.3 Concejos de instalación eléctrica, fabricación y distribución de pesos. ....	50
6.4 Resumen de datos técnicos boya oceanográfica.....	51
7 CAPÍTULO 7: Análisis de presupuesto para el desarrollo. ....	52
7.1 Diseño.....	52
7.2 Estructura.....	52
7.3 Flotador.....	53
7.4 Recubrimiento .....	54
7.5 Cotización viable de fabricación. ....	55
7.6 Comparativa de costos con boya Fulmar.....	56
8 CAPÍTULO 8: Conclusiones y perspectivas futuras.....	57
Referencias .....	58

## Lista de Tablas

Tabla 1: Simbología y letras griegas .....	xiii
Tabla 2: Indicaciones de balizamiento IALA. ....	12
Tabla 3: Especificaciones boya SKUA .....	14
Tabla 4: Especificaciones boya FULMAR .....	15
Tabla 5: Especificaciones boya FLC1800.....	15
Tabla 6: Comparación físicas, químicas y financieras de aceros. [12] [9].....	22
Tabla 7: Resultados primera interacción para línea de flotación inicial [Fuente propia]. ....	32
Tabla 8: Resultados de iteración para encontrar reserva de flotabilidad [Fuente propia]. ....	33
Tabla 9: Promedios datos principales climatológicos y oceanográficos [Fuente propia]. ....	34
Tabla 10: Fuerzas ejercidas por el viento FW [Fuente propia]. ....	35
Tabla 11: Fuerzas ejercidas por las corrientes marinas Fw [Fuente propia]. ....	36
Tabla 12: Coeficiente de tensión k para oleaje [Fuente propia]. ....	37
Tabla 13: Fuerzas horizontal total con factor k [Fuente propia]. ....	37
Tabla 14: panel solar recomendado.....	46
Tabla 15: Estudio de pernos principales (Cargas) [Fuente: Inventor]. ....	49
Tabla 16: Estudio de pernos principales (Perno) [Fuente: Inventor]. ....	49
Tabla 17: Resultados estudio de pernos principales [Fuente: Inventor]. ....	49
Tabla 18: Datos técnicos boya oceanográfica final [Fuente propia]. ....	51
Tabla 19: Costo de diseño y cálculo.....	52
Tabla 20: Cotización de estructura [Fuente propia]. ....	52
Tabla 21: Cotización flotador (Relleno) [Fuente propia]. ....	53
Tabla 22: Costo total flotador más logística [Fuente propia]. ....	53
Tabla 23: Cotización productos de recubrimiento EPOTHAN [Fuente propia]. ....	54
Tabla 24: Tabla comparativa final de costos [Fuente propia]. ....	55
Tabla 25: Comparativa boya Fulmar con boya desarrollada [Fuente propia]. ....	56

## Lista de Figuras

Figura 1: Plano de flotación y línea de flotación [1].....	viii
Figura 2: Centro de carena, obra muerta, obra viva y franco bordo. [1].....	ix
Figura 3: Líneas de referencia de las boyas [1].....	x
Figura 4: dimensiones horizontales de una boya. [1].....	x
Figura 5: Dimensiones verticales de una boya [1] .....	xi
Figura 6: Puntos principales el eje de crujía [1].....	xii
Figura 7: Metacentro [2]. .....	xii
Figura 8: boya oceanográfica y boya DART respectivamente [Fuente: [4] [5]] .....	5
Figura 9: Secciones principales de una boya oceanográfica [Fuente: propia] .....	6
Figura 10: Ejemplo de flotabilidad Arquímedes [Fuente: [6]].....	8
Figura 11: Metacentro [2]. .....	10
Figura 12: Ejemplo marcas especiales [4].....	13
Figura 13: Gama de elementos con densidad inferior a la del mar [Fuente propia] [6].....	18
Figura 14: Comparación de resistencia a la compresión y a la tracción [Fuente propia] [9].....	19
Figura 15: Gráfica comparativa de precio [kg/m <sup>3</sup> ] vs densidad [kg/m <sup>3</sup> ] [Fuente propia] [9]. .....	20
Figura 16: Corrosión bimetalica [8]. .....	21
Figura 17: Corrosión por picadura [8].....	21
Figura 18: ánodos de sacrificio oxidado [14].....	24
Figura 19: isométrico principal boya oceanográfica. [Fuente propia] .....	27
Figura 20: Medidas generales del diseño final de la boya oceanográfica en mm. [Fuente propia] ...	29
Figura 21: Dimensión flotador en mm. ....	31
Figura 22: Línea de flotación inicial en mm [Fuente propia]. .....	32
Figura 23: Distancias de línea inicial y final de flotación en mm [Fuente propia]. .....	33
Figura 24: fuerzas externas [15].....	34
Figura 25: Fuerza de la cadena [1]. .....	38
Figura 26: Ubicación Centroides y centro de masa en mm [Fuente propia]. .....	39
Figura 27: Distancia C-M corregido con lastre de 150 kg [Fuente propia]. .....	40
Figura 28: Posición metacentro MC en mm [Fuente propia]. .....	41
Figura 29: líneas principales con peso de cadena en mm [Fuente propia]. .....	42
Figura 30: Gráfico de par de adrizamiento vs ángulo de adrizamiento [Fuente propia].....	43
Figura 31: Vistas isométricas flotador [Fuente propia]. .....	45
Figura 32: Torre sin accesorios [Fuente propia]. .....	46
Figura 33: Torre completa [Fuente propia]. .....	46
Figura 34: Bastón superior [Fuente propia]. .....	47
Figura 35: Espacio de sensores [Fuente propia].....	47
Figura 36: Composición de anclaje de la boya [Fuente: propia] [5] [1]. .....	48
Figura 37: Conector eléctrico IP69 tipo T y recto (Referencial) [Fuente: [16]]. .....	50



## Glosario

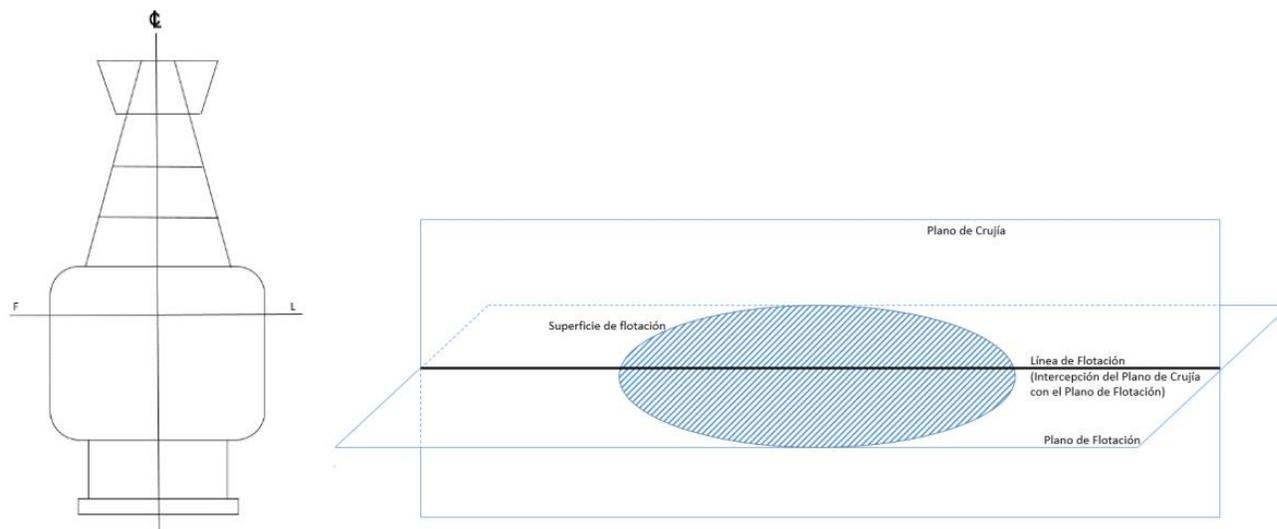
Acrónimos y siglas.

COPAS	:	Centro Oceanográfico del Pacífico Sur
IALA	:	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
SHOA	:	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile
DIRECTMAR	:	Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante

Glosario técnico.

Plano de flotación: superficie del agua donde flota la boya Figura 1.

Línea de flotación (F-L): es la línea de la boya que separa la parte seca de la parte mojada, es decir, la parte sumergida, suponiendo a la boya flotando en aguas tranquilas (Figura 1).



**Figura 1: Plano de flotación y línea de flotación [1]**

Obra: Es el conjunto estructural de un buque o una boya.

Carena u Obra viva: Es correcto mencionarlo como Carena u Obra viva. Y representa toda la estructura que está bajo la línea de flotación (Figura 2).

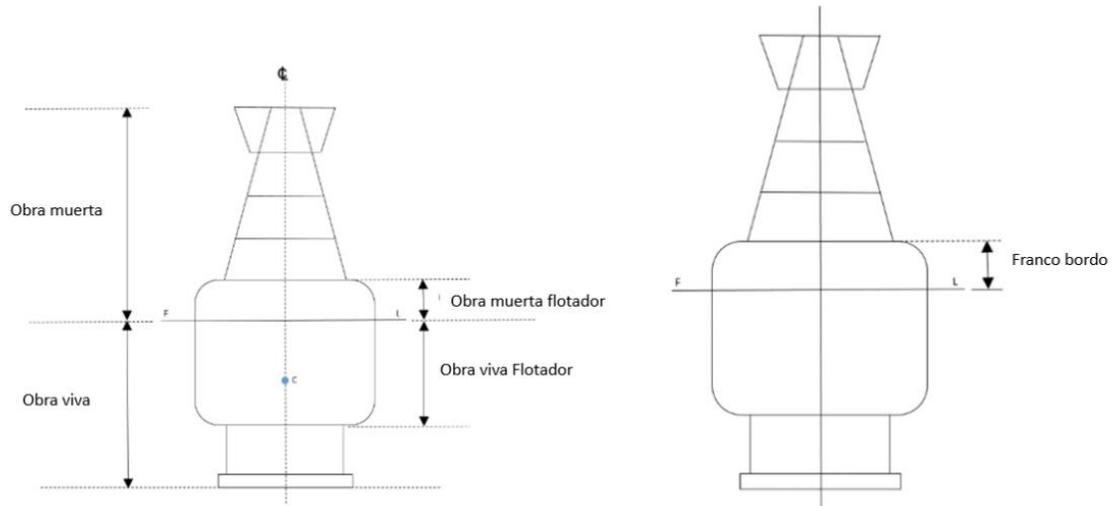
Volumen de carena: Al volumen estructural que está bajo el agua se le llama volumen de la carena o simplemente volumen sumergido y se representa con  $V_s$  (Figura 2).

Centro de carena o centro de empuje (C): El centro de carena es el punto en el que se aplica la resultante de la presión hidrostática que actúa sobre la superficie sumergida del de un objeto [2]. Normalmente se describe igual que el centro de flotación F.

Obra muerta: Es el conjunto estructural de la boya que se halla por encima de la línea de flotación.

**Franco bordo:** En una boya, se llama franco bordo, a la distancia vertical en el costado de la boya entre la línea de flotación y la línea tangente al casquete superior del flotador de la boya proyectada hasta su costado.

**Reserva de flotabilidad:** Es el volumen comprendido entre la superficie de flotación y el casquete superior de la boya.



**Figura 2: Centro de carena, obra muerta, obra viva y franco bordo. [1]**

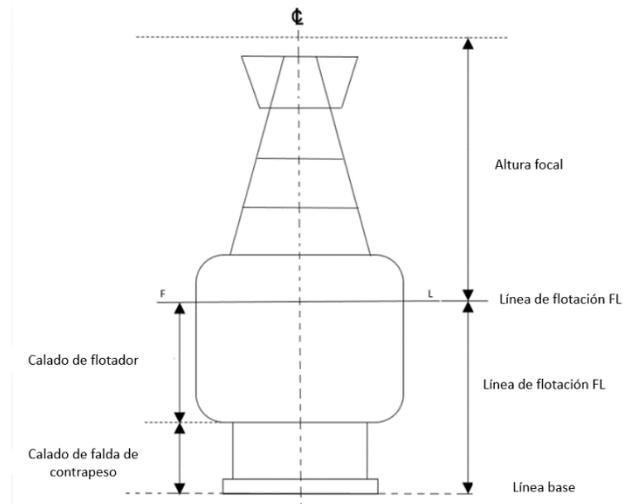
**Línea central de la boya o línea de crujía ( $\phi$ ):** Es la línea vertical que pasa por el centro de la boya dividiéndola en dos partes iguales, es el eje de simetría y se representa con el símbolo  $\phi$ . También se conoce como plano diametral, plano de simetría de la boya, o plano vertical que pasa por el centro de la boya. Figura 3

**Línea base o línea de trazado (K):** Es una línea paralela a la flotación, ubicada en la parte inferior de la base del contrapeso de la boya, a la cual van a venir referidas todas las distancias verticales. Figura 3

**Altura o plano focal:** Es una línea vertical perpendicular a la línea de flotación que mide la distancia desde la línea de flotación hasta el límite superior de la boya. Se podría decir es la distancia de la obra muerta de la boya. Figura 3

**Calado ( $C_A$ ):** Se llama calado a la distancia vertical de la parte sumergida del flotador de la boya. Figura 3

**Calado total ( $C_t$ ):** Es la distancia vertical de la parte sumergida de la boya. Figura 3



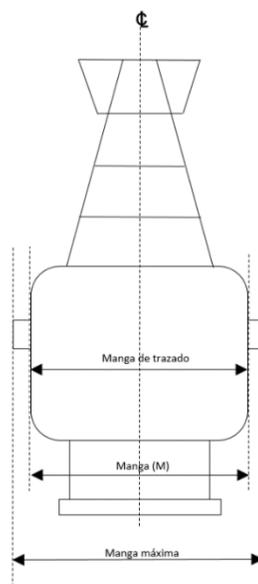
**Figura 3: Líneas de referencia de las boyas [1]**

Dimensiones de la boya: Al ancho de la boya se le llama manga y a la altura se le llama puntal, representándose respectivamente por M y P (Figura 4).

Manga (M): Dimensión horizontal transversal, medida entre planos paralelos al plano de crujía y tangentes a los costados del flotador de la boya (Figura 4).

Manga máxima ( $M_{max}$ ): Es la anchura medida horizontalmente, entre planos paralelos al plano de crujía y tangentes a los costados del flotador de la boya o a la defensa de disponer de ellas (Figura 4).

Manga de Trazado ( $M_t$ ): Es la anchura medida horizontalmente entre las caras internas del flotador de la boya, es decir, lo que se denomina fuera de miembros. Figura 4



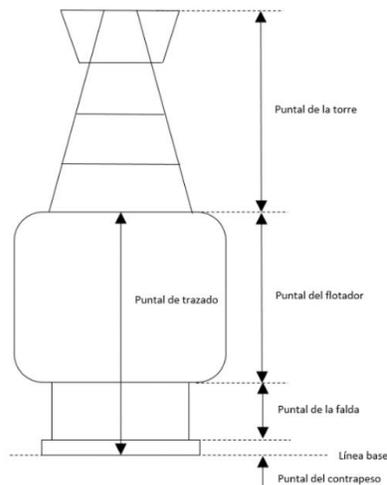
**Figura 4: dimensiones horizontales de una boya. [1]**

Puntal (P): Es la altura máxima de la boya. (Figura 5)

Puntal de trazado ( $P_T$ ): Es la distancia vertical en la línea de crujía medida interiormente y perpendicular desde la línea base de la boya hasta la parte interna del casquete superior de la boya. (Figura 5)

Puntal de sección: Es la altura de cada sección de la boya. Existen varios, aunque los más usados son los correspondientes a secciones estructurales como, por ejemplo:

- Puntal del contrapeso ( $P_c$ )
- Puntal de la falda o sensores ( $P_s$ )
- Puntal del flotador ( $P_f$ )
- Puntal de torre ( $P_t$ )

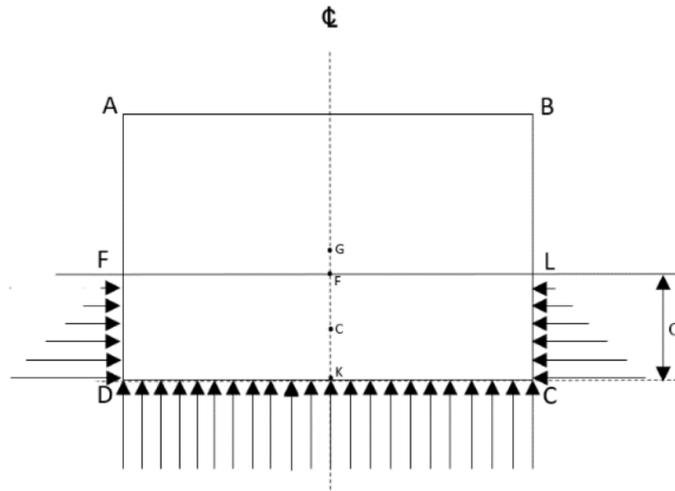


**Figura 5: Dimensiones verticales de una boya [1]**

Centro de gravedad de la boya (G): Es el punto en el que se concentra la masa de la boya y sobre el cual actúa la fuerza de gravedad. Este punto se encuentra en el centro de simetría de la boya, donde se intersecan los planos sagital, frontal y horizontal [3] (Figura 6).

Centro de flotación (F): Es el punto en el que se intersecan las líneas de acción de las fuerzas hidrostáticas que actúan sobre el casco de un buque o boya cuando está flotando en calado [1] (Figura 6).

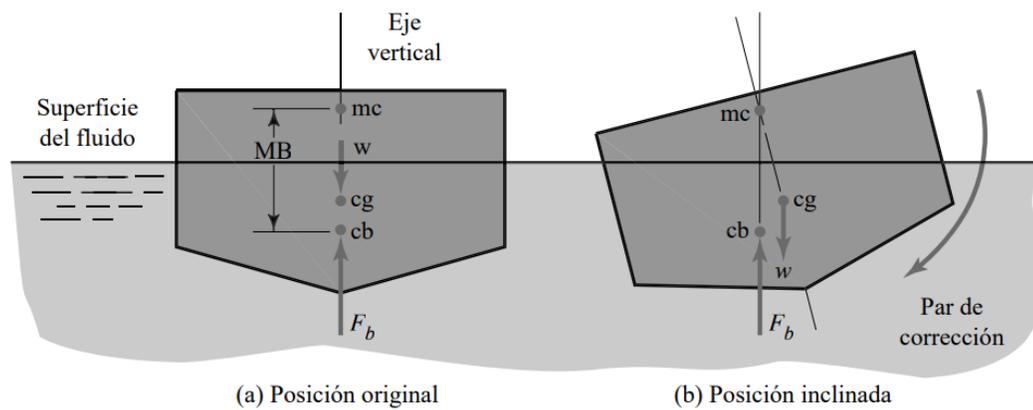
Reserva de flotabilidad: Es el volumen del flotado que se encuentra por encima de la línea de flotación y se encuentra completamente cerrado al agua, lo que aumenta la flotabilidad de la boya. Esta reserva de flotabilidad sirve para proporcionar un margen de seguridad adicional (Figura 6).



**Figura 6: Puntos principales el eje de crujía [1]**

**Fouling:** Es la flora y fauna marina que se incrusta en la estructura viva del cuerpo flotante, también es llamada incrustación, el cual se describe como la acción y el efecto de cubrirse una superficie en el agua con una costra mineral o cualquier tipo de crustáceo.

**Metacentro:** El metacentro ( $mc$ ) se define como la intersección del eje vertical de un cuerpo cuando está en su posición de equilibrio y una línea vertical que pasa a través de la nueva posición del centro de flotabilidad cuando el cuerpo es girado ligeramente” [2] (Figura 7).



**Figura 7: Metacentro [2].**

**Tabla 1: Simbología y letras griegas**

$\alpha$	: Grado adrizante.
$k$	: Coeficiente de tensión
$g$	: Gravedad
$MC$	: Distancia desde el centro de calado al metacentro
$L$	: Largo de la cadena
$I$	: Es el mayor momento de inercia de una sección horizontal del cuerpo tomado en la superficie del fluido (en este proyecto sería el flotador)
$H_o$	: Profundidad del agua sin oleaje.
$H_m$	: Profundidad del agua, más la mitad de la altura del oleaje.
$GZ$	: Brazo estabilizante
$GM$	: Distancia centro de masa CG al metacentro M
$F$	: Fuerzas horizontales
$V_s$	: Volumen sumergido
$P_u$	: Puntal
$P_T$	: Puntal de trazado
$P_t$	: Puntal de torre
$P_s$	: Puntal de falda o sensores
$P_f$	: Puntal de flotador
$P_c$	: Puntal de contrapeso
$P$	: Peso de la cadena en kg/m
$M_t$	: Manga de Trazado
$M_{max}$	: Manga máxima
$M$	: Manga
$K$	: Línea base
$h_o$	: Altura del oleaje de la cresta hasta el seno.
$H$	: Altura variable
$G$	: Centro de gravedad
$F_{Neta}$	: Fuerza neta
$E$	: Fuerza de Empuje
$C_t$	: Calado total
$CF$	: Centro de Flotación
$C_A$	: Calado

$\phi$	: Línea central de la boya o línea de crujía
C	: Centro de carena
$\rho_w$	: Densidad del agua
$\rho_n$	: Densidad del material n sumergido
$\rho_f$	: Densidad del fluido
$\rho_{cpo}$	: Densidad del cuerpo sumergido
$\rho_w$	: Densidad del aire
$m_{cpo}$	: Masa del cuerpo
$W_{cpo}$	: Peso del cuerpo
$W_{Total}$	: Peso total de la boya incluyendo la influencia la cadena
$V_w$	: Velocidad de la corriente
$V_{scpo}$	: Volumen de agua desplazado del cuerpo
$V_n$	: Volumen sumergido del material n
$V_d$	: Volumen sumergido objeto
$V_W$	: Velocidad del viento
$V_S$	: Volumen desplazado del fluido o volumen sumergido
$R_2$	: Radio menor flotador
$R_1$	: Radio mayor flotador
$M_E$	Par de escora
$M_A$	Par de adrizamiento
$F_w$	: Fuerza de la corriente.
$F_b$	: Fuerza de flotación
$F_W$	: Fuerza del viento
$C_D$	: Coeficiente de arrastre de la geometría
$A_w$	: Área de contacto del agua sobre la estructura de la boya que está bajo el agua
$A_W$	: Área de contacto del viento con la boya sobre el agua
$h_2$	: Altura cono truncado
$\gamma_f$	: Peso específico del fluido

# **CAPÍTULO 1: Introducción**

## **1.1 Introducción**

Las boyas oceanográficas desempeñan un rol crucial al medir una amplia gama de parámetros oceánicos y climáticos, desde la temperatura hasta la salinidad y corrientes. Estas boyas, diseñadas para resistir condiciones marinas adversas, transmiten datos precisos al personal encargado.

Su estructura es esencial, soportando cargas estáticas y dinámicas, manteniendo la estabilidad y su posición para mediciones y comunicación exactas. El proyecto aborda selección de materiales, diseño y anclaje, adaptando cálculos de flotabilidad y estabilidad. Se emplean herramientas como software de diseño, cálculos y selección de materiales.

El objetivo es garantizar durabilidad ante la corrosión y el ambiente marino, flotabilidad y seguridad de las boyas, contribuyendo a comprender mejor el océano. En resumen, este proyecto busca guiar el diseño de boyas oceanográficas resistentes y económicas para el COPAS, optimizando su desempeño en entornos oceánicos desafiantes.

## **1.2 Descripción del problema.**

El COPAS, parte de la Universidad de Concepción, se enfoca en el estudio de la biodiversidad marina a través de boyas oceanográficas. Estas boyas, actualmente adquiridas en mercados internacionales a un costo superior a los 60,000 USD, incluyendo traslado e inserción en el país, requieren adaptación de dispositivos de medición y presentan desafíos de transporte debido a su diseño monolítico. Además, su vida útil es breve, a menudo menos de un año, por diversas razones. Esta situación ha impulsado la necesidad de desarrollar en Chile boyas oceanográficas más asequibles y robustas, capaces de proporcionar mediciones ambientales y oceanográficas precisas y confiables en áreas remotas del océano. Estas nuevas boyas deben resistir las adversidades oceánicas, manteniendo estabilidad y posición para asegurar mediciones exactas.

## **1.3 Objetivo principal**

El objetivo de este proyecto es diseñar la estructura de una boya oceanográfica que sea eficiente para el cliente y duraderas ante la corrosión y el ambiente marino, con la capacidad de mantener seguro distintos dispositivos eléctricos o electrónicos.

## **1.4 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos del proyecto son los siguientes:

1. Diseñar la estructura de una boya oceanográfica que sea capaz de soportar cargas significativas, como la acción del viento, la fuerza de las olas y el peso de los equipos, sensores, fouling, etc. Además, debe componerse de materiales que resistan las condiciones de salinidad y corrosión del agua.

2. Estimar la flotabilidad de la estructura de la boya para mantenerla en la superficie del agua y soportar el peso de los equipos, sensores, personas y fouling que se adicionan en el tiempo de uso.
3. Relacionar los 2 objetivos antes mencionados para realizar un análisis de estabilidad que mantendrá la boya en una posición adecuada en el agua para garantizar la seguridad de los dispositivos de medición del centro oceanográfico.
4. Adaptar el diseño de la boya oceanográfica para que sea Personalizable y desarmable, que sea capaz de contener distintos dispositivos necesarios en los estudios que necesita el COPAS y, además, pueda separarse en secciones para un transporte fácil y rápido.

## **1.5 Metodología**

La metodología para cumplir con los objetivos específicos del proyecto de diseño estructural de una boya oceanográfica se sustenta en un conjunto de métodos y herramientas que se detallan a continuación:

En la etapa de diseño de la estructura, se emplea el software de diseño Autodesk Inventor. Esta herramienta permitirá crear una estructura que pudiera enfrentar cargas considerables, tales como la fuerza del viento, la acción de las olas y el peso combinado de los equipos, sensores y otros componentes. A través de esta metodología, se logró diseñar una geometría óptima que garantizara tanto la resistencia como la estabilidad necesaria para el desempeño de la boya.

Para la estimación de la flotabilidad, se recurrió a análisis de literatura, cálculos iterativos con el software ESS Professional. Este método posibilitó prever cómo la boya respondería ante el aumento de peso debido a la incorporación gradual de equipos, sensores, personal y fouling a lo largo de su uso.

La relación entre los dos objetivos anteriores, están centrados en el análisis de estabilidad, este requirió una integración cuidadosa de los resultados del diseño y los cálculos de flotabilidad realizados con los respectivos softwares mencionados, además de un análisis de literatura y estudios adicionales de la estabilidad de una boya y su comportamiento. Esta metodología permitirá verificar si la boya mantendría una posición estable en el agua bajo diferentes circunstancias, asegurando así la seguridad y funcionalidad de los dispositivos de medición.

La adaptabilidad y desarme del diseño, es un objetivo crítico, este se abordó a través del uso del software de diseño Autodesk Inventor y reuniones con el cliente (COPAS). Se focalizó en la creación de un diseño modular y ensamblable, que facilitara la personalización de la boya para diferentes necesidades de investigación del COPAS. Se diseñaron secciones modulares que podrían ser ensambladas y desmontadas con facilidad, permitiendo la incorporación de diversos dispositivos.

Por último, el análisis de materiales, crucial para cumplir con los objetivos de resistencia y durabilidad en condiciones marinas adversas, involucró la aplicación del software CES Edupack la cual es una herramienta para la resolución de problemas globales de selección de materiales. Con esta

herramienta, se evaluaron las propiedades de diversos materiales candidatos, considerando factores como resistencia a la corrosión y costos, para seleccionar aquellos que mejor se ajustaran a los requerimientos del proyecto.

La integración efectiva de estos métodos y herramientas permitió abordar con éxito cada uno de los objetivos específicos del proyecto, garantizando que la boya oceanográfica diseñada sea capaz de resistir cargas significativas, mantener la flotabilidad y la estabilidad, ser personalizable y desarmable, y contar con materiales adecuados para su construcción y uso en condiciones marinas.

## **1.6 Planificación**

Se indica en Anexo

## **CAPÍTULO 2: Marco Teórico**

En este capítulo se establecen las bases teóricas y definiciones críticas que son esenciales para comprender el proyecto, los puntos a tratar serán los siguientes:

1. **Introducción al diseño de boyas:** Se realizará una breve descripción del propósito y la importancia de las boyas en la navegación marítima y la investigación.
2. **Tipos de boyas:** Se mencionará una breve descripción de los diferentes tipos de boyas, sus aplicaciones y características.
3. **Diseño estructural de las boyas:** Se detallará una revisión de los principios de ingeniería y diseño utilizados en la construcción de boyas, incluyendo selección de materiales, diseño de la forma y dimensiones de la boya, y la relación entre la forma de la boya y su estabilidad en el agua.
4. **Sistemas de anclaje:** una descripción de los diferentes tipos de sistemas de anclaje y su importancia en el diseño de boyas.
5. **Consideraciones ambientales:** una verificación de las consideraciones ambientales que deben tenerse en cuenta en el diseño de boyas, incluyendo su impacto en la vida marina y la preservación del medioambiente.
6. **Normativas y regulaciones:** una descripción de las normativas y regulaciones que rigen el diseño de boyas, incluyendo las regulaciones de seguridad marítima y las regulaciones ambientales.

### **2.1 Introducción**

Las boyas son dispositivos flotantes que desempeñan múltiples funciones en la navegación marítima y en el estudio del medio ambiente marino [1]. Estas marcan canales, señalan peligros y condiciones climáticas, mientras recopilan datos sobre el agua, el clima y la vida marina. Además, resultan vitales para predecir y monitorear eventos climáticos extremos, como tormentas tropicales y huracanes, ofreciendo información para la planificación de evacuaciones y medidas de seguridad. En esencia, las boyas oceanográficas son herramientas esenciales tanto para la investigación científica marina como para prevenir pérdidas humanas y materiales al anticipar y controlar eventos climáticos extremos.

### **2.2 Tipos de boyas**

Existen varios tipos de boyas, cada uno diseñado específicamente para cumplir con una función determinada. Algunos de los tipos de boyas más comunes [1] incluyen:

1. **boyas de balizamiento:** utilizadas para indicar la posición de emergencia o para señalar la presencia de objetos sumergidos.
2. **boyas de navegación:** usadas para guiar a los barcos en su ruta y para marcar canales de navegación.
3. **boyas de salvamento:** empleadas para la búsqueda y rescate de personas en el agua.
4. **boyas de detección de tsunamis:** se utilizan para detectar tsunamis y alertar a las autoridades y a los residentes costeros.

5. boyas meteorológicas y oceanográficas: utilizadas para recopilar datos sobre el clima y las condiciones del océano (Figura 8).
6. boyas de amarre: usadas para anclar grandes embarcaciones.
7. boyas de pesca: utilizadas para marcar la posición de los anzuelos o las redes de pesca.
8. boyas Dart: indican cuando hay cambios drásticos en la presión del agua y que podrían generar maremotos o Tsunamis (Figura 8).
9. Sonoboyas: ayudan a la orientación de los submarinos

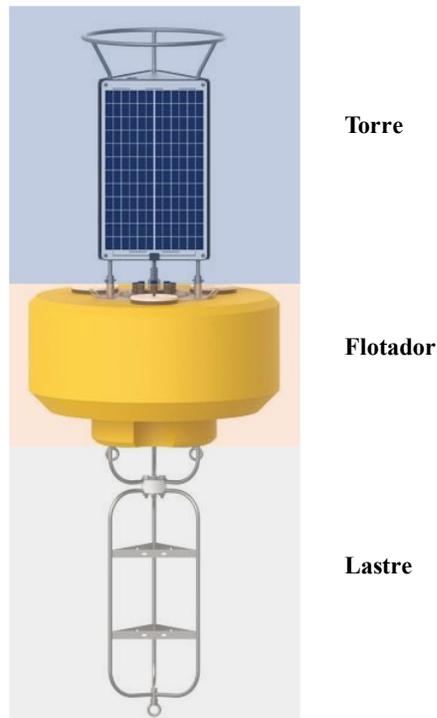


**Figura 8: boya oceanográfica y boya DART respectivamente [Fuente: [4] [5]]**

### **2.3 Diseño estructural de las boyas.**

La construcción de boyas requiere la aplicación de varios principios de ingeniería y diseño para garantizar la estabilidad, flotabilidad, durabilidad y efectividad de las boyas. Pero antes de explicar cada concepto a detalle es necesario saber cómo se estructura una boya oceanográfica.

La estructura de una boya oceanográfica consta de varias partes esenciales, incluyendo la carcasa, el sistema de flotación, los sensores y el equipo de comunicación. Pero es posible separar en 3 grandes sectores la composición de la boya, esto a la vez se puede observar en la figura 9.



**Figura 9: Secciones principales de una boya oceanográfica [Fuente: propia]**

1. Torre: La torre de una boya es una estructura vertical que se encuentra en la parte superior de la boya. En algunas boyas, como las oceanográficas, la torre puede alojar algunos de los sensores y transmisores para que estén más cerca de la superficie del agua, lo que puede mejorar la calidad de las mediciones. Además, la torre, en la mayoría de los casos, contiene el sistema de alimentación eléctrica de todo el conjunto. Por último, puede servir como soporte para luces de navegación, sensores de medición del clima y otros equipos de señalización. En general, contiene y protege 2 grupos principales para el cumplimiento general de las boyas oceanográficas.
  - a. Transmisores: Los datos recopilados por los instrumentos se envían a través de transmisores que se encuentran en la boya. Estos transmisores pueden enviar los datos a estaciones terrestres o satélites para su análisis y procesamiento.
  - b. Alimentación: La boya oceanográfica también tiene un sistema de alimentación, que puede incluir baterías o paneles solares, para mantener en funcionamiento los instrumentos y transmisores.
2. Flotador: El flotador es la parte más visible de la boya, que se encuentra sobre la superficie del agua. Está diseñado para ser lo suficientemente grande y estable para soportar los sensores y equipos de medición que se encuentran debajo de él y la torre que se encuentra sobre él.

3. Zona inferior: La función de la zona inferior de la boya puede variar según el tipo y funcionalidad de esta, en el caso de las boyas oceanográficas se utiliza para 3 funcionalidades esenciales, las cuales son:
  - a. Sistema de amarre: asegurar la boya al fondo del océano mediante un sistema de amarre que consta de una cadena o cuerda amarrada a un ancla. Este sistema es importante para mantener la boya en su lugar y evitar que se desplace debido a las olas y las corrientes.
  - b. Sistema de lastre: En esta zona se ubican los contrapesos de la boya, realizar esta acción asegura la estabilidad de la boya debido a que es posible desplazar el centro de gravedad del conjunto dependiendo de las situaciones meteorológicas, y físicas.
  - c. Instrumentos de medición: Debajo del flotador se encuentran los instrumentos de medición, que pueden incluir sensores de temperatura, salinidad, presión, corrientes y viento. Estos instrumentos recopilan datos que se utilizan para estudiar las condiciones climáticas y oceanográficas.

### 2.3.1 Flotabilidad

La flotabilidad es “Un cuerpo que esté en un fluido, ya sea en flotación o sumergido, se mantiene a flote por medio de una fuerza que es igual al peso del fluido desplazado” [2]. Estas fuerzas que se mencionan y que a la vez son opuestas son el peso del objeto ( $W$ ) que te empuja hacia abajo y la otra es la fuerza que te empuja hacia arriba, la cual es conocida como la fuerza de empuje ( $E$ ) o la Fuerza de flotación ( $F_b$ ),

Esta fuerza de flotación siempre actúa verticalmente hacia arriba a través del centroide del volumen desplazado. Además, es de gran importancia tener en consideración que la fuerza de empuje no depende del peso del objeto sumergido, sino solamente del peso del fluido desalojado, es decir, si se tienen cuerpos de diferentes materiales (aluminio, vidrio, cobre), pero de igual volumen, todos experimentan la misma fuerza de empuje. Esto se puede describir en las ecuaciones presentadas a continuación:

$$E = F_b = \gamma_f \cdot V_S \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

$$\begin{aligned} F_b &= \text{Fuerza de flotación} \\ E &= \text{Fuerza de Empuje} \\ \gamma_f &= \text{Peso específico del fluido} \\ V_S &= \text{Volumen desplazado del fluido} \end{aligned}$$

$$\gamma_f = \rho_f \cdot g \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

$$\rho_f = \text{Densidad del fluido}$$

$g$  = Gravedad

$$W_{cpo} = m_{cpo} \cdot g \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

$W_{cpo}$  = Peso del cuerpo

$m_{cpo}$  = Masa del cuerpo

También es correcto utilizar la siguiente ecuación.

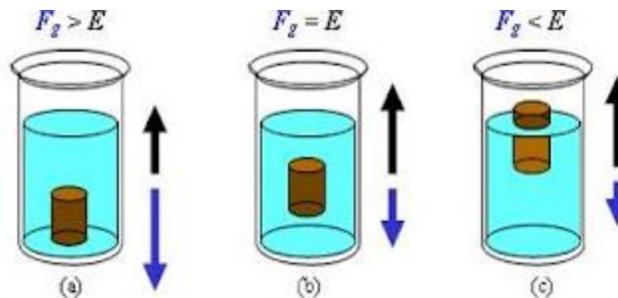
$$E = F_b = \gamma_f \cdot V_{scpo} = \rho_f \cdot g \cdot V_{scpo} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$V_{scpo}$  = Volumen de agua desplazado del cuerpo

Ya en conocimiento de lo que es la fuerza de flotación, es posible establecer que para que un objeto flote o se hunda en un fluido dependerá de cómo se relacione la fuerza de empuje con el peso del objeto. Con esto es posible desglosar los 3 casos específicos que se pueden encontrar en la realidad según Arquímedes, estos se describen a continuación y se representan de igual forma en la figura 10.

- Si el objeto a estudiar tiene un peso menor a la fuerza de flotación ( $W < F_b$ ) este tendera a flotar.
- Si el objeto tiene un peso mayor a la fuerza de flotación ( $W > F_b$ ) este tendera a hundirse.
- Cuando el objeto tiene un peso igual a la fuerza de flotación o empuje ( $W = F_b$ ) se dice que tiene una flotabilidad neutra independiente de lo sumergido que esté el fluido.



**Figura 10: Ejemplo de flotabilidad Arquímedes [Fuente: [6]]**

Por lo tanto, con esto en comprensión es posible indicar que el peso de las boyas debe ser menor a la fuerza empuje ( $W < F_b$ ), ya que así se mantendrá a flote en la superficie. Aunque, en las boyas, además de lograr que flote es necesario mantenerlo estable, es por esto por lo que más adelante se tendrá en consideración la opción de flotación neutra el caso en donde  $W = F_b$ .

También es posible analizarlo con respecto a las densidades, ya que desde los tiempos de Arquímedes se sabe que, si un cuerpo con menor densidad a la del fluido flotará, como se indica en la siguiente ecuación.

$$\rho_{cpo} < \rho_f \quad \text{Ec. 5}$$

Tan solo hay que tener en consideración que cuando se trata de distintos materiales, la densidad del cuerpo será igual a:

$$\rho_{cpo} = \frac{\rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2 + \rho_3 \cdot V_3 + \dots + \rho_n \cdot V_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde

- $\rho_{cpo}$  = Densidad del cuerpo sumergido
- $V_n$  = Volumen sumergido del material n
- $\rho_n$  = Densidad del material n sumergido

En resumen, es posible indicar que un cuerpo flota si la densidad del fluido es mayor a la del cuerpo, o también según Arquímedes, este flotará si el peso del cuerpo es menor a la fuerza de empuje generada o, dicho de otra manera, si el volumen de fluido desplazado es menor o igual al volumen del objeto sumergido.

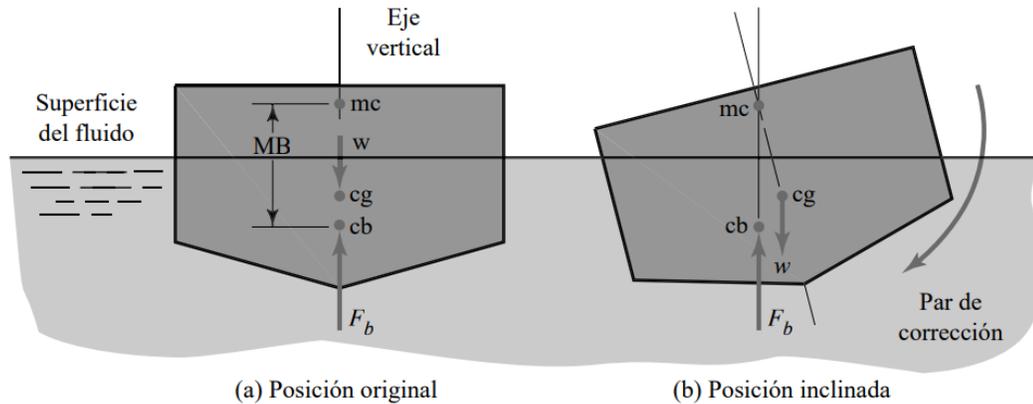
### 2.3.2 Estabilidad

La estabilidad de las boyas en el fluido es de suma importancia, esta se considera estable cuando después de una pequeña rotación con respecto a su eje horizontal vuelve a su posición original. Pero según el libro de mecánica de fluidos [2] existen 2 condiciones de estabilidad, las cuales son

1. Condición de estabilidad para cuerpos sumergidos: Esta indica que una condición necesaria para que un cuerpo completamente sumergido en un fluido sea estable es que su centro de gravedad esté por debajo del centro de flotabilidad F (Descrita en glosario).
2. Condición de estabilidad para los cuerpos flotantes: contrario a lo anterior, esta condición ocurre cuando el centro de gravedad del cuerpo flotante está por debajo del metacentro (Descrita en glosario).

Como las boyas son cuerpos flotantes, este informe se centrará en la segunda condición, la cual es “estabilidad para los cuerpos flotantes”. Para más información de estabilidad se sugiere dirigirse a la bibliografía presentada [2].

Según lo mencionado previamente, las condiciones para la flotación de objetos varían de la situación convencional. Esto se refleja en la Figura 11 (Parte a), que muestra un corte transversal de una barcaza con el centro de gravedad (cg) sobre el centro de flotación (cb), y una línea vertical (línea de crujía,  $\phi$ ) que conecta ambos centros. En la Parte b, se ve cómo una ligera rotación cambia la posición del centro de flotación debido a modificaciones en la geometría del volumen desplazado. Los cambios entre la fuerza de flotación y el peso generan un par correctivo que restituye la posición original, mostrando estabilidad.



**Figura 11: Metacentro [2].**

El metacentro (m) es crucial para evaluar la estabilidad. La distancia entre el metacentro y el centro de calado (distancia metacéntrica, MC) se utiliza para analizarla. Esta distancia se calcula mediante:

$$MC = \frac{I}{V_d} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

- $MC$  = Distancia desde el centro de calado al metacentro  
 $V_d$  = Volumen sumergido objeto  
 $I$  = Es el mayor momento de inercia de una sección horizontal del cuerpo tomado en la superficie del fluido (en este proyecto sería el flotador)

La estabilidad se establece cuando la distancias MC ubica al metacentro (m) sobre el centro de gravedad (G) y el centro de flotación, en caso contrario la boya tendera a volcarse por las inercias del cuerpo y las fuerzas externas.

### 2.3.3 Materiales de las boyas.

Las boyas pueden ser construidas con diferentes materiales, como plástico, madera, acero, aluminio y hormigón. La selección del material depende de varios factores, como la ubicación de la boya, la durabilidad requerida y el costo.

Normalmente, se realiza combinación de materiales debido a:

1. Diseño de la forma y dimensiones de la boya: la forma y las dimensiones de la boya son importantes para determinar su estabilidad en el agua y su capacidad para soportar las condiciones climáticas extremas. Las boyas pueden ser de diferentes formas, como cilíndricas, esféricas o cónicas, y su tamaño depende del propósito para el que se está construyendo.
2. Relación entre el diseño de la boya y su estabilidad en el agua: El diseño de la boya es relevante para la estabilidad en el agua. Como se mencionó en el punto anterior, las boyas deben

diseñarse de manera que su centro de gravedad esté por debajo de su centro de flotación para garantizar que sean estables en el agua y no se vuelquen.

3. Resistencia al impacto y la corrosión: las boyas deben ser diseñadas para resistir el impacto de las olas y la corrosión del agua salada.

En resumen, el diseño y la construcción de boyas requiere la aplicación de varios principios de ingeniería, como la selección de materiales adecuados, el diseño de la forma y dimensiones de la boya, y la relación entre la forma de la boya y su estabilidad en el agua. Al aplicar estos principios, se pueden construir boyas duraderas y efectivas que cumplan con su propósito de manera efectiva.

## **2.4 Sistema de anclaje**

El propósito de un sistema de anclaje es proporcionar una conexión flexible entre una boya y un punto de anclaje fijo en el fondo de una fuente de agua. La flexibilidad de esta conexión permite absorber y disipar las fuerzas que actúan sobre la boya debido al movimiento del agua, especialmente las fuerzas causadas por las olas. Además, de asegurar que la boya no se desplace del área de investigación establecida por tormentas u oleajes de gran intensidad. [6]

Un sistema de anclaje está compuesto por tres componentes diferentes:

- Punto de anclaje: peso muerto que estará en el fondo marino.
- Línea de anclaje: cable o cadena que unirá la boya con el punto de anclaje.
- Conectores: accesorios que ayudan a la unión.

El estudio del sistema de anclaje varía bastante dependiendo de la profundidad de instalación de la boya oceanográfica además de las condiciones climáticas, es por esta razón que se analizara más adelante el largo de la cadena y el sistema de anclaje de la boya. [1]

## **2.5 Consideraciones ambientales**

En el diseño de una boya, si bien no existe reglamentación directa de las consideraciones ambientales a considerar, es importante tener en cuenta los distintos aspectos que pueden minimizar su impacto ambiental. Algunas de estas consideraciones incluyen:

- Selección de materiales sostenibles: es de gran importancia utilizar materiales duraderos y resistentes a la corrosión, pero también sostenibles y amigables con el medioambiente, como acero inoxidable y plásticos reciclables.
- Minimización de la emisión de gases de efecto invernadero: Esto puede lograrse mediante el uso de fuentes de energía renovable, como paneles solares o turbinas eólicas.
- Prevención de la contaminación marina: Es posible lograrse mediante el empleo de materiales no tóxicos y la eliminación adecuada de cualquier residuo o sustancia química utilizada en el proceso de fabricación o mantenimiento.

- Protección de la vida marina: las boyas deben ser diseñadas para minimizar cualquier impacto negativo en la vida marina, evitando la interferencia con las rutas de migración de los animales marinos y reduciendo la exposición de la vida marina a cualquier sustancia tóxica.

Es de suma importancia para este proyecto tener en consideración estos aspectos, sobre todo la contaminación del agua porque, además de afectar el medioambiente, afectaría a las mediciones propias de las boyas, como contaminación del agua, toxicidad, etc.

## 2.6 Normativas y regulaciones:

Las boyas oceanográficas son dispositivos que se utilizan en el mar para realizar mediciones y estudios de las condiciones oceanográficas, por lo que también están sujetas a regulaciones y normativas marítimas. Estas normativas son establecidas por la International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities IALA.

Existen múltiples indicaciones para los distintos tipos de boyas que se mencionaron anteriormente, pero en el caso de las boyas oceanográficas solo hay indicaciones de balizamiento marítimo porque su función no es dar indicaciones de posición u otros, por lo que según IALA se posiciona como “Marcas especiales”, lo que se define como según IALA como “Marcas que indican zonas o configuraciones especiales cuya naturaleza se visualiza al consultar la carta u otra publicación náutica. Por lo general no están destinadas a señalar canales u obstrucciones donde existen otras marcas más adecuadas para ello”

Las indicaciones se pueden encontrar en la siguiente tabla, además se ilustra una figura de muestra.

**Tabla 2: Indicaciones de balizamiento IALA.**

	<b>Descripción</b>
Color de la boya	Amarillo
Forma de la boya	Cualquiera menos las reservadas a las Cardinales, Peligro aislado o Aguas Seguras.
Marca de tope	Un aspa amarilla con forma de X
Luz	Sí tiene
Color de la Luz	Amarillo
Ritmo de la luz	Cualquiera
Pictograma	Sí puede tener con previa autorización de la autoridad marítima de cada país

Además, los brazos de la X deben representar las diagonales de un cuadrado cuyo lado sea igual, aproximadamente, al 33 % del diámetro de la boya en su línea de flotación, como se presenta en la figura 12. En el caso de una baliza, los brazos de la X deberán representar las diagonales de un cuadrado de lado lo más grande posible. La anchura de los brazos debe ser aproximadamente igual al 15 % del lado del cuadrado



**Figura 12: Ejemplo marcas especiales [4].**

En Chile, se rigen por las indicaciones presentadas por IALA, aun así, sus representantes marítimos son La Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante DIRECTMAR.

## CAPÍTULO 3: Estado del Arte

### 3.1 Introducción

El diseño de vanguardia de las boyas oceanográficas es un campo en constante evolución, con varios avances tecnológicos e innovaciones que se realizan para mejorar sus capacidades de monitoreo. Uno de los puntos importantes es la mejora de la estabilidad y sus puntos de anclaje, ya que ayuda a la precisión de las mediciones [5]. Por otro lado, la flotabilidad también juega un papel fundamental. Aumentar la capacidad de carga de una boya podría expandir las opciones para instalar dispositivos adicionales. No obstante, si la seguridad de estos dispositivos no está asegurada, su utilidad no será confiable.

Actualmente, se están utilizando boyas de elastómeros y que en su interior contiene espuma de poliuretano de cédula cerrada, lo que hace que se convierta en una boya prácticamente insumergible debido a su baja densidad y, por lo tanto, al bajo peso que tienen. A lo largo del proyecto se analizará el posible uso de este tipo de materiales.

### 3.2 Comparativas

A continuación, se presentarán las características principales de distintos modelos de boyas para así entender cuáles son las capacidades de cada una dependiendo de los distintos materiales. Todas las boyas oceanográficas presentadas se pueden comprar desde Chile, pero, aun así, son exportadas del extranjero, además no todas arrojan datos comparativos a excepción de las primeras 2 presentadas.

#### 3.2.1 boya SKUA de OSIL

Esta boya tiene las siguientes características:

**Tabla 3: Especificaciones boya SKUA**

Diámetro	2.6	m
Flotabilidad	5700	Kg
Reserva de flotabilidad	3300	Kg
Masa	2400	Kg
Plano focal	4	m
Peso de lastre	400	Kg
Material flotador	Polietileno	Sin relleno
Acero utilizado	Acero galvanizado	
Tipo de diseño	Modular	
Sistema de alimentación	Paneles solares 70 W	
Estabilidad y anclaje	No indica	



### 3.2.2 boya Fulmar de OSIL

La boya fulmar tiene las siguientes características:

**Tabla 4: Especificaciones boya FULMAR**

Diámetro	1.9	m
Flotabilidad	2000	Kg
Reserva de flotabilidad	1000	Kg
Masa	960	Kg
Plano focal	2.4	m
Peso de lastre	240	Kg
Material flotador	Polietileno	Sin relleno
Acero utilizado	Acero galvanizado	
Tipo de diseño	Modular	
Sistema de alimentación	Paneles solares 70 W	
Estabilidad y anclaje	No indica	
Valor comercial estructura con aduana y transporte	63000	USD



### 3.2.3 FLC1800 Marca especial

Esta boya extranjera tiene las siguientes características

**Tabla 5: Especificaciones boya FLC1800.**

Diámetro	1.8	m
Flotabilidad	No indica	Kg
Reserva de flotabilidad	No indica	Kg
Masa	432	Kg
Plano focal	2710	m
Peso de lastre	432	Kg
Material flotador	Poliuretano 40 kg/m <sup>3</sup>	
Acero utilizado	Acero galvanizado s235	
Tipo de diseño	Modular	
Sistema de alimentación	No indica	
Estabilidad y anclaje	No indica	



Como primera impresión es posible ver el gran cambio que genera el diámetro de la boya, tanto en peso como reservas de seguridad de flotación. Estos puntos son de suma importancia a tener en consideración porque el exceso de peso y tamaño generaría problemas de traslado. Por otra parte, el

uso de materiales que son fácil de corroer, como el acero galvanizado, es un punto importante para considerar, ya que afecta demasiado al mantenimiento constante de estos dispositivos y además de la contaminación que generan al ambiente.

Uno de los grandes problemas que se generan al hacer estudios comparativos con otras boyas es encontrar características técnicas, es por esta razón que tan solo se pudieron encontrar 2 boyas con datos técnicos para comparar y se decidió dejar solo 3 de muestra.

## **CAPÍTULO 4: Selección de materiales.**

### **4.1 Introducción.**

Como se mencionó en el Capítulo 2, las boyas pueden realizarse con distintos materiales, desde madera hasta aceros, esto dependerá de factores estructurales que se requieran para el diseño como la resistencia a la corrosión, la resistencia a fuerzas externas, flotabilidad, etc. Aunque, uno de los puntos más importantes tomado para el desarrollo de esta boya oceanográfica es la factibilidad de los componentes y el desarrollo tecnológico en Chile.

Un ejemplo claro de lo anterior es uno de los materiales más utilizados en boyas oceanográficas por las condiciones físicas y químicas que tiene, este es el HDPE o polietileno de alta densidad, el cual cumple en gran escala con las densidades necesarias, la resistencia a la corrosión y la resistencias a fuerzas externas, pero debido a que este material se trabaja mediante inyección de aire y es necesario tener un molde para trabajarlo es difícil encontrar un proveedor que lo realice, por esta razón se descarta para este proyecto no así para las futuras mejoras.

### **4.2 Material para flotador.**

El flotador de una boya es la parte más importante del cuerpo flotante debido al aporte que realiza a la flotabilidad de la boya por ser el componente con más volumen, además de ser uno de los componentes expuestos a golpes y fuerzas externas, por esta razón es necesario encontrar el material que se adecue a las necesidades de este proyecto.

Para el análisis que se realiza mediante el software CES EduPack [6] es necesario generar las siguientes restricciones:

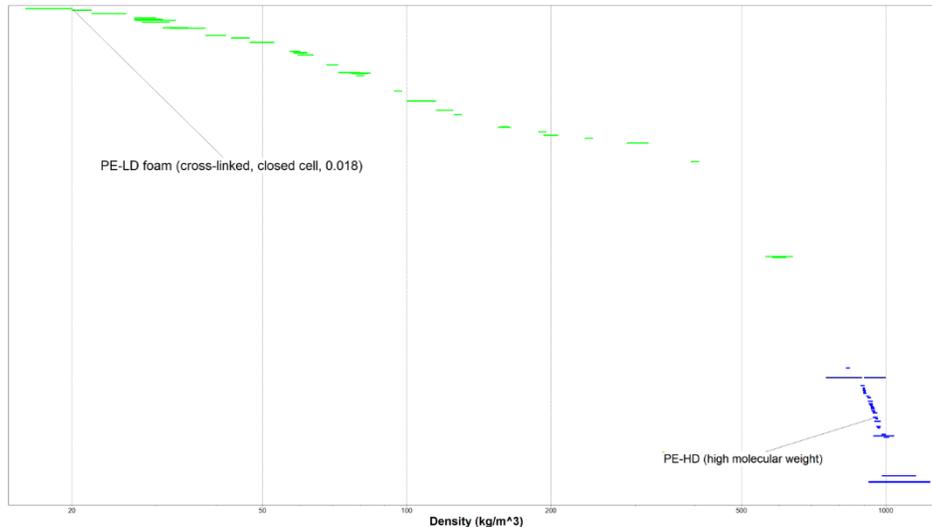
1. El material del flotador tiene que ser adecuado para agua salada y no debe aumentar el costo de mantenimiento

Para este criterio, según el software pueden servir distintos materiales, como aceros, espumas y plásticos.

2. No debe superar la densidad del agua.

Gracias a este criterio es posible descartar el acero debido a que una de las condiciones fundamentales para la boya es generar componentes que se puedan desplazar con cierta facilidad, es por esto por lo que el acero se descarta para material del flotador, que, aunque se pueda utilizar su densidad promedio se encuentra alrededor de los  $8000 \text{ kg/m}^3$  lo que aumentaría demasiado el peso del flotador por ser el componente con mayor volumen.

Aplicando restricciones es posible encontrar materiales con bajas densidades que no sean metales, por lo que aún hay una amplia gama de elementos como se muestra en la figura 13 de la cual no todos son adecuados para el proyecto.



**Figura 13: Gama de elementos con densidad inferior a la del mar [Fuente propia] [6].**

3. Debe resistir la radiación solar (UV)

Como se mencionó en el capítulo de marco teórico, un material con buena resistencia a la radiación solar es más confiable en el tiempo que otros materiales con poca resistencia, por lo que se buscan materiales con una resistencia media o superior. Con este criterio se reduce de gran manera la búsqueda de material a tan solo 36 materiales, estos materiales en su mayoría son plásticos y espumas.

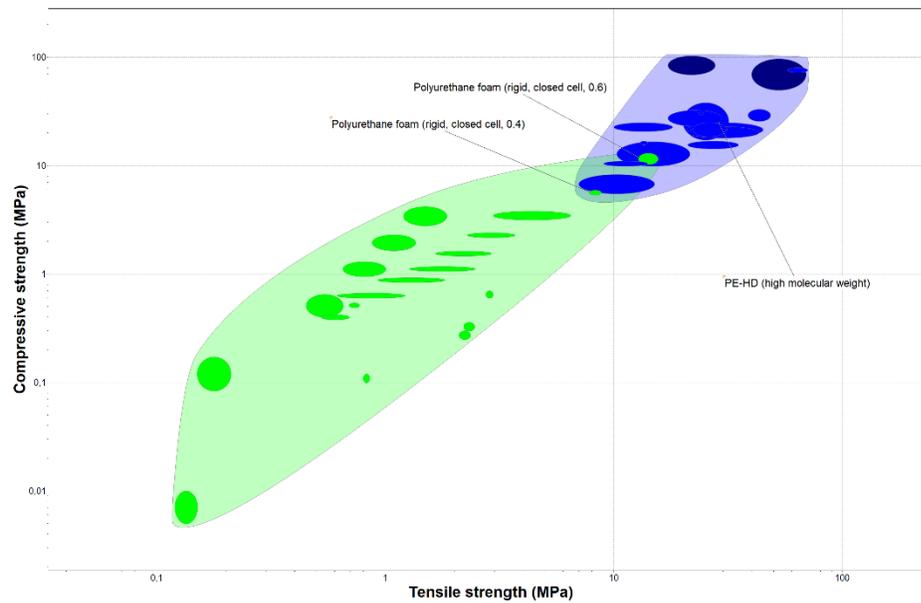
4. Debe tener disponibilidad en la zona.

Se realiza una búsqueda exhaustiva de disponibilidad de material, por lo que los materiales que se pueden encontrar en la zona y que se venden en el país son:

- Espuma de poliuretano de celda cerrada (distintos porcentajes): La espuma de poliuretano de celda cerrada se caracteriza por tener pequeñas celdas interconectadas que están selladas, lo que evita de gran manera la absorción de agua y garantiza la flotabilidad a largo plazo. Esto significa que el flotador mantendrá su capacidad de soportar peso incluso en condiciones de humedad o exposición al agua.
- Polietileno de alta densidad (HDPE): El HDPE es un material cotidiano que se puede encontrar en la fabricación de botellas, kayak, estanques de agua, etc. Se caracteriza por su gran ligereza, su flexibilidad y su alta resistencia a los impactos.

5. Comparación de resistencia a la compresión y a la tracción.

En la siguiente gráfica se puede apreciar la diferencia que tienen los materiales de espumas (Verdes) y de plásticos (Azul) con respecto a la resistencia a la compresión y la tracción.

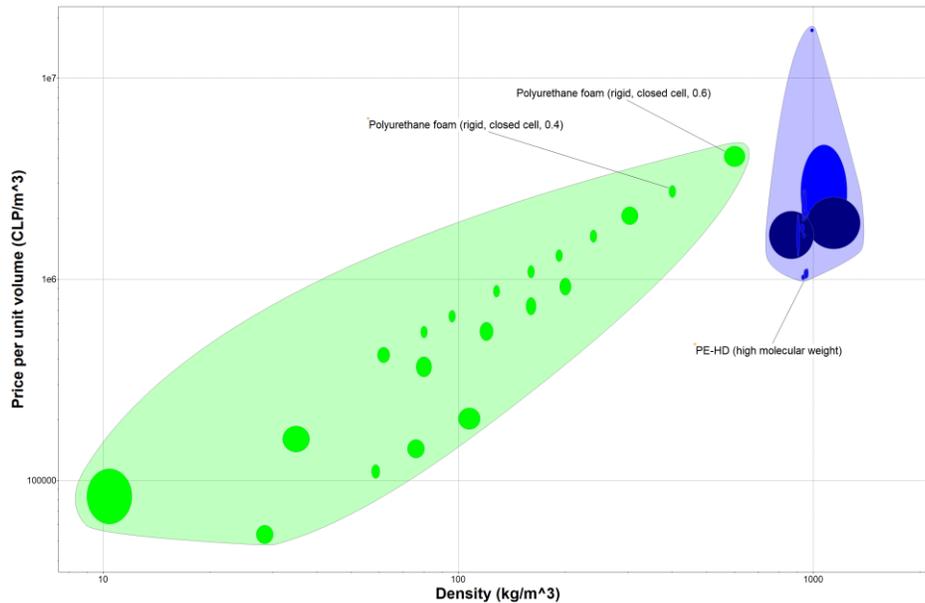


**Figura 14: Comparación de resistencia a la compresión y a la tracción [Fuente propia] [9].**

Se puede apreciar directamente que los plásticos tienen mejores propiedades mecánicas. Además, se mencionan directamente dentro del gráfico los materiales disponibles en la zona. La cual son:

- Espuma de poliuretano de celda cerrada al 40% o 60%.
  - HDPE
6. Se tiene que poder trabajar con el material y no debe elevar costo de mantenimiento o fabricación en caso de cambio.

Aunque exista disponibilidad de material, los plásticos dependen mucho del método de fabricación ya que se deben realizar moldes específicos para realizarle el proceso de inyección de aire, por lo que el valor de manufactura se eleva demasiado, es por esta razón que el material disponible y con más factibilidad de trabajo es la espuma de poliuretano puesto que necesita solo de un molde artesanal de madera u acero. Además, como se observa en la siguiente figura el poliuretano de celda cerrada de 40% aunque sea más costoso por  $m^3$  que el HDPE el costo de fabricación es mucho más económico.



**Figura 15: Gráfica comparativa de precio [kg/m<sup>3</sup>] vs densidad [kg/m<sup>3</sup>] [Fuente propia] [9].**

Por lo tanto, el material utilizado para este proyecto es la espuma de poliuretano de celda cerrada de 40%, debido a su bajo costo, a la disponibilidad y a que es un material ligero con una densidad que varía de los 390 kg/m<sup>3</sup> a los 400 kg/m<sup>3</sup>, lo que lo convierte en la opción ideal para este tipo de aplicaciones.

También, una de las ventajas de utilizar espuma de poliuretano de celda cerrada es su alta resistencia a la compresión, la cual puede variar desde los 5.38 Mpa hasta sobre los 5.95 Mpa según la densidad del producto empleado [10]. Esto garantiza que el flotador pueda soportar cargas y mantener su forma estructural incluso bajo presión. Además, la espuma de poliuretano tiene una excelente resistencia química, lo que la hace adecuada para su uso en entornos marinos, donde estará expuesta a diferentes agentes corrosivos.

En resumen, la espuma de poliuretano de celda cerrada es un material adecuado para la construcción de flotadores debido a su ligereza, resistencia, capacidad de flotación y resistencia química.

#### **4.3 Material para estructura superior e inferior al flotador.**

Para este estudio se usa el mismo método de selección que el punto anterior, pero dirigiéndose directamente a los aceros, esto debido a la factibilidad y disponibilidad del material.

Normalmente, para diseño de barcos, boyas o cuerpos que estén constantemente en contacto con el agua se utilizan aceros reforzados químicamente para la corrosión. Actualmente, en Chile, se emplean 3 tipos de acero; acero galvanizado, acero inoxidable 304 y acero inoxidable 316L o 316 debido a la disponibilidad inmediata que tienen y a los precios que se encuentran en el país.

El acero galvanizado que está recubierto de níquel se usa a menudo en aplicaciones marinas ligeras debido a su bajo costo y buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos. Sin embargo, el acero

galvanizado no es tan resistente a la corrosión como el acero inoxidable, es por esta razón que es descartado, aun así, es comparado.

Antes de la elección del acero inoxidable a utilizar es necesario saber que los aceros inoxidables tienen 4 principales fallas por corrosión, las cuales son:

- a) Corrosión por hendidura: Ocurre cuando existen grietas en el material que están en contacto directo con el fluido.
- b) Corrosión galvánica o corrosión bimetalica, esta ocurre cuando se utilizan directamente 2 materiales distintos, por ejemplo, acero inoxidable y acero dulce, esta genera una corrosión abrasiva como se observa en la Figura 16



**Figura 16: Corrosión bimetalica [8].**

- c) Corrosión intergranular: se produce cuando el calor generado por la soldadura de las partes cambia las propiedades químicas de la misma dejándola expuesta. Normalmente, ocurre por el alto nivel de carbono del acero inoxidable.
- d) Corrosión por picaduras: Es una forma de corrosión extremadamente localizada que conduce a la creación de pequeños agujeros en el metal, como se observa en la Figura 17.



**Figura 17: Corrosión por picadura [8].**

Es por esto por lo que el acero inoxidable tiene un factor llamado Número equivalente de Resistencia a Picaduras (PREN) el cual mediante la comparación de porcentaje del cromo, molibdeno y nitrógeno existentes en el material es posible comparar la resistencia de tipos de acero contra la corrosión por picaduras. Cuanto mayor sea el número, mejor es la resistencia, siendo un valor de 32 el mínimo para que la aleación se considere estable y tenga una larga durabilidad en el ambiente marino con una exposición directa y continua en el tiempo [8], los valores mayores a 32 son utilizados normalmente en explotaciones petrolíferas en alta mar o en las palas (aspas) de una hélice de barco ya que en teoría permanecerán años sumergidos en agua marina.

Puesto a la investigación de mercado de la disponibilidad de aceros inoxidable, solo se tomará en el estudio los acero 316, 316L y 304, por lo que a continuación, se puede apreciar en la Tabla 6 una comparativa de las propiedades principales de los aceros a estudiar para la boya a desarrollar.

**Tabla 6: Comparación físicas, químicas y financieras de aceros. [12] [9]**

<b>Propiedad</b>	<b>Ac. Inox. 304</b>	<b>Ac. Inox. 316</b>	<b>Ac. Inox. 316L</b>	<b>Ac. Galvanizado</b>
Carbono C	≤ 0.03%	≤ 0.08%	≤ 0.03%	Hierro con zinc
Cromo (Cr)	18-20%	16-18%	16-18%	-
Níquel (Ni)	8-10.5%	10-14%	10-14%	-
Molibdeno (Mo)	-	2-3%	2-3%	-
Resistencia a la tracción [Mpa]	515	515	485	Variable
Limite elástico [MPa]	205	205	170	Variable
Dureza HRB	88	85	85	Variable
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	8000	8000	8000	Variable
Resistencia a la corrosión	Alta	Alta	Alta	Media
PREN [6]	18 - 20	22.6 – 27.9	22.6 – 27.9	-
Valor [USD/Kg]	1.8 – 2.5	2.2 - 3	2.5 – 3.5	1 – 1.5

Ya en conocimiento de lo anterior es posible indicar que el acero inoxidable 304 es una opción popular y común para aplicaciones marinas que no requieren una resistencia a la corrosión. En cambio, el acero inoxidable 316L o 316 es la mejor opción para aplicaciones marinas que requieren una mayor resistencia a la corrosión y la oxidación.

Debido a su alto contenido de níquel, cromo y molibdeno, el acero inoxidable 316 y 316 L es adecuado para boyas y otras aplicaciones que requieren un mayor tiempo en el agua y, por lo tanto, una mayor resistencia a la corrosión y la oxidación [13]

Además, es posible apreciar en la Tabla 6 que las diferencias entre el acero 316 y el 316L no varían demasiado, pero la propiedad que hace preferir el acero 316L sobre el 316 en muchas aplicaciones es su mayor resistencia a la corrosión intergranular. Ya que, el bajo contenido de carbono en el acero

316L ayuda a prevenir la formación de carburos de cromo en los límites de grano durante el proceso de soldadura, lo que reduce la susceptibilidad a la corrosión intergranular.

Otro punto intrigante en la comparativa de materiales es el PREN de los aceros, puesto que como se puede observar están por debajo del mínimo antes mencionado, pero según Metalpedia [11] tener un PREN bajo el mínimo no indica que no va a resistir el ambiente marino, tan solo que, es necesario realizarle mantenimiento con frecuencia si su exposición es directa sin recubrimientos de protección a la corrosión.

En general, el acero inoxidable 316L es la mejor opción para estas aplicaciones marinas que requieren una mayor resistencia a la corrosión y la oxidación, además, aunque las propiedades mecánicas de los otros aceros sean mayores que la del 316L, se prioriza corrosión y oxidación, por lo que el material escogido para la estructura es acero ASTM 316L.

Toda la información técnica de estos materiales junto con material gráfico comparativo se puede observar en el anexo 4.

#### **4.4 Recubrimientos.**

La selección de la mejor pintura o recubrimiento para la estructura de una boya debe tener en cuenta tanto el rendimiento técnico como las consideraciones ambientales. Estas consideraciones se pueden apreciar desglosados a continuación:

- La pintura utilizada en la estructura de una boya debe ser resistente al agua salada para proteger eficazmente el material de la corrosión. Es por esto por lo que se recomienda utilizar pinturas marinas diseñadas específicamente para aplicaciones marítimas, ya que están formuladas para resistir la exposición a la sal, la humedad y los elementos marinos vivos (fouling).
- Pintura anticorrosiva: Otro punto importante para antes de la aplicación de pintura final de la boya es la pintura anticorrosiva, debido a que protege el metal o material base de la estructura. Este debe formar una barrera protectora que impida la oxidación y la corrosión causadas por la exposición continua al agua salada.
- Resistencia a la abrasión: Dado que las boyas están sujetas a movimientos del agua, oleaje y posibles impactos de objetos flotantes, es relevante que la pintura sea resistente a la abrasión. Debe ser capaz de soportar el desgaste causado por el contacto repetido con el agua y otros elementos en movimiento, sin deteriorarse ni desprenderse fácilmente.
- Protección UV: La exposición constante a la radiación ultravioleta del sol puede dañar la pintura y provocar decoloración y deterioro prematuro. Por esta razón se recomienda utilizar pinturas que ofrezcan protección UV para mantener la apariencia estética de la boya y prolongar su vida útil.
- Consideraciones ambientales: Al seleccionar una pintura, es importante considerar su toxicidad y biocompatibilidad para evitar dañar organismos marinos y el medioambiente

acuático. También se debe priorizar la sostenibilidad, optando por pinturas respetuosas con el medioambiente y que cumplan con estándares de sostenibilidad.

Son por estas consideraciones que la mejor pintura a aplicar en la boya son los recubrimientos epóxicos y la pintura anti-fouling ya que tienen un alto nivel de adherencia, dureza, flexibilidad y resistencia química. Para distintas superficies expuestas de forma constante al mar.

La pintura epóxica es la capa que se aplica en la obra muerta de la boya, en cambio, el antifouling es la pintura que se aplica como acabado final en la obra viva del cuerpo flotante, ya que es un químico que libera biocidas para mantener el casco libre de flora y fauna marina.

#### **4.5 Sistemas de seguridad anticorrosivos**

Uno de los sistemas utilizados para la seguridad anticorrosiva aparte de lo antes mencionado son los ánodos de sacrificio, estos son utilizados como sistemas de protección catódica para prevenir la corrosión de las estructuras metálicas sumergidas, enterradas o cuando existe unión de 2 metales distintos (corrosión galvánica), como tuberías, barcos y tanques de almacenamiento como se presenta en la Figura 18. Estos están hechos de metales más activos, como el zinc, el magnesio o el aluminio, que son más fácilmente corroídos que el metal de la estructura protegida. La función principal de los ánodos de sacrificio es atraer la corrosión hacia sí mismos, evitando que la estructura protegida se corra. A medida que el ánodo se corroe, se sacrifica para proteger al metal de la estructura. Es necesario reemplazar periódicamente los ánodos de sacrificio agotados para mantener una protección efectiva contra la corrosión.



**Figura 18: ánodos de sacrificio oxidado [14].**

#### **4.6 Resumen estudio de materiales.**

En resumen, los materiales escogidos para el diseño son los siguientes.

1. Estructuras metálicas: Para toda estructura metálica se utilizará acero A-316L por las propiedades ya mencionadas y por el estudio de disponibilidad del mercado.
2. Flotador: Se empleará espuma de poliuretano de celda cerrada con una densidad promedio que será mencionada más adelante, además se debe tener en consideración la creación de un molde para el flotador definitivo por lo que se utilizará un acero estándar como el ASTM A-36.
3. Recubrimiento: Como primera capa para la estructura metálica de la boya se optará por un anticorrosivo para después aplicar en la obra viva el antifouling y en la obra muerta la pintura epóxica. Por otra parte, el flotador se dividirá en 2 secciones para aplicar estos 2 tipos de recubrimiento.
4. Protecciones: como protección adicional se agregarán ánodos de sacrificio en puntos específicos de la estructura.

## **CAPÍTULO 5: Desarrollo teórico de flotabilidad y estabilidad.**

En este capítulo se planteará todo el proceso del diseño de la boya oceanográfica. Se presentará directamente el diseño definitivo de la boya oceanográfica con sus respectivos cálculos de flotabilidad, estabilidad, contrapesos y sistema de amarre, por lo que no se presentarán los cálculos o iteraciones de los distintos prototipos realizados, ya que los cálculos de la mayoría de los diseños realizados no aportarán a los resultados finales.

### **5.1 Consideraciones de diseño**

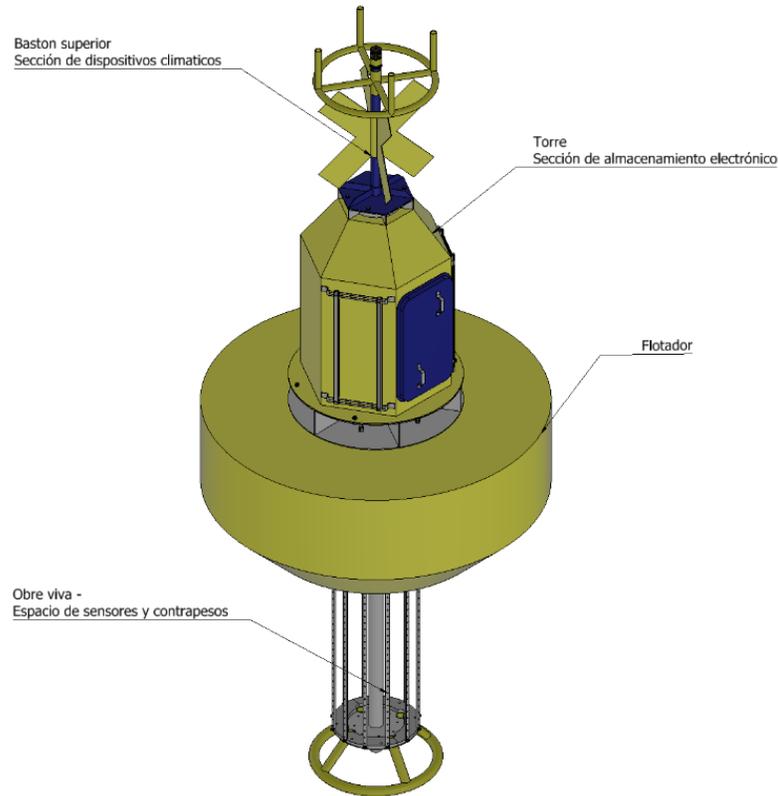
Las consideraciones de diseño de la boya oceanográfica y que son solicitados por el COPAS son los siguientes:

1. Económico: El costo de construcción debe ser menor a la compra de una boya en una empresa externa.
2. Personalizable: La boya debe estar compuestas de múltiples conjuntos que se puedan ensamblar, desarmar y transportar fácilmente.
3. Seguridad: Pueda mantenerse a flote y estable con las condiciones climáticas y oceanográficas de la costa de la provincia de Concepción.
4. Durabilidad: Puede soportar la corrosión y el fouling por un largo periodo de tiempo (Normalmente se realizan mantenciones 2 veces al año), así se extenderían los periodos de manutención.
5. Debe contener el espacio mínimo para instalar o soportar los siguientes componentes.
  - a. Caja eléctrica de 600x600x300 mm
  - b. Mínimo 2 baterías para paneles
  - c. Paneles solares
  - d. Sensores climáticos
  - e. Sensores oceanográficos.

Cabe destacar que los sensores a utilizar se compran según las necesidades del momento, por lo que el centro COPAS solo tiene medidas por folleto. Con respecto al peso de los componentes, estos no son de relevancia ya que se deja un margen amplio de flotabilidad.

### **5.2 Propuesta de diseño**

En esta sección se presentará a grandes rasgos la propuesta de diseño (Figura 19) para así poder entender los cálculos y estudios que se mostrarán más adelante. De igual manera, en otro capítulo se mostrará a detalle los componentes de la boya diseñada. Las formas de cada una de estas partes se establecieron por las necesidades del centro oceanográfico COPAS lo que cumple con uno de los objetivos el cual sea personalizable y customizable.



**Figura 19: isométrico principal boya oceanográfica. [Fuente propia]**

Los puntos importantes para tener en consideración para los cálculos son las dimensiones principales de la boya como la torre, el flotador, la obra viva y el bastón superior. A continuación, se presentará una breve descripción de cada una de estas partes, como también se puede apreciar en la Figura 19.

- a) Torre: Sección principal de almacenamiento de componentes electrónicos o cajas eléctricas. Se encuentra sobre el flotador de la boya. Su forma hexagonal es escogida por las siguientes características:
- **Estabilidad estructural:** La forma hexagonal proporciona una estructura más estable en comparación con formas con menos lados, como un cuadrado o un triángulo. Los hexágonos son formas geométricas que distribuyen las cargas de manera uniforme a lo largo de sus lados, lo que brinda una mayor resistencia y estabilidad estructural. Esta estabilidad es esencial para soportar condiciones marítimas adversas, como olas, corrientes y vientos fuertes.
  - **Eficiencia en el espacio:** El diseño hexagonal permite un uso eficiente del espacio disponible sobre todo al poder instalar más paneles solares que un paralelepípedo. Se puede maximizar el área de superficie de la torre en relación con el espacio ocupado. Esto es particularmente relevante cuando se trata de optimizar la capacidad de carga y la visibilidad de la boya.

- b) Bastón superior: Sección que se ubica sobre la torre y que su función principal es tener la simbología de representación marítima y a la vez soportar sensores climáticos.
- c) Flotador: El flotador es el componente principal de la boya que hará todo el trabajo de soportar los pesos de la torre, la boya y otros.

Tiene una forma cilíndrica, pero la base es un cono truncado debido a concejos de diseño de la literatura, los beneficios que tiene son:

- Estabilidad: Esta forma proporciona una mayor estabilidad al reducir el área expuesta al viento, las olas o las corrientes. Esto hace que el flotador sea menos propenso a ser desplazado por fuerzas externas, lo que es especialmente beneficioso en condiciones de agua agitada.
  - Reducción de la resistencia hidrodinámica: Permite una menor resistencia al flujo de agua en comparación con otras formas. La forma cónica invertida permite que el agua fluya suavemente alrededor del flotador, lo que reduce la resistencia hidrodinámica y mejora la eficiencia de desplazamiento
  - Estética
- d) Obra viva o espacio de sensores: esta sección se encuentra por debajo del flotador, por lo tanto, es la que está en contacto directo con el agua, además, es la que almacena los dispositivos de medición acuática.

Esta boya tiene un puntal o altura de 4.5 m aproximadamente con un diámetro mayor de 1.8 m como se indica en la Figura 20. Además, las formas geométricas utilizadas son convencionales, lo que facilitara el cálculo más adelante. Por último, la boya es diseñada gracias al software INVENTOR de Autodesk, la cual es de gran ayuda para obtener valores físicos teóricos como la masa teórica que para este diseño es de 380 kg aproximadamente.

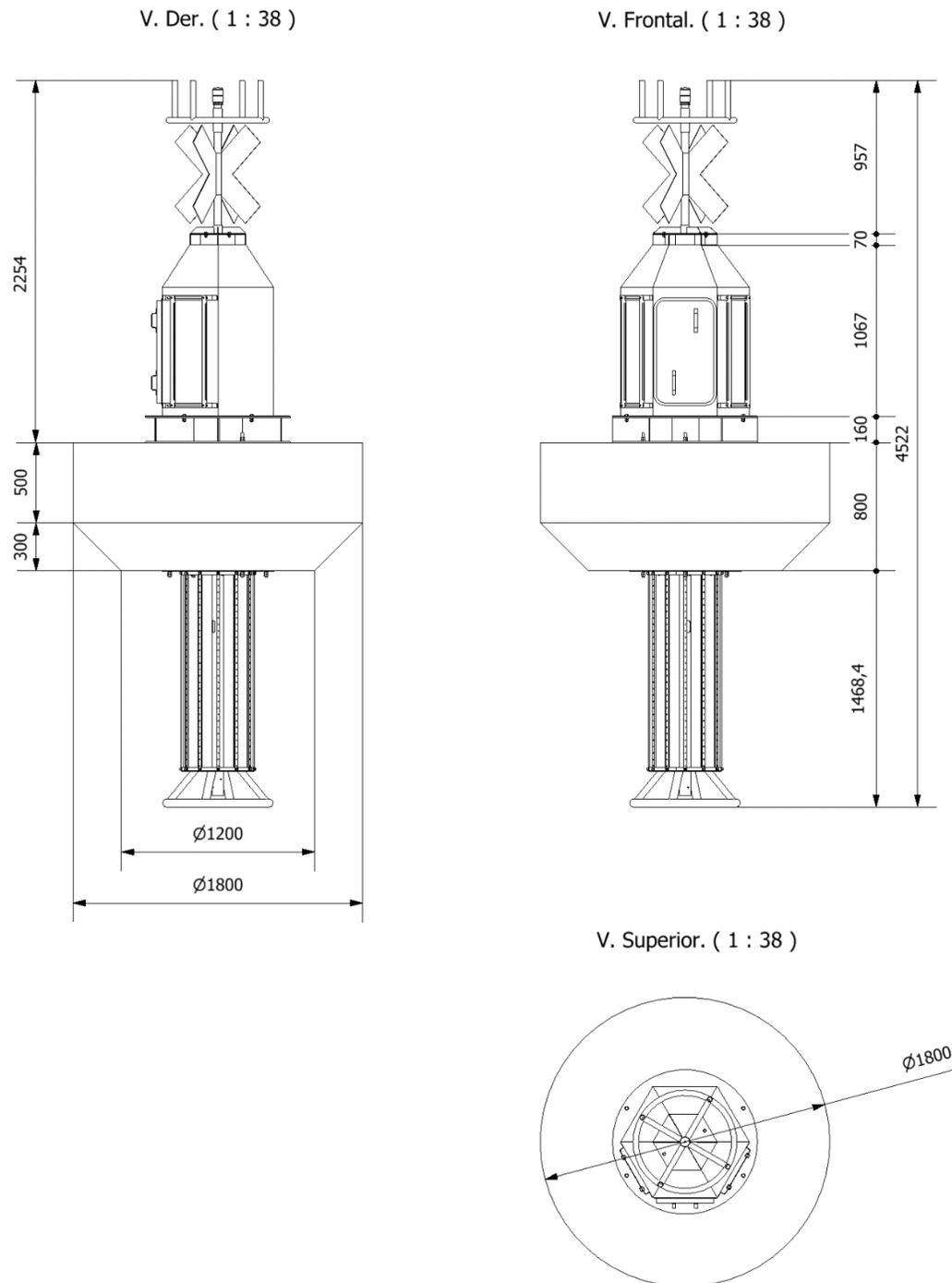


Figura 20: Medidas generales del diseño final de la boya oceanográfica en mm. [Fuente propia]

### 5.3 Estudio de flotabilidad

Para el estudio de la flotabilidad es necesario explicar el procedimiento, el cual se describe a continuación punto por punto.

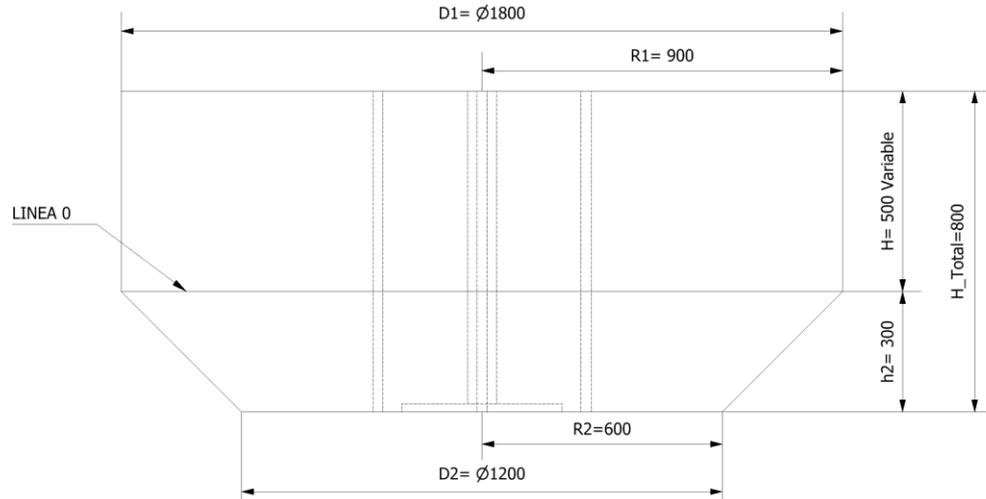
1. En primera instancia es necesario obtener el peso teórico de la boya oceanográfica. Esta se obtiene de forma teórica gracias al software de diseño Inventor. Este software indica que el peso teórico es de 376,35 kg aproximadamente.
2. Otro punto importante para tener en consideración es la densidad del flotador, el flotador que está formado por espuma de poliuretano con una densidad de 40 Kg/m<sup>3</sup> indica directamente que aportará a la flotabilidad del objeto ya que la densidad es más baja que la densidad del mar. Pero, lo que no se sabe es cuanto flotará, es por esto por lo que se pasa a los siguientes puntos.
3. En la ecuación número 4 mencionada anteriormente, se indica que la fuerza de flotación es igual a la densidad del fluido por el volumen del cuerpo sumergido.

$$E = F_b = \gamma_f \cdot V_{scpo} = \rho_f \cdot g \cdot V_{scpo}$$

4. También Arquímedes estableció que un cuerpo tiene flotabilidad neutra cuando el peso del objeto es igual a la fuerza flotación  $W = F_b$ , y tenderá a flotar cuando el peso es menor a la fuerza de flotación ( $W < F_b$ ).
5. Para encontrar el valor de la fuerza de flotación es necesario encontrar la ecuación del volumen que dependa de la altura, este volumen estará conformado por la estructura metálica inferior (Obra viva) la cual es de 0.01 m<sup>3</sup> y se asume que la estructura estará completamente sumergida, en cambio, el flotador tenderá a variar el volumen sumergido en el agua y, por lo tanto, su altura (H).

Además, por lo mencionado anteriormente las geometrías que ayudaran a la obtención de la ecuación dependen netamente del flotador, estas geometrías como se observa en la Figura 21 son un cilindro y un cono truncado, lo cual facilitara la obtención de la ecuación final.

La línea 0 en la figura expresa la línea de flotación definida como referencia para el cálculo, por lo que bajo esta línea hay agua y sobre ella no, esta línea de flotación variara con respecto a H, de forma positiva hacia arriba y de forma negativa por debajo de la línea 0.



**Figura 21: Dimensión flotador en mm.**

Por lo tanto, la ecuación del volumen final que depende de la altura  $H$  y que combina el volumen de todas las formas geométricas sumergidas es:

$$V_s = (R_1^2 + R_2^2 + R_1 \cdot R_2) \cdot h_2 \cdot \frac{\pi}{3} + R_1 \cdot \pi \cdot H + 0.01 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

- $F_s$  = Volumen sumergido
- $R_1$  = Radio mayor
- $R_2$  = Radio menor
- $h_2$  = Altura cono truncado
- $H$  = Altura variable

6. Una última ecuación que servirá para las iteraciones finales es la fuerza neta, la cual expresa la cantidad de fuerza disponible en el cuerpo flotante sin que este se hunda. Esta ecuación se expresa de la siguiente manera.

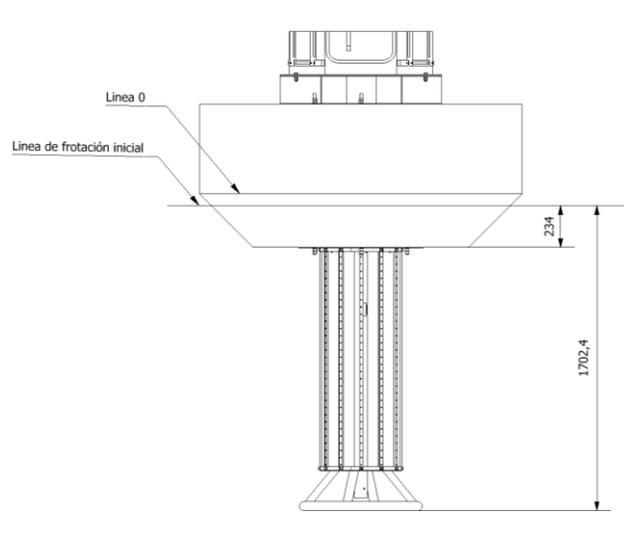
$$F_{Neta} = F_b - W_T \quad \text{Ec. 9}$$

7. Dejando la fuerza neta igual a 0 para que se cumpla la condición de flotación neutra y a la vez combinando las ecuaciones antes mencionadas en el software de cálculo EES Profesional se despeja la altura inicial arrojando una altura  $H$ , estos valores son posibles observarlo en la Tabla 7.

**Tabla 7: Resultados primera interacción para línea de flotación inicial [Fuente propia].**

Variable	Unidad	Valor
Altura H (Variable)	m	-0.066 (Bajo la línea 0)
Altura $h_2$ (Cono truncado)	m	0.3
Peso total $W_T$	N	3929
Fuerza de flotación $F_{b1}$	N	3929

El valor de H de -6.6 cm indica que la línea de flotación se desplaza hacia debajo de la línea 0, por lo que se puede establecer como primera iteración sin masas adicionales la línea de flotación inicial de la boya, la cual es 0.234 m desde la base del flotador y de 1.7 m desde la base de la boya como se indica en la Figura 22.

**Figura 22: Línea de flotación inicial en mm [Fuente propia].**

- Ya comprobado que la boya flota con el peso propio de su cuerpo, es posible encontrar el peso máximo admisible o la fuerza neta admisible antes de que la boya se hunda. Esto se realiza agregando una nueva incógnita que representará el peso adicional ( $W_{adi}$ ) al peso total  $W_T$ , así también, dejando un margen de seguridad en la altura de un 10% al flotador, ósea, la línea de flotación no deberá superar los 0.72 m de altura de un total de 0.8 m que tiene el flotador.

Con esto es posible iterar nuevamente hasta encontrar ese peso adicional que no supere el 10% de seguridad antes mencionado. Los valores obtenidos se pueden encontrar en la Tabla 8.

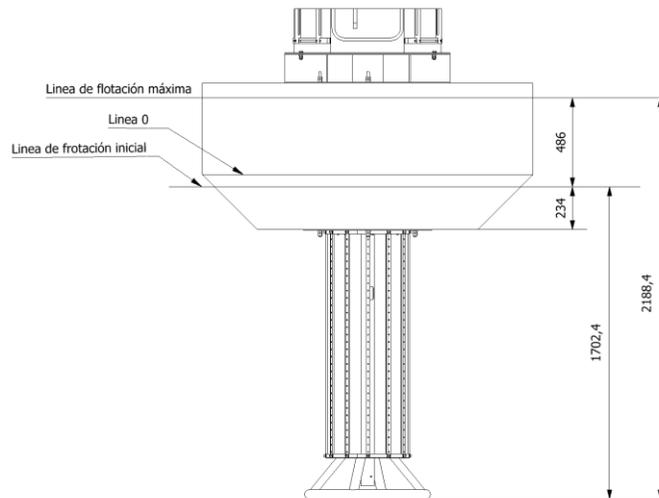
**Tabla 8: Resultados de iteración para encontrar reserva de flotabilidad [Fuente propia].**

Variable	Unidad	Valor
Altura H máxima	m	0.42
Peso boya $W_{boya}$	N	3929
Peso adicional $W_{adi}$	N	12589
Peso total $W_T = W_{boya} + W_{adi}$	N	16518
Fuerza de flotación $F_{b2}$	N	16281

9. Con el mayor valor de flotabilidad que se puede obtener sin romper el rango de seguridad es posible obtener la fuerza neta disponible, el cual se calcula comparando las fuerzas de flotación de las 2 iteraciones. Resultando una fuerza neta:

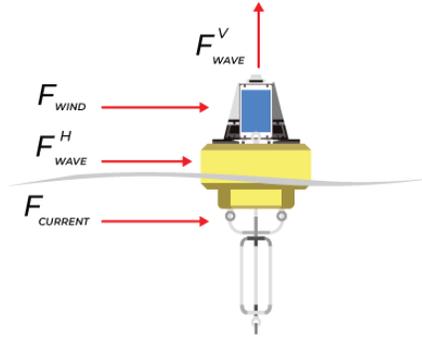
$$F_{Neta} = F_{b2} - F_{b1} = 16281 - 3929 = 12589 \text{ N}$$

10. Entonces es posible indicar que la boya flotará con una reserva de flotabilidad de 12589 N. Las distancias de las líneas principales de flotabilidad se pueden encontrar en la Figura 23.

**Figura 23: Distancias de línea inicial y final de flotación en mm [Fuente propia].**

#### 5.4 Estudio de cargas externas.

Dentro del mar es posible encontrar múltiples variables externas que aportarían o perjudicarían a la función principal de la boya oceanográfica a diseñar, estas son las fuerzas del viento, las corrientes marinas, las olas y la fuerza de flotabilidad. Cómo se presentan en la Figura 24.



**Figura 24: fuerzas externas [15].**

A continuación, se estudiarán las variables individualmente con datos oceanográficos y climáticos obtenidos en el SHOA de 1 año continuado y que se incluirán en el anexo de este informe. Tan solo se podrán apreciar en la siguiente tabla los necesarios para el desarrollo de este proyecto (Tabla 9).

**Tabla 9: Promedios datos principales climatológicos y oceanográficos [Fuente propia].**

Zona de medición	Talcahuano
Rango de fecha	Marzo 2022 - febrero 2023
Altura significativa de la ola [m] (Prom. - Max)	2,15 - 6.34
Periodo de una ola [s] (Prom. - Min)	12,51 – 4.7
Velocidad de la corriente [m/s]	1,5
Densidad del agua de mar [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	1026
Temperatura del aire [ $^{\circ}\text{C}$ ]	12,3
Densidad del aire [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]	1,24
Velocidad del viento [m/s] (Prom. - Max)	5,88 – 21.5

Se aprecia que en algunos casos se entregan más de un valor (Promedio – Máximo - Mínimo), esto debido a que se tendrán que analizar las fuerzas en el caso más problemático para la boya, este ocurre cuando la altura de la ola es alta, también, cuando los periodos entre olas son cortos y por último cuando se tiene una velocidad del viento elevada.

### 5.4.1 Fuerza del viento

La fuerza del viento se obtiene de una ecuación general para este tipo de fluidos, en donde la ecuación se representa por.

$$F_W = \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot V_W^2 \cdot A_W \cdot C_D \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

- $F_W$  = Fuerza del viento
- $V_W$  = Velocidad del viento
- $\rho_W$  = Densidad del aire
- $A_W$  = Área de contacto del viento con la boya sobre el agua
- $C_D$  = Coeficiente de arrastre de la geometría

El coeficiente de arrastre depende de la estructura, específicamente del borde de ataque del objeto, este borde de ataque se puede apreciar correctamente generando un corte transversal, lo que arrojaría distintas formas con distintos coeficientes de arrastre como se indica en el anexo 2. Para este caso se utilizarán solo dos coeficientes, el de barra rectangular y el de barra triangular.

Se tomará en cuenta principalmente la torre y la parte expuesta a la superficie del flotador, pero como la parte expuesta del flotador varía dependiendo del peso al que se le somete y las condiciones climáticas se dejará hipotéticamente con un 50% del flotador expuesto. Los resultados obtenidos para la fuerza del viento se pueden apreciar en Tabla 10.

**Tabla 10: Fuerzas ejercidas por el viento FW [Fuente propia].**

	Medidas [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	$C_d$	$F_W$ [N] (Max)
Torre cara 1	0.4 x 0.8	0.32	2.0	227.34
Flotador	0.4 x 1.8	0.72	2.0	409.2
Bastón superior	Medida irregular	0.08	1.9 Aprox.	26.46
Total Fw				663

Por lo tanto, la fuerza de viento máximo que se podrá encontrar en las costas de Talcahuano es de 663 N.

### 5.4.2 Fuerza de la corriente

Para la corriente se cumple la misma condición que la fuerza del viento tan solo cambiando los valores, por lo tanto, la ecuación queda formada de la siguiente manera,

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot V_w^2 \cdot A_w \cdot C_D \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

- $F_w$  = Fuerza de la corriente.  
 $V_w$  = Velocidad de la corriente  
 $\rho_w$  = Densidad del agua  
 $A_w$  = Área de contacto del agua sobre la estructura de la boya que está bajo el agua

Como en el caso anterior se estudió la exposición de solo el 50% del flotador, en este caso se aplicará para el restante. Además, se tomará todo el sistema de sujeción de sensores inferiores o calado. Estos resultados quedan planteados en la Tabla 11.

**Tabla 11: Fuerzas ejercidas por las corrientes marinas  $F_w$  [Fuente propia].**

	Área [m <sup>2</sup> ]	$C_d$	$F_w$ [N] (Max)
Flotador	0.62	2.0	1431
Estructura inferior	0.22	1.9	482
Total $F_w$			1913

Por lo tanto, la fuerza ejercida por las corrientes marinas es la que más afecta al posterior análisis de estabilidad.

### 5.4.3 Estudio de fuerza de las olas

El estudio de las fuerzas generadas por las olas es un área extensa y compleja de estudio, ya que su comportamiento en el tiempo depende de muchas variables que el SHOA u otra entidad en Chile no lo publican, como lo es la profundidad, los anchos de olas, el tiempo de descenso, etc. por lo que para este estudio se necesitarían mucha información de las costas, además de encontrar las respectivas ecuaciones del comportamiento de estas.

Según M. Salazar [1], la influencia de las olas aporta al desplazamiento de la boya, estas fuerzas varían según la altura de las olas u ondas de las olas, la profundidad del mar, los periodos, etc. Por lo que recomienda aplicar un factor  $K$  a la tensión horizontal que tendrá la boya diseñada, este factor se aplica para aguas someras <sup>1</sup> y se representa cómo.

$$k=1+5 \cdot (h_o H_o) \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

- $k$  = Coeficiente de tensión  
 $h_o$  = Altura del oleaje de la cresta hasta el seno.  
 $H_o$  = Profundidad del agua sin oleaje.

<sup>1</sup> Son las aguas poco profundas, es decir, profundidades hasta 30 metros. El término proviene de la traducción del inglés: shallow waters. [1]

Por lo que es posible encontrar un factor  $k$  en la Tabla 12 para distintas profundidades  $h_o$  (Máximo, mínimo y promedio) y altura de olas  $H_o$  en las costas de Talcahuano y Dichato.

**Tabla 12: Coeficiente de tensión  $k$  para oleaje [Fuente propia].**

$H_o$ [m] \ $h_o$ [m]	5	10	15	20	25	30
<b>0,67 [min.]</b>	1,7	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1
<b>2,14 [Prom.]</b>	3,1	2,1	1,7	1,5	1,4	1,4
<b>6,34 [Max]</b>	7,3	4,2	3,1	2,6	2,3	2,1

Como se puede apreciar a bajas profundidades el factor  $K$  tiende a ser mayor, esto debido a que las olas tienden a romper a bajar profundidades por lo que la energía cinética de la ola afectaría de otra forma, por esta razón es recomendable ubicar las boyas en profundidades mayores a 20 m.

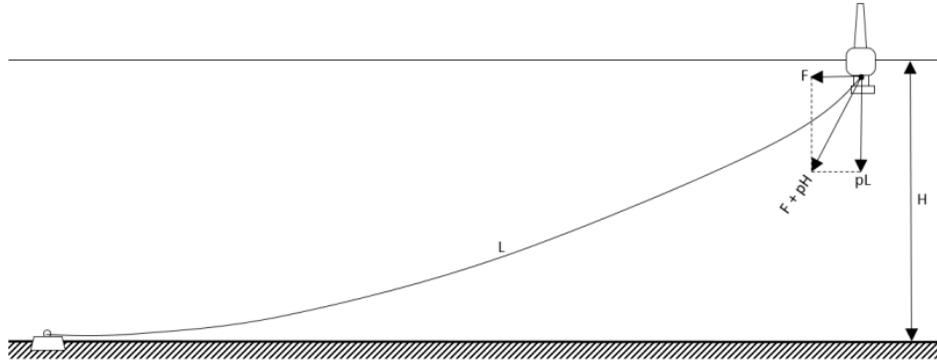
Por lo tanto, la sumatoria de las fuerzas horizontales para profundidades de 25 m en aguas someras se ve representado en la Tabla 13.

**Tabla 13: Fuerzas horizontal total con factor  $k$  [Fuente propia].**

$k$	1.1	1.4	2.3
Fuerza del viento FW	663 N		
Fuerza de la corriente Fw	1913 N		
Total	2833.6 N	3606.4 N	5924.8 N

#### 5.4.4 Fuerza de la cadena de anclaje

La fuerza de la cadena, en el caso de que ninguna de las fuerzas externas antes mencionada se encuentre en acción, es solamente el peso añadido de esta, el peso en este caso es para una longitud igual a la profundidad del agua. Cuando la boya se expone a las fuerzas del viento o corriente que tienden a impulsar la boya distanciándola de su muerto, estas fuerzas se contrarrestarán por la tensión de la cadena, como se ilustra en la Figura 25. La tensión de la cadena tiene un componente horizontal y uno vertical. Cuando las fuerzas están en su máximo, la dirección de la tracción de la cadena en el muerto deberá ser horizontal ( $F$ ) y el componente vertical de la tracción en la boya será igual al peso de toda la cadena ( $pL$ ).



**Figura 25: Fuerza de la cadena [1].**

El largo de la cadena según IALA debe ser 3 veces la profundidad del agua más alta, está a la vez se relaciona directamente con el grosor y peso de los eslabones por lo que la ecuación de la longitud de cadena sería igual a:

$$L = H \cdot \left[ 1 + \left( 2 \cdot \frac{F}{P \cdot H} \cdot \right) \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

- $L$  = Largo de la cadena
- $F$  = Fuerzas horizontales
- $H$  = Profundidad del agua, más la mitad de la altura del oleaje.
- $PC$  = Peso de la cadena en kg/m

Siendo P igual a:

$$PC = \frac{F}{4 \cdot H} = \frac{600 \text{ kg}}{4 \cdot 28} = 5.3 \text{ kg/m} \quad \text{Ec. 14}$$

Con esto es posible obtener que el largo de la cadena es igual a 84 m, por lo tanto, el peso total de la cadena sería igual a 447 kg. Pero como es una altura de 25 m el peso aplicado a la boya es de 132.5 kg.

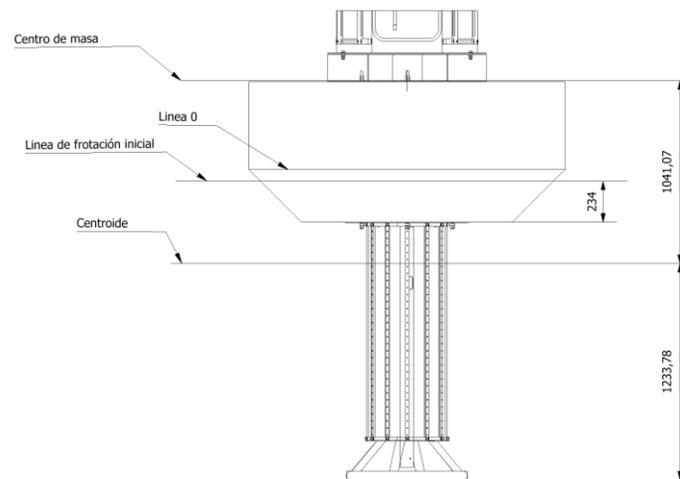
Además, con la tabla que se puede encontrar en el anexo C es posible encontrar el diámetro de los eslabones, el cual sería de 16 mm o 5/8 aproximadamente.

### 5.5 Estudio de estabilidad sin fuerzas externas.

Tal como la flotabilidad, el análisis de estabilidad se compone de varias etapas, pero a diferencia de lo anterior estas deben consolidarse en la más adecuada para el objetivo final que es desarrollar una boya estable y segura.

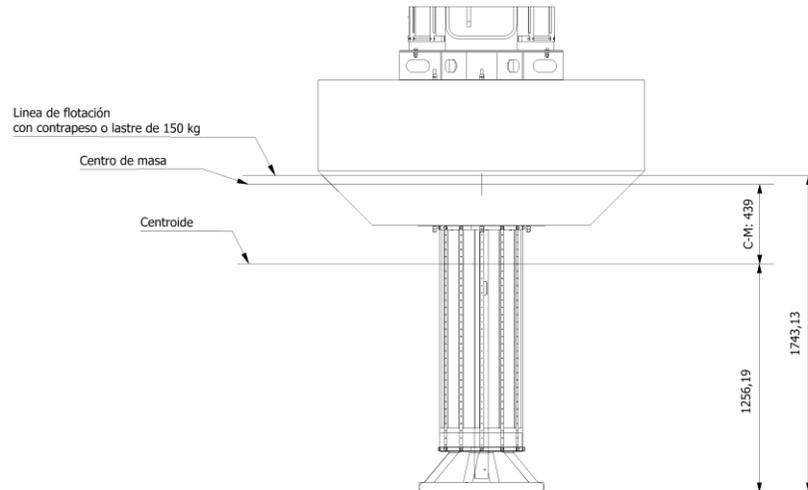
En una primera instancia se analizará la estabilidad sin fuerzas externas, tan solo se considerará la fuerza de empuje. El desarrollo del estudio se presentará a continuación punto por punto.

1. El primer paso es analizar la boya sin ninguna masa adicional, además, con la ubicación de la línea de flotación sin masas es posible obtener el centro de calado o el centroide de la de la parte sumergida de la boya, el cual será de gran importancia.
2. A la par con lo anterior, también es necesario encontrar la ubicación del centro de masa de la boya, este es arrojado automáticamente gracias al software de diseño inventor.
3. Es posible realizar la primera comparación con los datos de los puntos anteriores, en donde lo adecuado según lo visto en el estado de arte (2.3.2) es que el centro de masa de la boya este sobre el centroide de la geometría sumergida, esto se cumple y es posible apreciarlo en la Figura 26.



**Figura 26: Ubicación Centroide y centro de masa en mm [Fuente propia].**

4. Luego de verificar que se cumple el criterio es necesario dejar el centro de masa lo más cercano posible al centroide, ya que si se alejan muchos se generarían momentos por las fuerzas externas antes mencionadas que desestabilizarían la boya. Algunos autores como Manuel Salazar, ingeniero naval [1] recomiendan que la distancia entre el centro de masa y el centro de flotación puede ser del orden de no más el 20% de la altura total de la boya. Por lo que, en este proyecto, en donde la altura total de la boya es de 4.5 m aproximadamente, la distancia entre el centro de masa y el centroide (C-M) no debería superar los 0.9 m. Pero por seguridad la distancia C-M se reduce a un 9.8% con una distancia de 0.439 m agregando un lastre o contrapeso de 150 kg en la parte inferior de la boya, estos valores se pueden observar en la Figura 27.



**Figura 27: Distancia C-M corregido con lastre de 150 kg [Fuente propia].**

Es posible asegurar con un 50% de seguridad de que la boya es estable, esto debido a que es necesario cumplir otro criterio de suma importancia, el cual es el metacentro.

- Anteriormente, se habló de que el metacentro es el punto de unión de la línea que cruza el centro de masa y la línea que cruza el centroide, este punto según distintos estudios y recomendaciones es necesario que se encuentre sobre el centro de masa para que las fuerzas externas no generen pares de fuerza que puedan volcar completamente la boya.

Según lo mencionado anteriormente, el metacentro cuando el cuerpo está estable se calcula como:

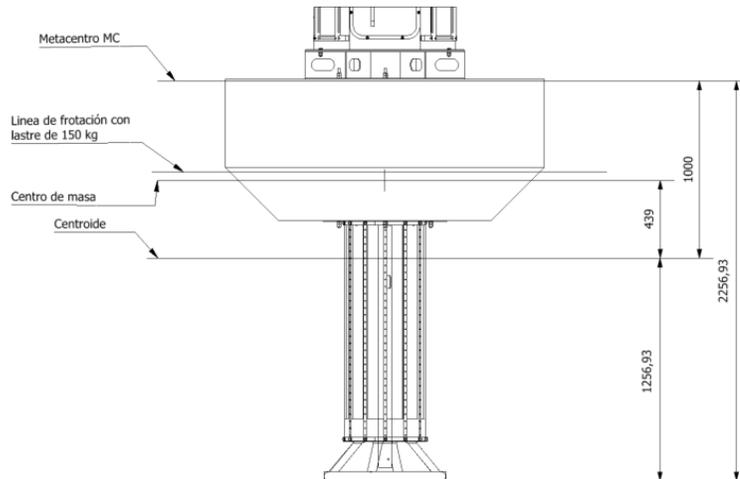
$$MC = I/Vd \quad \text{Ec.15}$$

Siendo  $I$  la inercia o el mayor momento de la sección horizontal del cuerpo tomado en la superficie del fluido, por lo que en este caso sería el flotador, con una forma circular y un diámetro de 1.8 m, por lo tanto, la inercia estaría establecida de la siguiente forma.

$$I_x = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi \cdot 0.9^4}{4} = 0.513 \text{ m}^4 \quad \text{Ec. 16}$$

Y sabiendo que para el último caso evaluado en donde se aplica un lastre de 150 kg, el volumen sumergido es igual a  $0.512 \text{ m}^3$ . Por lo que el metacentro estaría a 1 m aproximadamente.

Con estos valores es posible establecer que la boya será estable y tenderá a volver a su punto inicial, esto debido a que el metacentro se encuentra sobre el centro de masa tal como se muestra en la Figura 28.



**Figura 28: Posición metacentro MC en mm [Fuente propia].**

Además, aplicando nuevamente los pasos de flotabilidad, la reserva de flotabilidad cambiará a 11.116 N.

### 5.6 Estudio de estabilidad con fuerzas externas

En el punto anterior se estudió y se comprobó que la boya será estable en condiciones ideales, pero como existen fuerzas externas que afectan a la estabilidad y que por ende generan momentos desestabilizantes, llamado par de escora o momento de vuelco (ME). Salazar M. [1] define esta acción como un momento de fuerza que actúa sobre la embarcación o boya para inclinarla o volcarla debido a fuerzas externas que superan la capacidad de restauración del par de adrizamiento<sup>2</sup>.

Para este estudio es necesario agregar el peso de la cadena, por lo que cambiara todo lo estudiado en el punto de flotabilidad, pero como es el mismo procedimiento se mostrarán solo los resultados, en la Figura 29.

<sup>2</sup> El par de adrizamiento es el momento de fuerza que actúa sobre una embarcación o boya para restaurarla a su posición vertical o de equilibrio cuando se inclina debido a fuerzas externas como el viento, las corrientes o las olas [1].



- $GZ$  = Brazo estabilizante
- $GM$  = Distancia centro de masa CG al metacentro M
- $\alpha$  = Grado adrizante.

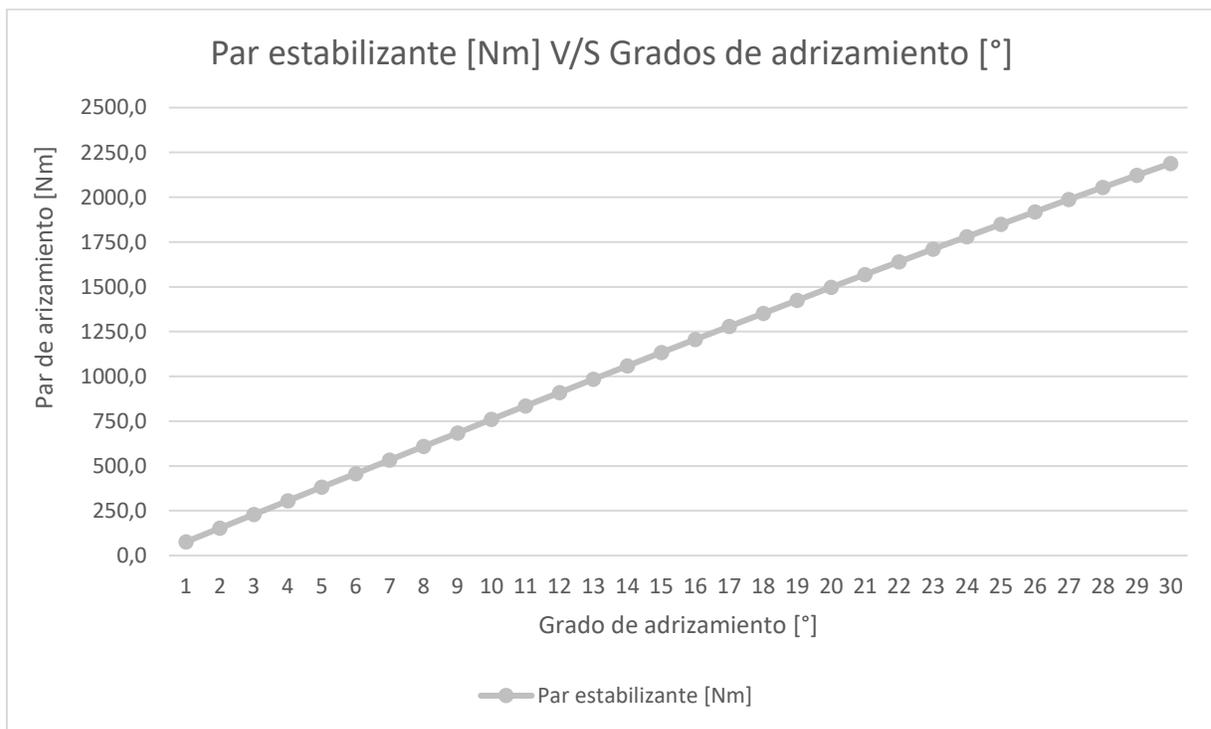
Además, junto con esto es posible encontrar el par de estabilidad o par de adrizamiento ( $M_A$ ), mediante la siguiente ecuación.

$$M_A = W_{Total} \cdot GZ \quad Ec. 18$$

Donde:

- $M_A$  = Par de adrizamiento
- $W_{Total}$  = Peso total de la boya incluyendo la influencia la cadena

Con todas estas ecuaciones es necesario encontrar el par de adrizamiento que se iguale con el par de escora y así mediante el gráfico presentado a continuación es posible encontrar el grado máximo de inclinación de la boya antes de volver a su punto de origen.



**Figura 30:** Gráfico de par de adrizamiento vs ángulo de adrizamiento [Fuente propia].

Por lo tanto, como se puede observar en el gráfico de la Figura 30, para el par de escora  $M_{E1}$  la boya llegará cercano a los 4,5° de inclinación antes de volver a su punto inicial, en cambio, para el par de escora  $M_{E2}$ , la boya superará por poco los 20°. Todos estos pasos para encontrar los puntos máximos de inclinación lo indica Manuel Salazar en su guía de cálculo, diseño y construcción de boyas.

Realizando un estudio rápido de flotabilidad con los mismos pasos mostrados anteriormente y agregando las fuerzas externas se demuestra que la reserva de flotabilidad final de la boya oceanográfica diseñada es de 9564 N aproximadamente.

Con esto se da por finalizado el estudio de estabilidad, comprobando teóricamente que la boya diseñada flotará y será estable. Hay que tener en consideración que estos resultados son para la peor condición climática en las costas de Concepción.

## CAPÍTULO 6: Diseño boya oceanográfica.

En este capítulo se mostrará el cumplimiento de las consideraciones de diseño, las distribuciones de las partes, costos de materiales y construcción, comparación de costo con otra boya y algunos estudios computacionales.

La boya oceanográfica, ya que se diseñó con reuniones periódicas con el centro COPAS-COSTAL, cumple con todas las consideraciones de diseño mencionadas en el capítulo 1.

### 6.1 Partes principales de la boya

La boya está compuesta de múltiples conjuntos que se puedan ensamblar, desarmar y transportar fácilmente, la boya tiene 4 secciones principales, entre ellas el flotador, la torre, el bastón de torre y el espacio de los sensores. A continuación, se podrá observar brevemente una descripción de cada parte, los detalles específicos de cada componente se pueden ver en los planos adjuntos en los anexos.

#### 6.1.1 Flotador

El flotador, como ya se mencionó anteriormente, es de espuma de poliuretano de celda cerrada al 40% de densidad, de diámetro máximo 1.8 m y alto 0.8 m, con perforaciones pasantes para unión de la parte superior e inferior de la boya como se observa en la Figura 31.

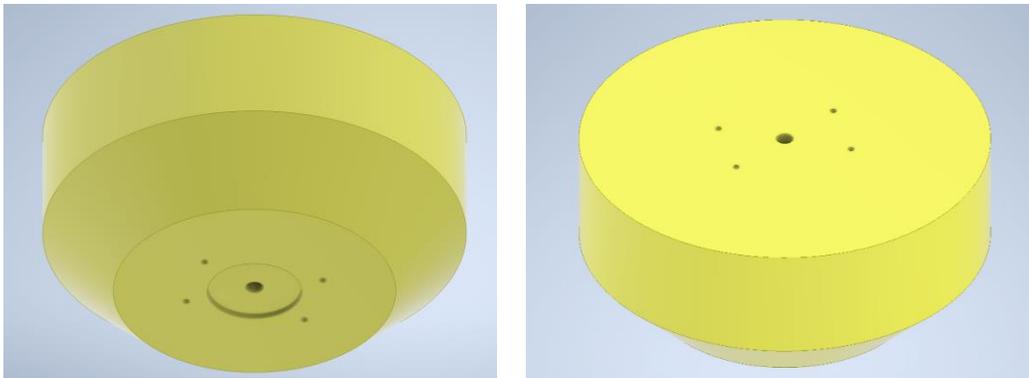


Figura 31: Vistas isométricas flotador [Fuente propia].

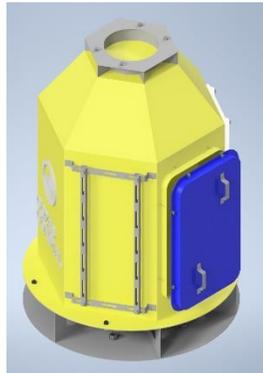
#### 6.1.2 Torre principal

La torre de la boya es una parte crucial que mantendrá resguardado todos los dispositivos electrónicos que instalen para su uso principal. Esta torre está compuesta por planchas de acero inoxidable 316L de 3 mm de espesor. Con su forma hexagonal (Figura 32) y un espacio útil de 0.37 m<sup>3</sup> cumple con la condición de insertar una caja eléctrica de 600x600x300 mm, más 2 baterías.



**Figura 32: Torre sin accesorios [Fuente propia].**

Por otra parte, se agrega una compuerta de acero 316L que sellara esta torre junto con una empaquetadura comercial de goma, además, gracias a sus 5 caras disponibles de 800 mm de alto por 400 mm de ancho es posible incluir la estructura de perfiles cuadrados de 25x25 mm que podrán soportar los paneles solares (Figura 33).



**Figura 33: Torre completa [Fuente propia].**

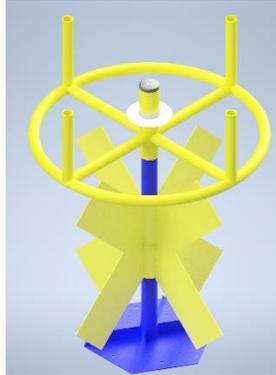
El estudio de las capacidades de los paneles solares no es parte de los objetivos de este proyecto, pero en la Tabla 14 se entregará como aporte la descripción de un panel solar comercial apto para la boya.

**Tabla 14: panel solar recomendado.**

Modelo	PS-3	
Potencia máxima	30 [W] c/u	
Voltaje nominal	18.36 VCC	
Corriente	1.63 A	
Tensión en circuito abierto	22 VCC	
Corriente en cortocircuito	1.75 A	
Tensión máxima	1000 V (IEC) / 6000 (UL)	
Resistencia al viento	2400 Pa	
Medidas	700x 360 x 30 mm	

### 6.1.3 Bastón superior

El bastón superior Figura 34 realizado con planchas de 3 mm de espesor y cañerías de acero sin costura 316 L de 1" y 1-½" SCH 40. Cuenta con la famosa cruz de san Andrés y el espacio para instalar distintos dispositivos de análisis climático. Además, de poder instalar la baliza respectiva que debe tener por normativa marítima.



**Figura 34: Bastón superior [Fuente propia].**

Todo este conjunto está soldado con electrodos para acero inoxidable y hueco por dentro para el paso de los cables eléctricos

### 6.1.4 Espacio de sensores.

El espacio por debajo de la boya Figura 35, es una parte esencial para instalar los dispositivos que ayudaran a la medición oceanográfica. Cuenta con un espacio de 0.7 m<sup>3</sup> para la instalación de sensores y dispositivos que se estimen necesarios, además se compone de 18 perfiles rectangulares de 30x20 mm de acero 316L que están fijados con pernos del mismo material (M8) y, por lo tanto, es posible moverlos a voluntad dependiendo del espacio requerido.



**Figura 35: Espacio de sensores [Fuente propia].**



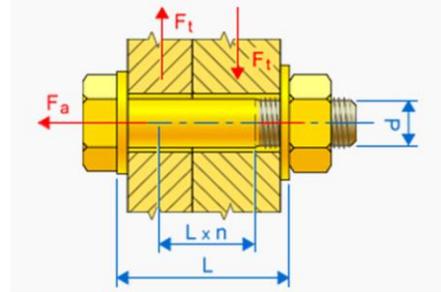
de tracción que genera la cadena 1500 N aproximadamente y las fuerzas transversales que generan las corrientes, los vientos y las olas (Aproximado a 6000 N).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos separando en 3 tablas los datos de las cargas, los pernos y los resultados.

- Cargas.

**Tabla 15: Estudio de pernos principales (Cargas) [Fuente: Inventor].**

Factor de apriete	Ka	1.5
Fuerza axial máxima	Fa	1500 N
Fuerza tangencial máxima	Ft	6000 N
Coficiente de fricción de junta	f	0.4



- Pernos.

**Tabla 16: Estudio de pernos principales (Perno) [Fuente: Inventor].**

Numero de pernos	Z	4
Diámetro rosca	D	20 mm
Paso rosca	P	1.5 mm
Material		
Limite elástico	Sy	207 MPa
Coficiente de seguridad	Ks	3
Modulo elástico	E	193000 MPa
Presión de rosca admitida	pa	40 MPa

- Resultados.

**Tabla 17: Resultados estudio de pernos principales [Fuente: Inventor].**

Fuerza de pretensión	Fv	6182.03 N
Fuerza de trabajo	Ftmax	6187.5 N
Momento de apriete requerido	Mu	37.032 Nm
Tensión de tracción	$\sigma_t$	23.868 MPa
Tensión de torsion	Tk	13.093 MPa
Tensión reducida	$\sigma_{red}$	32.923 MPa
Tensión a partir de fuerza máxima	$\sigma_{max}$	23.890 MPa
Presión de rosca	pc	11.852 MPa

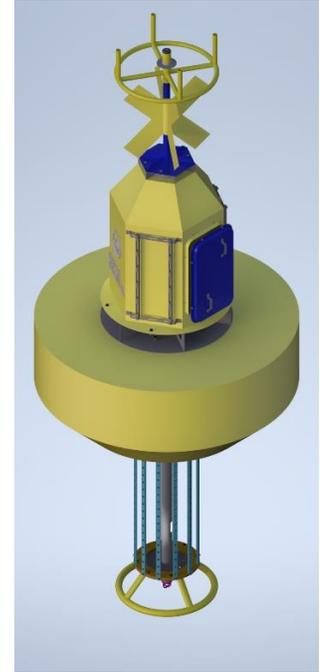


## 6.4 Resumen de datos técnicos boya oceanográfica

A continuación, se presentan los datos de la boya oceanográfica diseñada

**Tabla 18: Datos técnicos boya oceanográfica final [Fuente propia].**

Diámetro	1.8	m
Reserva de flotabilidad	956 (margen de seguridad del 10%)	Kg
Masa boya	376 aprox.	Kg
Plano focal	2.65	m
Puntual o altura total	4.5	m
Peso de lastre	150	Kg
Material flotador	Espuma de poliuretano al 40%	
Acero utilizado	Acero 316L	
Tipo de diseño	Modular	
Sistema de alimentación	5 paneles solares	
Estabilidad	Estable con ángulo máximo en costa Talcahuano- Concepción de 20°	



## CAPÍTULO 7: Análisis de presupuesto para el desarrollo.

A continuación, se presentará las cotizaciones de fabricación, materiales y logística. El análisis se separará en 4 conjuntos los cuales son:

1. Diseño y cálculos.
2. Estructura
3. Flotador
4. Recubrimiento
5. Logística

### 7.1 Diseño

Para el costo de diseño y cálculo se considera un sueldo promedio de un ingeniero civil aeroespacial o ingeniero mecánico recién egresado, el cual es de \$9,000 la hora aproximadamente, según la página web de Educa LT. En la Tabla 19 se puede observar el total de horas de diseño y cálculo y el costo total.

**Tabla 19: Costo de diseño y cálculo**

Total horas de diseño y planos	180 horas (4 semanas)
Total horas de calculo	135 horas (3 semanas)
Total horas de cotización	24 horas
Costo hora	\$9,000
Total	\$3,051,000

### 7.2 Estructura

A continuación, se puede observar en la Tabla 20 los valores correspondientes a la fabricación estructural de la boya incluyendo el costo de fabricación del molde, comparando los precios de 3 empresas.

**Tabla 20: Cotización de estructura [Fuente propia].**

	<b>Insermet</b>	<b>ServiAce</b>	<b>WMC</b>
<b>Tiempo (Sem.)</b>	5	4.5	5
<b>Total neto</b>	\$13,260,900	\$16,374,000	\$5,236,106
<b>Total con I.V.A</b>	\$15,780,471	19,485,060	\$6,338,066

Se puede observar una gran diferencia de costos de fabricación estructural, siendo la empresa WMC la de más bajo costo, aun así, Insermet y ServiAce tienen mucha más experiencia con trabajos en plegado y soldado de acero inoxidable 316L entregando una gran confianza en la fabricación y sobre todo en la hermeticidad que debe tener la boya.



Al igual que como ocurre en los costos estructurales, en la inyección de espuma se puede ver una diferencia de cerca 3 veces el precio del otro, pero esto es por la experiencia que Alvar térmica S.A. ha generado con el tiempo siendo una empresa que ya ha hecho trabajos de fabricación de flotadores, además, es la que más confianza ofrece a la solicitud de mantener una espuma de poliuretano de celda cerrada al 40 %, recordando que el mantener este criterio es crucial para cumplir con los cálculos antes mencionados. Por lo tanto, la empresa más adecuada para realizar el trabajo y la que será utilizada para el costo final es la empresa Alvar térmica S.A.

#### 7.4 Recubrimiento

En la Tabla 23 se presentan los productos que se deben aplicar como recubrimiento a la estructura y al flotador para no tener corrosión ni fouling a corto plazo.

**Tabla 23: Cotización productos de recubrimiento EPOTHAN [Fuente propia].**

OXIMETAL F600 Convertidor de óxidos F600 GO 1 LT Litro	2	\$ 15,990
EPOPRIMER 7632K, Anticorrosivo Epoxico Fenalkamina Triple Acción Cvs 70% Gris galón	1	\$ 73,200
EPOPRIMER 7632K, Catalizador Parte B 4:1 1/4 galón	1	\$ 11,500
EPOTHAN 9141 R, Recubrimiento Epoxico Antifouling SR, Amarillo galón	2	\$ 59,900
EPOTHAN 9141, Catalizador 1/8 galón	2	\$ 10,200
	<b>NETO</b>	<b>\$ 256,880</b>
	<b>I.V.A</b>	<b>\$ 48,807</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 305,687</b>



## 7.6 Comparativa de costos con boya Fulmar.

A continuación, en la Tabla 25 se realiza una comparativa de costos con la boya Fulmar presentada en el estado del arte del proyecto, esto debido a que solo la boya Fulmar presenta información de costos asociados.

**Tabla 25: Comparativa boya Fulmar con boya desarrollada [Fuente propia].<sup>3</sup>**

	<b>boya Fulmar</b>	<b>boya proyecto</b>	
Diámetro	1.9	1.8	m
Reserva de flotabilidad	1000	981	Kg
Masa	960	376	Kg
Plano focal	2.4	2.65	m
Puntual o altura total		4.5	m
Peso de lastre	240	150	Kg
Material flotador	Polietileno	Espuma de poliuretano al 40%	Sin relleno
Acero utilizado	Acero galvanizado	Ac. Inox 316L	
Tipo de diseño	Modular	Modular	
Sistema de alimentación	Paneles solares 70 W	Hasta 5 paneles	
Estabilidad y anclaje	No indica	Estable en costas Talcahuano- Concepción	
Valor comercial	63,000 (Precio 2020)	14,443.15 ( <b>\$11,575,753</b> )	USD

Como se puede observar en la Tabla 25, el costo del desarrollo de la boya diseñada en este proyecto equivale a tan solo un 22.93% del total del valor de la boya Fulmar, por lo que, a simple vista, la boya desarrollada es más viable que las presentadas en el estado del arte, ya que, a un menor costo se tienen mejores características de protección al ambiente marino, equivalencias en características de flotabilidad y por último esta boya está desarrollada para las necesidades del centro oceanográfico COPAS.

---

<sup>3</sup> El costo comparativo de la boya para este proyecto será con el menor valor obtenido en la Tabla 24



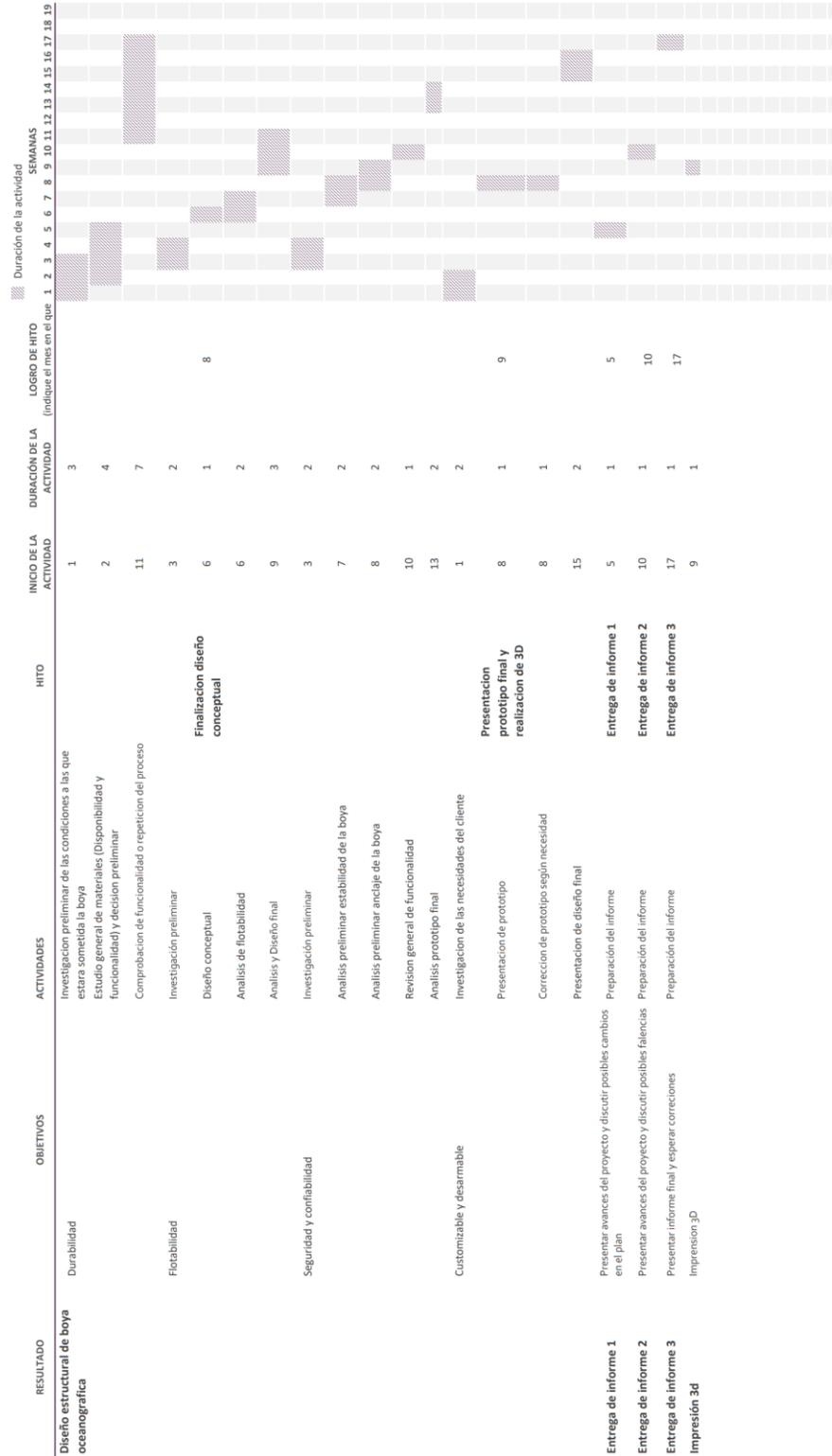
## Referencias

- [1] M. L. G. M. Salazar, «Especialización en cálculo, diseño y construcción de boyas,» Caracas.
- [2] R. L. Mott y J. A. Untener, «Mecànica de fluidos,» de *Mecànica de fluidos*, 7<sup>o</sup> ed., Pearson Educación de Mèxico, S.A, 2015, pp. 90-116.
- [3] International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities IALA, *G1099 HYDROSTATIC BUOY DESIGN*, 1.1 ed., 2013.
- [4] IALA-AISM, *Sistema de balizamiento marítimo*, 2011.
- [5] J. L. Almazán Gárate, M. C. Palomino Monzón, J. M. Paramio Cabrera y J. Espinoza Goded, «Ingeniería Marítima: Sistemas de Fondeo y Anclaje,» Escuela Técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos, Madrid, 2015.
- [6] Granta, «CES EDUPACK 2019,» Cambridge, 2019.
- [7] Asociación de la Industria del Poliuretano Rígido de España IPUR, «IPUR,» [En línea]. Available: <https://aislaconpoliuretano.com/resistencia-mecanica-poliuretano-proyectado/>. [Último acceso: 2023].
- [8] Metalpedia, «METALPEDIA,» [En línea]. Available: <https://www.metalpedia.info/inicio/aleaciones/aleaciones-de-hierro/acero-inoxidable/el-factor-p-r-e-n>.
- [9] NKS, «NKS,» [En línea]. Available: <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/aceros-inoxidables-316/#:~:text=Los%20aceros%20inoxidables%20Tipos%20316,de%20papel%2C%20textil%20y%20fotográfica..>
- [10] Hikelok, «Hikelok,» 28 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.hikelok.com/es/news/the-difference-of-material-304-and-304l-316-and-316l/>.
- [11] International Association of Lighthouse Authorities IALA, *R0107 FONDEOS DE LAS AYUDAS FLOTANTES A LA NAVEGACIÓN*, 2 ed., 2005, p. 3.
- [12] International Association of Lighthouse Authorities IALA, *G1015 Pintura de boyas de ayuda a la navegacion*, 2005.
- [13] International Association of Lighthouse Authorities IALA, *G1006 boyas de plastico*, 4.0 ed., Saint Germain en Laye, 2018.

- [14] International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities IALA, *C2001-8 AIDS TO NAVIGATION– TECHNICIAN TRAINING MAINTENANCE OF STEEL BUOYS*, Saint Germaine en Laye, 2021.
- [15] A. Dinovitzer, J.-L. Rene, R. Silberhorn y M. Steele, «The Mooring Selection Guide (MSG) software,» de *Oceans '97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, Halifax, NS, 1997.
- [16] C. F. Baldomir, *Condiciones de carga y estabilidad*, Coruña, 2014.
- [17] X. Fernández Avelino, «Diseño e implementación de un dispositivo de localización de bajo coste para la pesca de palangre: construcción de un prototipo de boya.,» Barcelona, 2021.
- [18] JN Aceros, «JN Aceros,» [En línea]. Available: <https://jnaceros.com.pe/blog/propiedades-acero-inoxidable-316-316l/>.

# A.1 Carta Gantt

## CARTA GANTT - DISEÑO ESTRUCTURAL DE BOYA METEOROLÓGICA PARA EL CENTRO OCEANOGRÁFICO DEL PACÍFICO SUR DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN (COPAS5).





## A.3 Tabla paramétrica para cálculo de peso de cadena

TABLA N° 1					
PESO DE LA CADENA EN EL AIRE Y EN EL AGUA					
DIÁMETRO		PESO EN EL AIRE		PESO EN EL AGUA	
Pulg	mm	Lbs/pie	Kg/m	Lbs/pie	Kg/m
1/2	12,5	2,42	3,6	2,08	3,20
5/8	16	3,76	5,9	3,28	5,20
3/4	19	5,37	8,2	4,68	7,20
7/8	22	7,30	10,9	6,35	9,50
1	25	9,50	14,1	8,30	12,30
1 1/8	28	12,00	17,9	10,50	15,70
1 1/4	32	14,20	23,5	12,40	20,50
1 3/8	35	18,00	27,9	15,70	24,30
1 1/2	38	21,40	32,6	18,70	28,50
1 5/8	41	25,10	38,4	21,90	33,50
1 3/4	45	29,10	46,0	25,40	40,20
2	50	38,00	56,9	33,10	49,70

4







**Durability**

Water (fresh)	ⓘ	Excellent
Water (salt)	ⓘ	Excellent
Weak acids	ⓘ	Excellent
Strong acids	ⓘ	Excellent
Weak alkalis	ⓘ	Excellent
Strong alkalis	ⓘ	Excellent
Organic solvents	ⓘ	Excellent
Oxidation at 500C	ⓘ	Excellent
UV radiation (sunlight)	ⓘ	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	ⓘ	Acceptable

## Notes

Aluminum bronze is the most suitable mating material to minimize galling.

Flammability	ⓘ	Non-flammable
--------------	---	---------------

**Corrosion resistance of metals**

Pitting resistance equivalent number (PREN)	ⓘ	22,6 - 27,9
Pitting and crevice corrosion resistance	ⓘ	Medium (20-30)
Stress corrosion cracking	ⓘ	Slightly susceptible
Notes		Rated in chloride; Other susceptible environments: Hydrogen sulfide
Intergranular (weld line) corrosion resistance	ⓘ	Good
Inorganic acids	ⓘ	Moderate
Organic acids	ⓘ	Good
Alkalis	ⓘ	Moderate
Humidity / water	ⓘ	Excellent
Sea water	ⓘ	Good
Sour oil and gas	ⓘ	Moderate



**Durability**

Water (fresh)	(i)	Excellent
Water (salt)	(i)	Excellent
Weak acids	(i)	Excellent
Strong acids	(i)	Excellent
Weak alkalis	(i)	Excellent
Strong alkalis	(i)	Excellent
Organic solvents	(i)	Excellent
Oxidation at 500C	(i)	Excellent
UV radiation (sunlight)	(i)	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	(i)	Limited use

Notes

Aluminum bronze is the most suitable mating material to minimize galling.

Flammability	(i)	Non-flammable
--------------	-----	---------------

**Corrosion resistance of metals**

Pitting resistance equivalent number (PREN)	(i)	19,6 - 22,6
Pitting and crevice corrosion resistance	(i)	Medium (20-30)
Stress corrosion cracking	(i)	Slightly susceptible
Notes		Rated in chloride; Other susceptible environments: Hydrogen sulfide
Intergranular (weld line) corrosion resistance	(i)	Good
Inorganic acids	(i)	Moderate
Organic acids	(i)	Good
Alkalis	(i)	Moderate
Humidity / water	(i)	Excellent
Sea water	(i)	Restricted
Sour oil and gas	(i)	Poor

### A.5 Enlace de acceso a carpetas.

En los siguiente vínculos podrán encontrar archivos como planos, cotizaciones etc. Tan solo podrán acceder personas que tengan dominio .UdeC.

Carpeta general (Entregables)	<a href="https://udeconce-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/rifernandez2017_udec_cl/EmAXnNITF6JCtw0z4rvnvUABE9WkipEWcOTXNdVIKZGEjQ?e=NVi4uy">https://udeconce-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/rifernandez2017_udec_cl/EmAXnNITF6JCtw0z4rvnvUABE9WkipEWcOTXNdVIKZGEjQ?e=NVi4uy</a>
Cotizaciones	<a href="https://udeconce-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/rifernandez2017_udec_cl/EoeqeIVVsRpCosAGgREFz1cBUXSz9Uo0BW6aWLR2HgMOhw?e=O9nfW2">https://udeconce-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/rifernandez2017_udec_cl/EoeqeIVVsRpCosAGgREFz1cBUXSz9Uo0BW6aWLR2HgMOhw?e=O9nfW2</a>
Diseño 3D	<a href="https://udeconce-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/rifernandez2017_udec_cl/EpBX-1aLVqJJpweGwI8nVT4Bk-Gsd_BqXss_v81Nq4d2w?e=e0tdOy">https://udeconce-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/rifernandez2017_udec_cl/EpBX-1aLVqJJpweGwI8nVT4Bk-Gsd_BqXss_v81Nq4d2w?e=e0tdOy</a>
Planos	<a href="https://udeconce-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/rifernandez2017_udec_cl/EuFQsp341MJEIjmni5dcslcB5XuqrfsDINVhr9IEk73yQ?e=6S8hva">https://udeconce-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/rifernandez2017_udec_cl/EuFQsp341MJEIjmni5dcslcB5XuqrfsDINVhr9IEk73yQ?e=6S8hva</a>





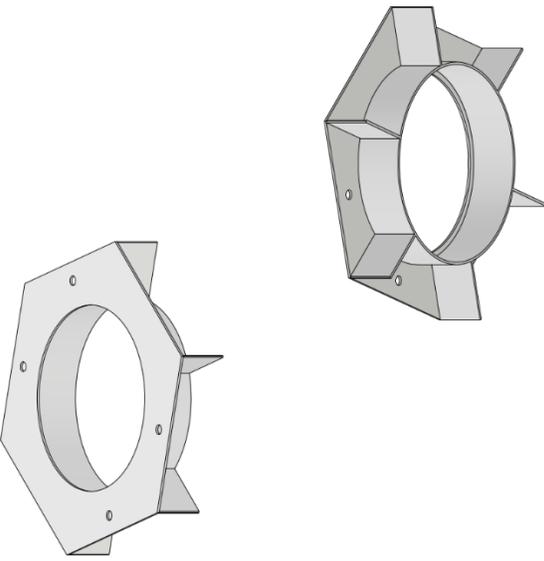


**Notas:**  
 Priorizar hermeticidad y plegado para reducir al máximo las soldaduras.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
 Facultad de Ingeniería  
 Departamento de Ingeniería mecánica

Facultad de Ingeniería

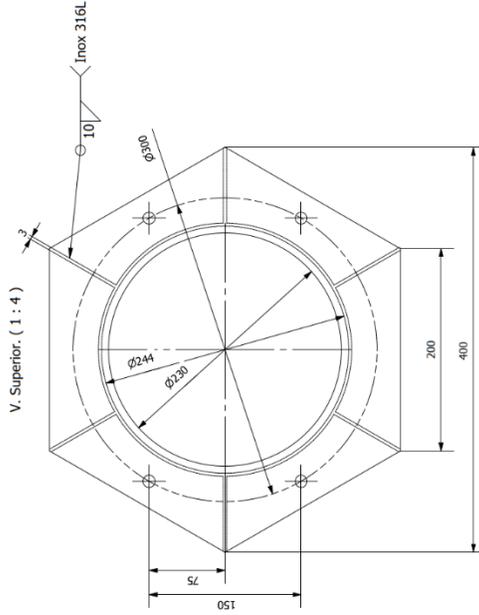
Torre principal			
NOMBRE	FIRMA	FECHA	PROYECTO: Boya oceanográfica
DISEÑO	R. Fernández.	17-06-2023	ÁREA: 6,130 m <sup>2</sup>
DIBUJO	R. Fernández.		Nº HOJA: 4 de 22
REVISÓ	C. Medina		VOL.: 0,009 m <sup>3</sup>
APROBÓ	D. Narvaes		PESO [kg]: 74,146 kg
MATERIAL: Acero inoxidable AISI 316 L			FORMATO: A3
			ESC: 1 : 15
Todos los derechos de propiedad intelectual que se presenten en los planos pertenecen a INCIAR Fernández Nalgaro. Cualquier uso indebido y/o sin autorización de la información será sancionado. Agradecemos, tanto autorización expresa y escrita del titular.			Nº PLANO <b>2023-4</b>



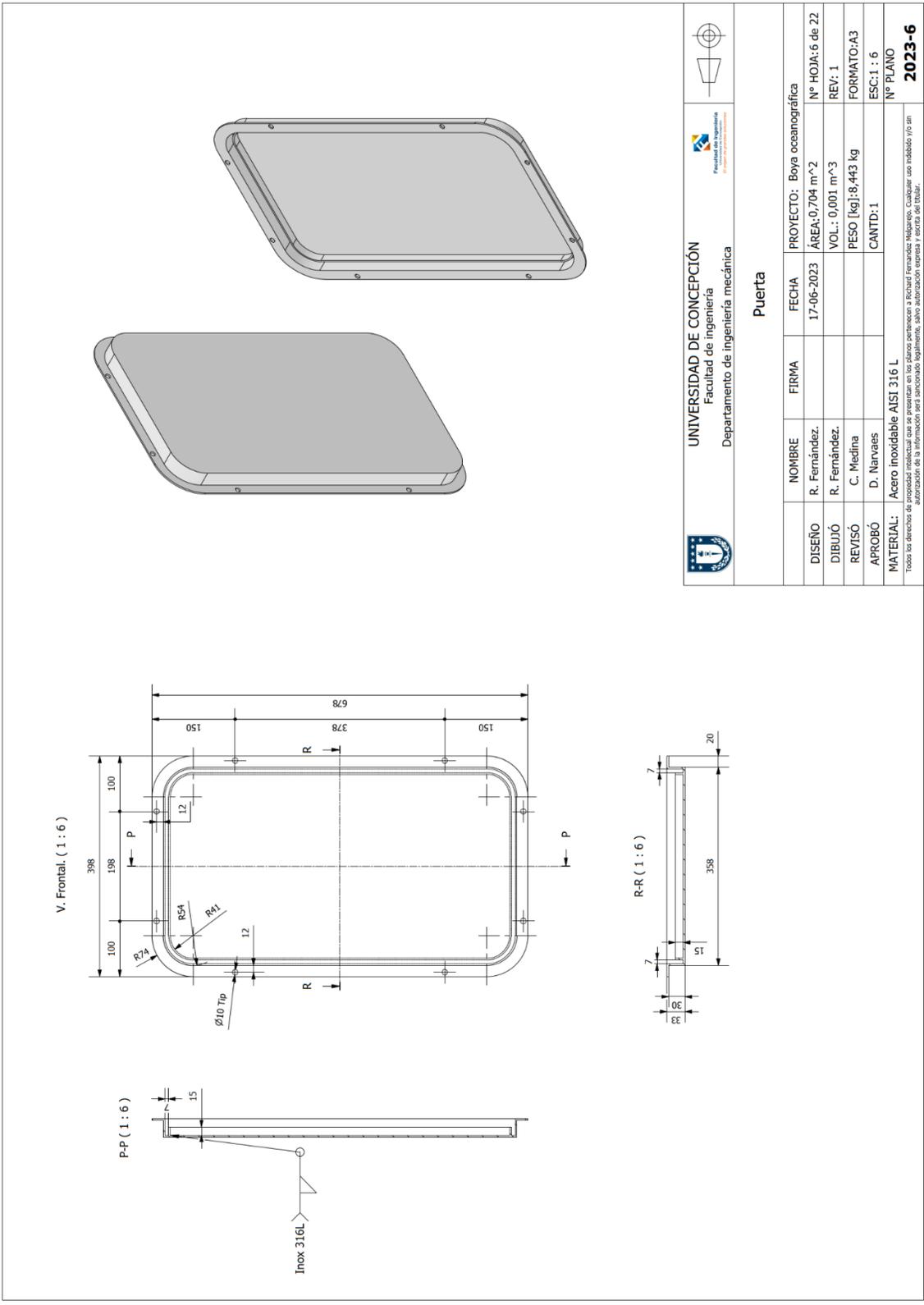
V. Frontal ( 1 : 4 )



V. Superior. ( 1 : 4 )



					
<b>UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN</b> Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería mecánica					
<b>Ensamble plato soporte superior.</b>					
NOMBRE	FIRMA	FECHA	PROYECTO:	Boya oceanográfica	
DISEÑO	R. Fernández.	17-06-2023	ÁREA:	27,6733,009 mm <sup>2</sup>	
DIBUJÓ	R. Fernández.		VOL.:	406012,577 mm <sup>3</sup>	
REVISÓ	C. Medina		PESO [kg]:	3,278 kg	
APROBÓ	D. Narvaes		CANTD:	1	
MATERIAL:	Acero inoxidable AISI 316 L				
Todos los derechos de propiedad intelectual que se presenten en los planos pertenecen a Inchiard Fernández Nalgarro. Cualquier uso indebido y/o sin autorización de la información será sancionado legalmente, tanto autorización expresa y escrita del titular.					
					Nº PLANO <b>2023-5</b>



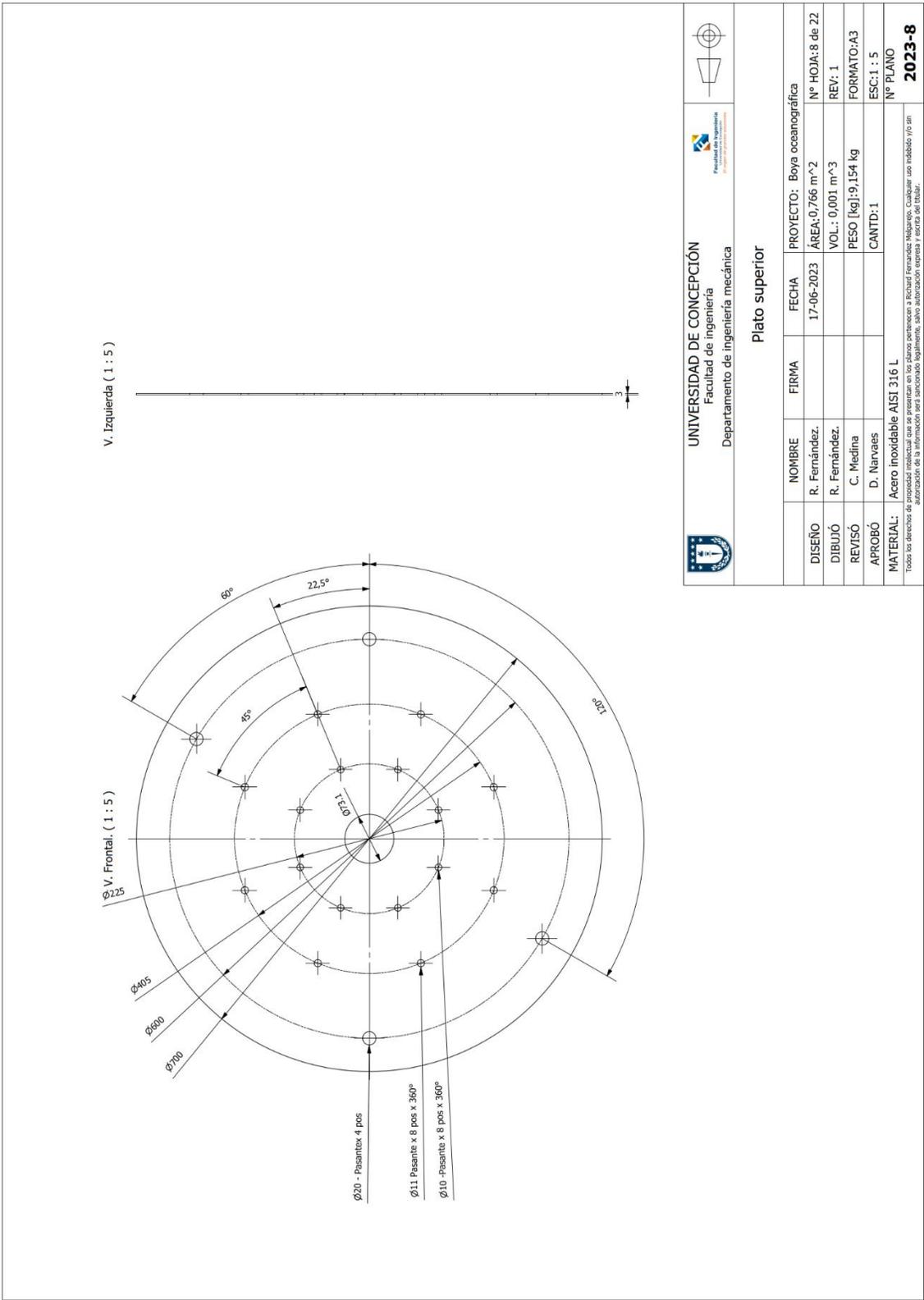
**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería mecánica

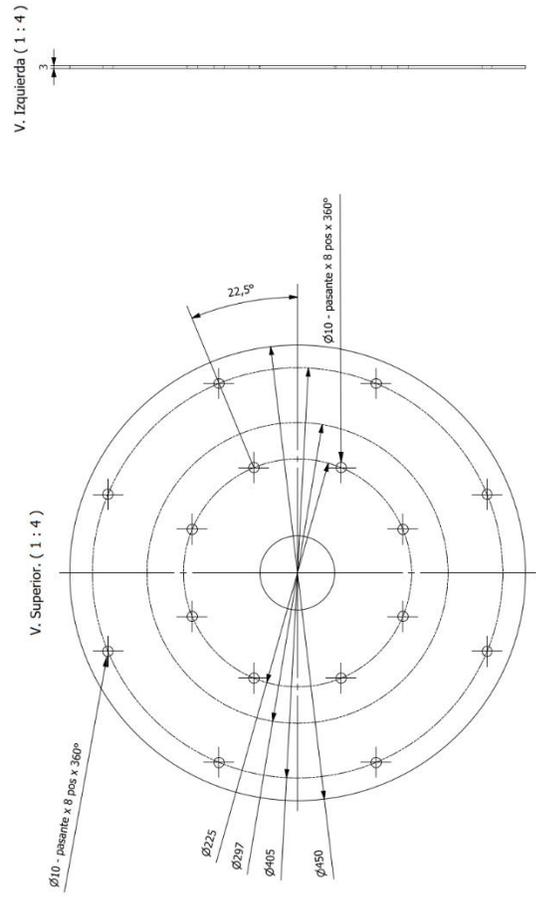
**Puerta**

DISEÑO	DIBUJÓ	REVISÓ	APROBÓ	MATERIAL:	NOMBRE	FIRMA	FECHA	PROYECTO:
R. Fernández.	R. Fernández.	C. Medina	D. Narvaes	Acero inoxidable AISI 316 L	R. Fernández.	[Firma]	17-06-2023	Boya oceanográfica
							ÁREA: 0,704 m <sup>2</sup>	N° HOJA: 6 de 22
							VOL.: 0,001 m <sup>3</sup>	REV: 1
							PESO [kg]: 8,443 kg	FORMATO: A3
							CANTD: 1	ESC: 1 : 6
							N° PLANO	<b>2023-6</b>

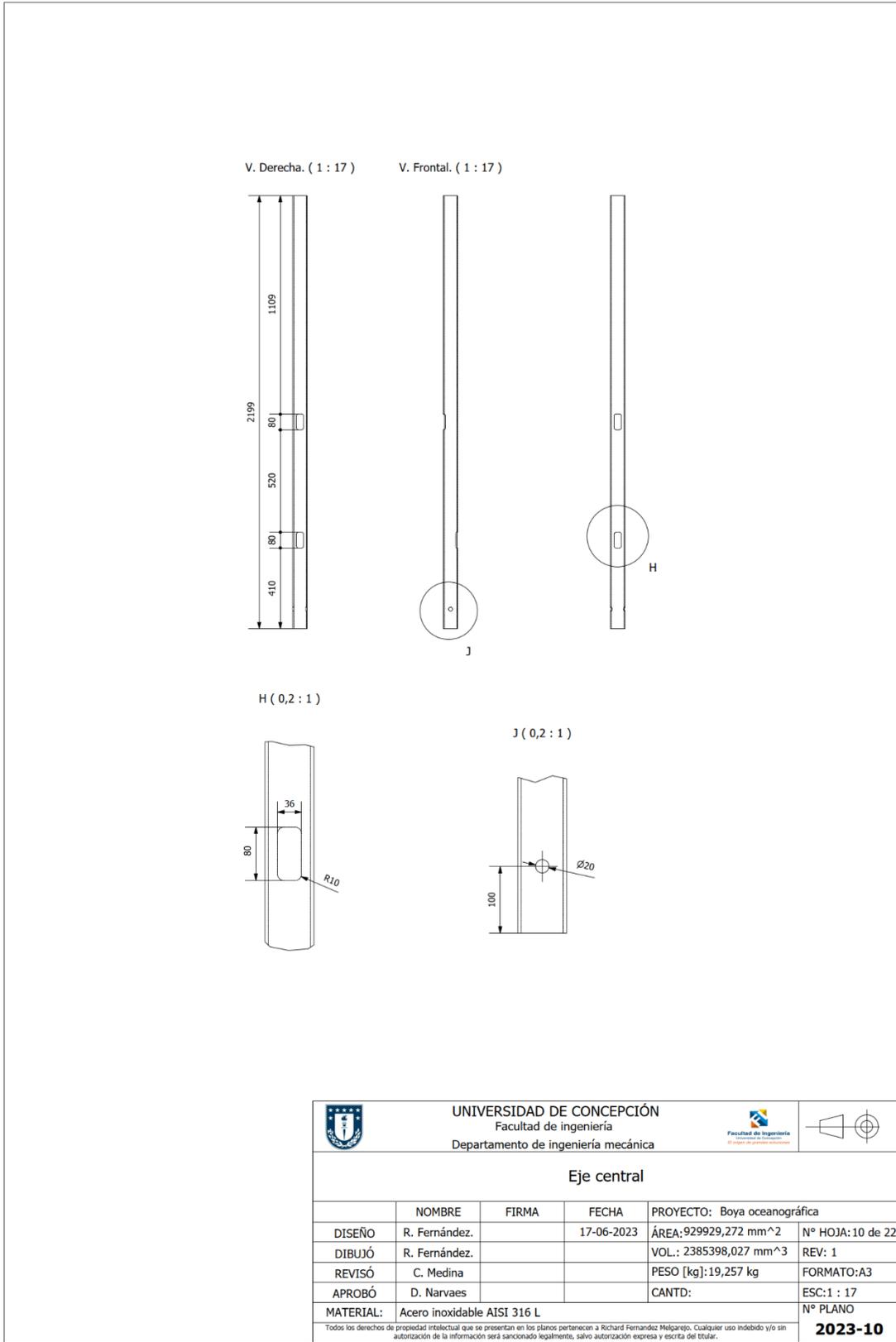
Todos los derechos de propiedad intelectual que se presenten en los planos pertenecen a Inchiad Fernández Narvaes. Cualquier uso indebido y/o anulación de la información será sancionado según los procedimientos de Inchiad Fernández Narvaes.







<b>UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN</b> Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería mecánica			
<b>Plato inferior.</b>			
NOMBRE	FIRMA	FECHA	PROYECTO: Boya oceanográfica
DISEÑO R. Fernández.		17-06-2023	ÁREA: 0,314 m <sup>2</sup> Nº HOJA: 9 de 22
DIBUJÓ R. Fernández.			VOL.: 0,000 m <sup>3</sup> REV: 1
REVISÓ C. Medina			PESO [kg]: 3,719 kg FORMATO: A3
APROBÓ D. Narvaes			ESC: 1 : 4 Nº PLANO
MATERIAL: Acero inoxidable AISI 316 L			
<small>Todos los derechos de propiedad intelectual que se presenten en los planos pertenecen a Inchiard Fernández Narvaes. Cualquier uso indebido y/o sin autorización de la información será sancionado legalmente, salvo autorización expresa y escrita del titular.</small>			
<b>2023-9</b>			



		<b>UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN</b> Facultad de ingeniería Departamento de ingeniería mecánica					
<b>Eje central</b>							
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	PROYECTO: Boya oceanográfica			
DISEÑO	R. Fernández.		17-06-2023	ÁREA: 929929,272 mm <sup>2</sup>	Nº HOJA: 10 de 22		
DIBUJÓ	R. Fernández.			VOL.: 2385398,027 mm <sup>3</sup>	REV: 1		
REVISÓ	C. Medina			PESO [kg]: 19,257 kg	FORMATO: A3		
APROBÓ	D. Narvaes			CANTD:	ESC: 1 : 17		
MATERIAL: Acero inoxidable AISI 316 L						Nº PLANO	
<small>Todos los derechos de propiedad intelectual que se presentan en los planos pertenecen a Richard Fernández Melgarejo. Cualquier uso indebido y/o sin autorización de la información será sancionado legalmente, salvo autorización expresa y escrita del titular.</small>							<b>2023-10</b>





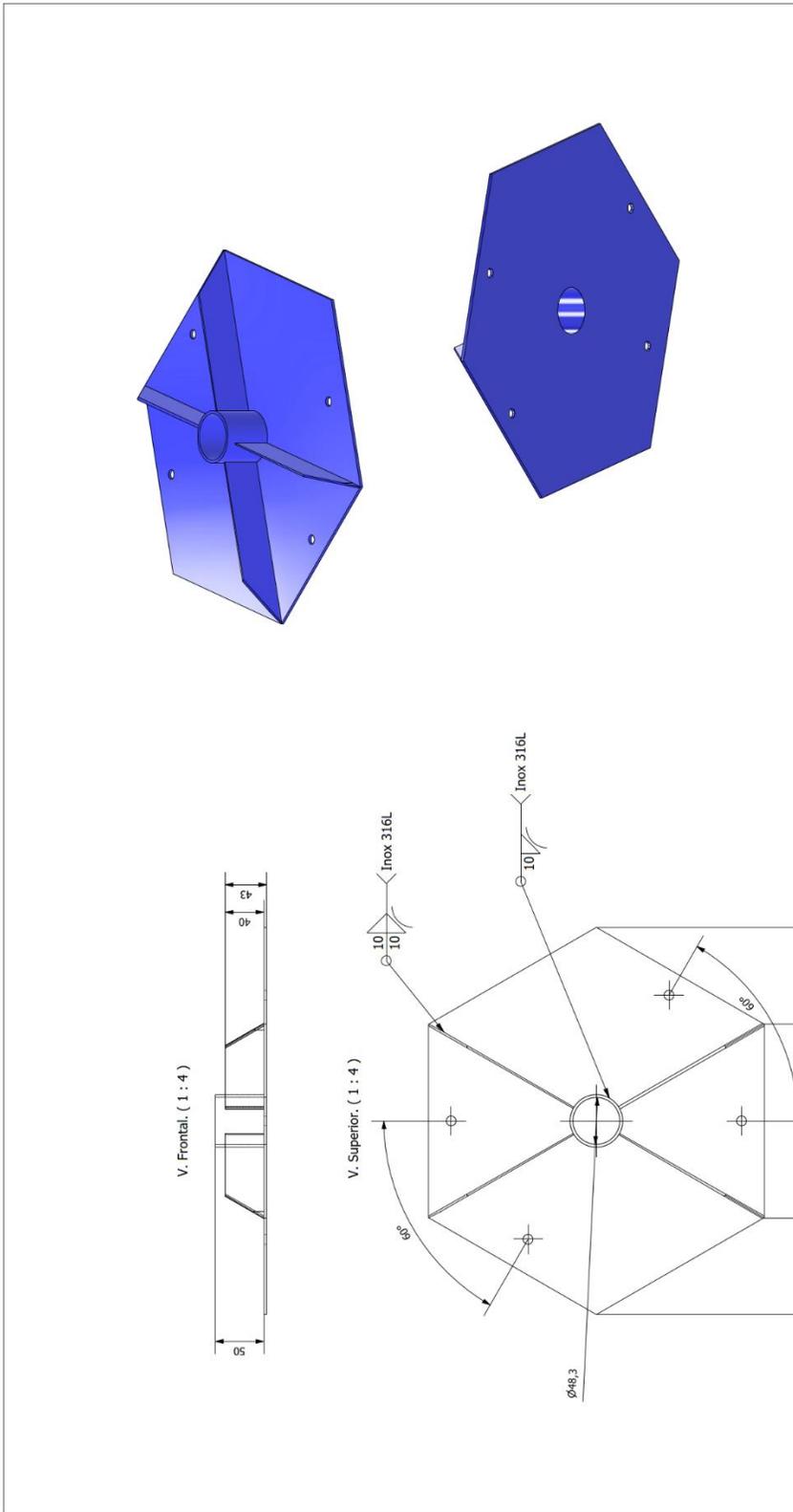












V. Frontal. ( 1 : 4 )

V. Superior. ( 1 : 4 )

Inox 316L

Inox 316L

$\phi 48.3$

200

400

35°

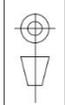
10

10

43

50

---

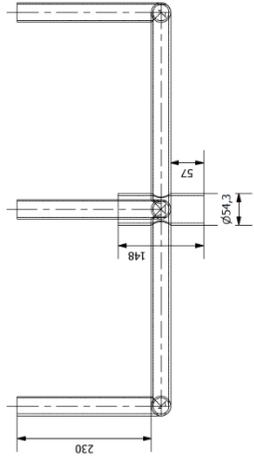




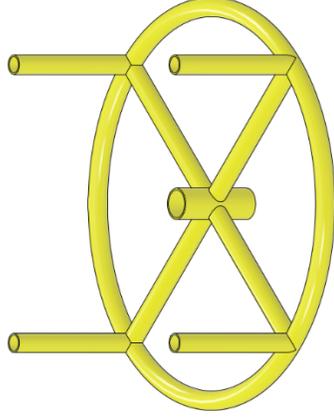
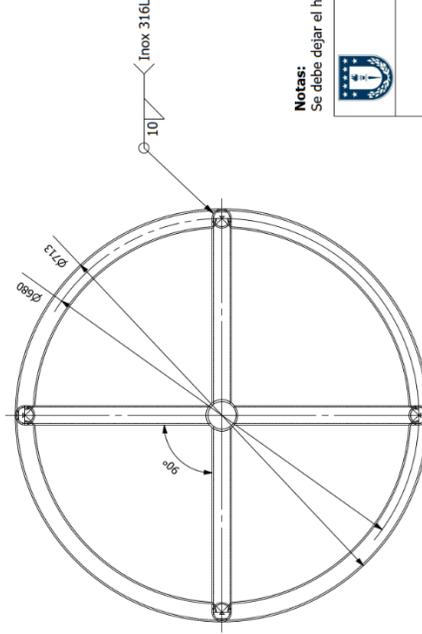
**Base bastón superior 1**

NOMBRE	FIRMA	FECHA	PROYECTO:	Boya oceanográfica
DISEÑO	R. Fernández.	17-06-2023	ÁREA:	0,272 m <sup>2</sup>
DIBUJÓ	R. Fernández.		VOL.:	0,000 m <sup>3</sup>
REVISÓ	C. Medina		PESO [kg]:	3,079 kg
APROBÓ	D. Narvaes		CANTD.:	1
MATERIAL:			Acero inoxidable AISI 316 L	Nº PLANO
			Todos los derechos de propiedad intelectual que se presenten en los planos pertenecen a Inchiad Fernández Narvaes. Cualesque uso indebido y/o sin autorización de la información será sancionado legalmente, salvo autorización expresa y escrita del titular.	<b>2023-18</b>

V. Frontal. ( 1 : 7 )



V. Superior. ( 1 : 7 )



**Notas:**  
Se debe dejar el hueco entre las uniones para el paso de cables

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería mecánica



**Soporte sensores climaticos - Cañeria 1" SCH 40**

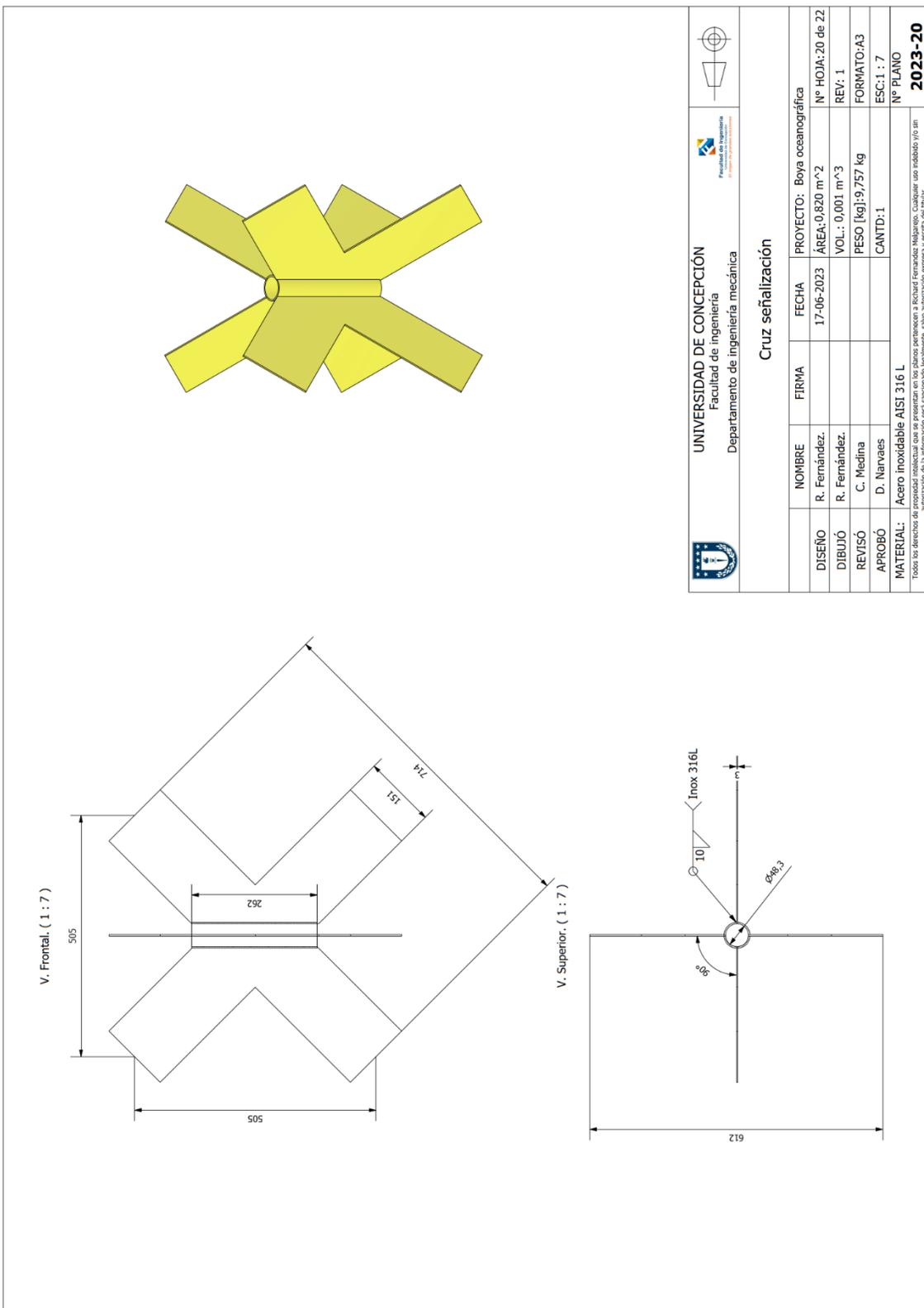
NOMBRE	FIRMA	FECHA	PROYECTO: Boya oceanográfica
DISEÑO R. Fernández		17-06-2023	ÁREA: 0,866 m <sup>2</sup>
DIBUJÓ R. Fernández			VOL.: 0,001 m <sup>3</sup>
REVISÓ C. Medina			PESO [kg]: 9,706 kg
APROBÓ D. Narvaes			CANTD:

MATERIAL: Acero inoxidable AISI 316 L

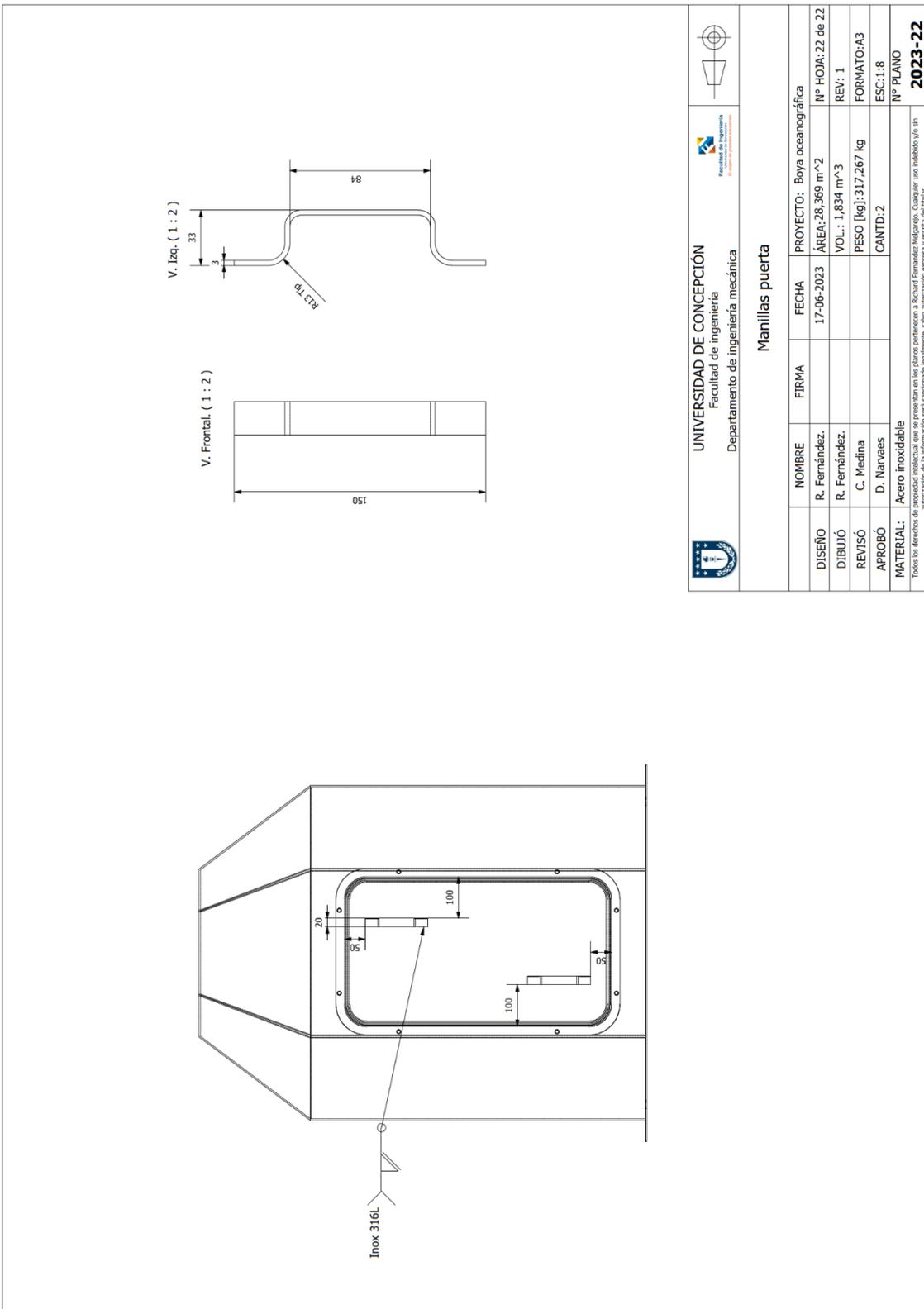
Todos los derechos de propiedad intelectual que se presenten en los planos pertenecen a Inchiari Fernando Nuñez. Cualquier uso indebido y/o sin autorización de la información será sancionado legalmente, dentro del ámbito de la ley de todos.

Nº PLANO

**2023-19**







									
<b>Manillas puerta</b>									
DISEÑO	DIBUJÓ	REVISÓ	APROBÓ	NOMBRE	FIRMA	FECHA	PROYECTO	Boya oceanográfica	N° HOJA:22 de 22
R. Fernández	R. Fernández	C. Medina	D. Narvaes	R. Fernández	R. Fernández	17-06-2023	ÁREA:28,369 m <sup>2</sup>		N° HOJA:22 de 22
							VOL.: 1,834 m <sup>3</sup>		REV: 1
							PESO [kg]:317,267 kg		FORMATO:A3
							CANTD:2		ESC:1:8
<b>MATERIAL: Acero inoxidable</b>									
<small>Todos los derechos de propiedad intelectual que se presenten en los planos pertenecen a Inchiard Fernández Narvaes. Cualquier uso indebido y/o sin autorización de la información será sancionado legalmente, tanto a nivel nacional como internacional.</small>									
									<b>N° PLANO</b>
									<b>2023-22</b>